



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การดูดซับสารตะกั่ว สังกะสี และนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยอลูมิเนียม  
ฟอสเฟต

Adsorption of Lead Zinc and Nickle from synthetic waste water by  
Aluminium phosphate

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี ทองคำ

ได้รับการสนับสนุนเงินวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2561

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การดูดซับสารตะกั่ว สังกะสี และนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยอลูมิเนียม  
ฟอสเฟต

Adsorption of Lead Zinc and Nickle from synthetic waste water by  
Aluminium phosphate

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี ทองคำ

ได้รับการสนับสนุนเงินวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2561

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ... การดูดซับสารตะกั่ว, สังกะสี และนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยอะลูมิเนียมฟอสเฟต  
แหล่งเงิน.....ทุนเงินงบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ..... 2561..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน... 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย... 1... ปี... ตั้งแต่... 1 ตุลาคม 2560... ถึงวันที่... 30 กันยายน 2561

หัวหน้าโครงการ นายมนตรี ทองคำ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์และตรวจสอบเอกลักษณ์ของอะลูมิเนียมฟอสเฟต (AlPO<sub>4</sub>) ไอโซเทอมการดูดซับและ ประสิทธิภาพการดูดซับ สังกะสี ตะกั่วและ นิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียผสมด้วย อะลูมิเนียมฟอสเฟต เมื่อกำหนดให้ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับแตกต่างกัน ตามการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล โดยงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ อะลูมิเนียมฟอสเฟต ด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่าย จากนั้นตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR, XRD, SEM, TGA และ BET พบว่าอะลูมิเนียมฟอสเฟต สังเคราะห์ได้ มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบผลึก มีการสลายตัวทางความร้อนและเสถียรที่ อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวและรูพรุนแบบ รูพรุนขนาดเมโซพอร์ (mesoporous) ผสมกับไมโครพอร์ (microporous) และจากการศึกษาความสามารถในการ ดูดซับด้วยเทคนิค AAS พบว่าความเร็วรอบในการดูดซับ 180 รอบต่ออนาที ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณ อะลูมิเนียมฟอสเฟตที่ใช้ในการดูดซับ 0.1%wt/v มี ประสิทธิภาพการดูดซับเหมาะสมที่สุด ส่วนการดูดซับ สังกะสี ตะกั่วและ นิกเกิลในน้ำเสียผสมพบว่าการดูดซับตะกั่วมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีกว่า โดยประสิทธิภาพการดูดซับของสังกะสี นิกเกิลและ ตะกั่วมีประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงกัน

**คำสำคัญ :** การดูดซับ ตะกั่ว สังกะสี นิกเกิล อะลูมิเนียมฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Research Title** Adsorption of Lead, Zinc and Nickel from synthetic waste water by

..... Aluminium phosphate

**Researcher:**..... Mr. Montree Thongkam.....

**Faculty:** ..... Science..... **Department:** Chemistry

..... King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.....

## ABSTRACT

This research was studied on the synthesis and characterization of Aluminium Phosphate ( $AlPO_4$ ) adsorption isotherm and adsorption performance of Zinc, Lead and Nickel from synthetic waste water and mixed waste water by Aluminium Phosphate. Determine the factors affecting adsorption. Based on Factorial Experimental Design. This research synthesized Aluminium Phosphate by simple precipitation method. It was confirmed by characterization techniques such as FT-IR, XRD, SEM, TGA and BET. The synthesized  $AlPO_4$  has crystal structures, high thermal stability at  $650^\circ C$ , surface area mesopore and micropore volume. Adsorption ability of  $AlPO_4$  was investigated by AAS. The optimum condition of results showed that shaking speed of 180 rpm 10 ppm concentration of heavy metal in waste water and the amount adsorbent of 0.1 %wt/v. The adsorption of Lead in mixed waste water is more efficient. It was showed the equilibrium adsorption of Zinc, Lead and Nickel similar performance.

**Keywords :** Adsorption, Lead, Zinc, Nickel, Aluminium Phosphate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ II ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย เงินงบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเภททุนส่งเสริมนักวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

ขอขอบคุณอาจารย์ ภาควิชาเคมี และเจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จ ลุล่วงด้วยดี

ขอบคุณบุคคลที่ไม่อาจกล่าวชื่อได้สำหรับความปรารถนาดีที่มีให้มาตลอด ขอขอบคุณที่คอยให้ที่พักในยามเหนื่อยล้า เป็นแรงใจที่ดี คอยกระตุ้นให้ทำงานและคำแนะนำที่ช่วยให้ผ่านพ้นเรื่องราวต่างๆ มาได้ คอยกดดันให้มีความรับผิดชอบ ความอดทนอดกลั้น และความกล้า เป็นตัวเร่งให้ทุกอย่างผ่านไปได้ และบุคคลที่คอยโทรมาให้กำลังใจอยู่บ่อยครั้ง ที่เป็นแรงผลักดันให้งานวิจัยนี้สำเร็จ ลุล่วงได้ด้วยดี

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภท ทุนพัฒนางานวิจัยประยุกต์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 ปีงบประมาณที่ได้รับการจัดสรรทุนอุดหนุนการวิจัยโครงการวิจัยนี้สำเร็จตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้

นายมนตรี ทองคำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญภาพ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โลหะฟอสเฟต.....	4
2.2.1 ซีโอไลต์.....	5
2.2 โลหะหนัก.....	6
2.2.1 การเข้าสู่ร่างกายของโลหะหนัก.....	6
2.2.1.1 การสูดดมเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ.....	6
2.2.1.2 การกิน.....	6
2.2.1.3 การซึมเข้าสู่ผิวหนังและเนื้อเยื่อ.....	6
2.3 ตะกั่ว (Lead).....	8
2.3.1 คุณสมบัติของสารตะกั่ว.....	9
2.3.2 ความเป็นพิษของสารตะกั่ว.....	9
2.3.2.1 ผลเสียต่อสมองและการติดต่อของเซลล์ประสาท.....	9
2.3.2.2 ผลเสียต่อเม็ดเลือดแดง.....	9
2.3.2.3 ผลเสียต่อการตั้งครรภ์และทารก.....	9
2.3.3 การป้องกันความเป็นพิษของสารตะกั่ว.....	9
2.3.3.1 การทำความสะอาดบ้าน.....	10
2.3.3.2 อย่านำสารตะกั่วเข้าบ้าน.....	10
2.3.3.3 ทำน้ำดื่มให้ปราศจากสารตะกั่ว.....	10
2.3.3.4 หลีกเลี่ยงสารตะกั่ว.....	10
2.3.3.5 ป้องกันสารตะกั่วจากการกิน.....	10
2.3.3.6 เลือกรับประทานอาหาร.....	10
2.4 นิกเกิล (Nickel).....	10
2.4.1 คุณสมบัติของนิกเกิล.....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

### หน้า

2.4.2	ความเป็นพิษของนิกเกิล.....	10
2.4.3	การป้องกันความเป็นพิษของนิกเกิล .....	11
2.5	สังกะสี (Zinc) .....	11
2.5.1	คุณสมบัติของสังกะสี.....	12
2.5.2	ความเป็นพิษของสังกะสี .....	12
2.5.3	การป้องกันความเป็นพิษของสังกะสี.....	13
2.5.3.1	กรณีต้องทำงานหลอมสังกะสี .....	13
2.5.3.2	ควบคุมระดับสังกะสีในที่ทำงาน .....	13
2.5.3.3	ให้ความรู้เรื่องใช้พุ่มโลหะ .....	13
2.5.3.4	เฝ้าระวังสุขภาพ .....	13
2.5.3.4	เฝ้าระวังสุขภาพ .....	13
2.5.3.5	ตรวจสุขภาพประจำปี.....	13
2.5.3.6	การตรวจระดับสังกะสีในเลือดและปัสสาวะ .....	13
2.6	วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย .....	13
2.6.1	การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (Precipitation) .....	13
2.6.2	กระบวนการแยกไฟฟ้าเมมเบรน (Electrodialysis).....	13
2.6.3	การออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis).....	13
2.6.4	การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery).....	13
2.6.5	การใช้สารดูดซับ (Adsorption).....	13
2.6.6	การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-Exchange).....	13
2.6.7	การระเหย (Evaporation).....	13
2.7	กระบวนการในการดูดซับ (Adsorption) .....	14
2.7.1	นิยามของการดูดซับ .....	14
2.7.1.1	การดูดซับทางกายภาพ .....	15
2.7.1.2	การดูดซับทางเคมี .....	15
2.7.2	กลไกการดูดซับ .....	16
2.7.3	อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ .....	16
2.7.3.1	การขนส่งอนุภาค (Bulk Transport) .....	16
2.7.3.2	การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport).....	16
2.7.3.3	การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle Transport) .....	17
2.7.4	ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	17
2.7.5	ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm).....	18
2.8	เทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์โลหะฟอสเฟต .....	19
2.8.1	การเตรียมแบบตกตะกอน.....	20
2.8.2	วิธีการเตรียมแบบไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal method).....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ V ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

### หน้า

2.8.3	วิธีการเตรียมแบบโซล-เจล (Sol-gel).....	20
2.8.4	วิธีการเตรียมแบบใช้สภาวะตัวกลาง (Media Synthetic method).....	21
2.8.5	วิธีการเตรียมแบบการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method).....	21
2.8.6	วิธีการเตรียมโดยใช้โซลโวเทอร์มัล (Solvothermal method).....	21
2.8.7	วิธีการเตรียมโดยไมโครเวฟ (Microwave method).....	21
2.9	การตรวจสอบเอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์อะลูมิเนียมฟอสเฟต.....	22
2.9.1	เครื่องตรวจวัดสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared, FT-IR).....	22
2.9.2	เครื่องวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับโดยใช้ เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์(X-ray Diffractometer, XRD).....	26
2.9.3	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM).....	30
2.9.4	การวัดพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาครูพรุนโดยวิธีบีอีที (BET).....	31
2.9.5	ตรวจสอบหาปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวดูดซับ โดยอาศัยการวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อย (XRF).....	33
2.10	การตรวจสอบเอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบการดูดซับอะลูมิเนียมฟอสเฟต.....	38
2.10.1	เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย วิธี Atomic Absorption Spectroscopy (AAS).....	39
2.10.2	การทำคุณภาพวิเคราะห์ด้วย AAS (Qualitative Analysis).....	41
2.10.3	การทำปริมาณวิเคราะห์ด้วย AAS (Qualitative Analysis).....	42
2.10.4	ผลกระทบของสิ่งรบกวนต่อการวิเคราะห์ (Interference Effects).....	42
2.11	ค่า Effective nuclear charge.....	43
2.12	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
<b>บทที่ 3</b>	<b>วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>46</b>
3.1	บทนำ.....	46
3.2	อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	46
3.3	สารเคมี.....	47
3.4	การสังเคราะห์ $AlPO_4 \cdot xH_2O$ ด้วยสารตั้งต้น $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ กับ $Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$ .....	48
3.5	วิธีการดูดซับอะลูมิเนียม ( $AlPO_4$ ).....	49
3.5.1	การสร้างกราฟมาตรฐานด้วยสารละลายเลด(II)ไนเตรท.....	50
3.5.2	การสร้างกราฟมาตรฐานด้วยสารละลายซิงค์(II)ไนเตรท.....	50
3.5.3	การสร้างกราฟมาตรฐานด้วยสารละลายนิกเกิล(II)ไนเตรท.....	50
3.5.4	การดูดซับของตะกั่วบนตัวดูดซับอะลูมิเนียมฟอสเฟต โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^k$ .....	50
3.5.4.1	การดูดซับสารละลายเลด(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 10 ppm.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อVIจึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.5.4.2 การดูดซับสารละลายเลด(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 50 ppm.....	51
3.5.4.3 การดูดซับสารละลายซิงค์(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 10 ppm.....	51
3.5.4.4 การดูดซับสารละลายซิงค์(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 50 ppm.....	52
3.5.4.5 การดูดซับสารละลายนิกเกิล(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 10 ppm.....	53
3.5.4.6 การดูดซับสารละลายนิกเกิล(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 50 ppm.....	53
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล .....</b>	<b>54</b>
4.1 ผลการสังเคราะห์อะลูมิเนียมฟอสเฟต .....	54
4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณสมบัติของอะลูมิเนียมฟอสเฟต .....	55
4.2.1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอะลูมิเนียมฟอสเฟต (AlPO <sub>4</sub> ) โดยการวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR).....	55
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของอะลูมิเนียมฟอสเฟต (AlPO <sub>4</sub> ) ด้วยเทคนิคการ เลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) .....	57
4.2.3 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอะลูมิเนียมฟอสเฟต (AlPO <sub>4</sub> ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) .....	58
4.2.4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของอะลูมิเนียมฟอสเฟต (AlPO <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O) โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA (Thermal Gravimetric Analysis, TGA) .....	58
4.2.5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิคบีอีที (Brunauer–Emmett–Teller, BET).....	59
4.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ .....	60
4.3.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีด้วย อะลูมิเนียมฟอสเฟต .....	60
4.3.1.1 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ .....	62
4.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสี ตะกั่ว และ นิกเกิลแบบน้ำเสียผสม .....	65
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>66</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	67
เอกสารอ้างอิง .....	68
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก.....	72
ภาคผนวก ข.....	76
ภาคผนวก ค.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อVII จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ง .....	80
ภาคผนวก จ.....	82
ภาคผนวก ฉ.....	83
ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย.....	85



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VIII จนถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชนิดของโลหะหนัก แหล่งที่พบ และผลกระทบของโลหะหนักต่อสุขภาพมนุษย์ .....	7
2.2 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ .....	15
2.3 ต้นกำเนิดรังสีเอ็กซ์แบบไอโซโทปรังสี.....	36
3.1 การออกแบบการทดลองแบบ 2K แฟกทอเรียล .....	49
3.2 ตัวแปรสำหรับการทดลองแบบ 2K แฟกทอเรียล .....	49
4.1 ร้อยละผลิตภัณฑ์ของ $AlPO_4 \cdot 3H_2O$ ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่ายโดยมี $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ และ $Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$ เป็นสารตั้งต้น.....	54
4.2 ร้อยละผลิตภัณฑ์ของ $AlPO_4$ หลังจากนำ $AlPO_4 \cdot 3H_2O$ ไปเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง .....	55
4.3 แลบบการสั่นและรูปแบบการสั่นของอะลูมิเนียมฟอสเฟตก่อนเผา ( $AlPO_4 \cdot 3H_2O$ ) ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่ายโดยมี $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ และ $Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$ เป็นสารตั้งต้น .....	56
4.4 แลบบการสั่นและรูปแบบการสั่นของอะลูมิเนียมฟอสเฟตหลังเผา ( $AlPO_4$ ) ที่ได้จากนำ $AlPO_4 \cdot 3H_2O$ ไปเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	57
4.5 พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $AlPO_4$ ).....	59
4.6 ข้อมูลการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ โดยใช้การออกแบบการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักสังกะสี.....	61
4.7 ข้อมูลการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ โดยใช้การออกแบบการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักนิกเกิล.....	61
4.8 ข้อมูลการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ โดยใช้การออกแบบการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่ว.....	61
4.9 ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสี ตะกั่ว และนิกเกิลแบบน้ำเสียผสม .....	65

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ประเภทไอโซเทอมการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด .....	18
2.2 แบบจำลองการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแล้วเกิดเป็นความร้อนของวัสดุ .....	22
2.3 แสดงองค์ประกอบของเครื่อง FT-IR .....	23
2.4 ตัวอย่างของเหลว .....	25
2.5 การวัดของเหลวบนเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ .....	25
2.6 ตัวอย่างที่ไม่สามารถละลายได้ .....	26
2.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดจากการกระเจิงและแทรกสอดของรังสี .....	28
2.8 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง XRD (X-ray diffractometer) .....	29
2.9 กราฟการวัดพื้นที่ผิวโดยวิธีการดูดซับของแก๊สด้วยบีบีที .....	32
2.10 อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมแบ่งเป็นชั้น .....	33
2.11 (a) รังสีเอ็กซ์พลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกไปจากวงโคจร (b) อิเล็กตรอนในชั้นที่ M ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาแทนที่โดยคายรังสีเอ็กซ์ ที่มีพลังงานจำเพาะออกมา .....	34
2.12 สัญลักษณ์ของรังสีเอ็กซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน .....	34
2.13 สัญลักษณ์ของรังสีเอ็กซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน .....	35
2.14 (a) แอ็บซอร์บชันแอดจ์ของอิเล็กตรอนในชั้น K, L, M และ (b) แอ็บซอร์บชันแอดจ์ของคาร์บอน ไนโตรเจนและออกซิเจน .....	35
2.15 ส่วนประกอบของหลอดรังสีเอ็กซ์ .....	36
2.16 ต้นกำเนิดรังสีเอ็กซ์แบบไอโซโทปรังสี .....	37
2.17 การจัดต่อประกอบอุปกรณ์การวิเคราะห์โดยเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ .....	37
2.18 สเปกตรัมรังสีเอ็กซ์จำเพาะของธาตุในตัวอย่างกระดาษ .....	38
2.19 สเปกตรัมรังสีเอ็กซ์จำเพาะของธาตุในโลหะผสมอลูมิเนียม .....	38
2.20 การเปลี่ยนสถานะเมื่อการดูดกลืนพลังงาน .....	39
2.21 แสดง Flame Atomization process .....	40
4.1 สเปกตรัม FT-IR ของอะลูมิเนียมฟอสเฟต (a) ก่อนเผา ( $AlPO_4 \cdot 3H_2O$ ) (b) หลังเผา ( $AlPO_4$ ) .....	56
4.2 รูปแบบ XRD ของอะลูมิเนียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้ ( $AlPO_4$ ) เทียบกับค่ามาตรฐาน ในฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 72-1161 .....	57
4.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $AlPO_4$ ) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 30000 เท่า .....	58
4.4 เทอร์โมแกรม TGA ของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $AlPO_4 \cdot 3H_2O$ ) .....	59
4.5 กระจายตัวของรูพรุนของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $AlPO_4$ ) .....	60
4.6 ไอโซเทอมการดูดซับสังกะสีจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ตามการออกแบบประสิทธิภาพแบบ 2K Factorial .....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ X ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.7 ไอโซเทอมการดูดซับนิกเกิลจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ตามการออกแบบประสิทธิภาพแบบ 2K Factorial .....	62
4.8 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ตามการออกแบบประสิทธิภาพแบบ 2K Factorial .....	63
4.9 ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ตามการออกแบบประสิทธิภาพแบบ 2K Factorial .....	63
4.10 ประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ตามการออกแบบประสิทธิภาพแบบ 2K Factorial.....	64
4.11 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ตามการออกแบบประสิทธิภาพแบบ 2K Factorial.....	64



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ [1]

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการเพิ่มจำนวนของประชากรมากขึ้น ทำให้มีการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ การพัฒนาเทคโนโลยีและมีการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมมากขึ้น ส่งผลให้มีการใช้ทรัพยากรและปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมเกินขีดจำกัด ทำให้เกิดปัญหามลพิษทางด้านของสิ่งแวดล้อม หนึ่งในผลกระทบนั้นคือการเกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งทางดิน ทางน้ำ และทางอากาศ ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดความเสียหายและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต โลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ และยังสามารถเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้หลายทาง แหล่งที่มาของโลหะหนักมีหลักๆคือ

1. โรงงานอุตสาหกรรม
2. ชุมชนบ้านเรือนที่พักอาศัย และ
3. การทำเกษตรกรรม สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม จะมีการปนเปื้อนโลหะหนักต่างๆ มาจากการบำบัดน้ำทิ้งของแต่ละโรงงาน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม อาทิ โลหะหนักจากโรงงาน ชุบโลหะส่วนใหญ่จะมีสารเจือปนอยู่ ตัวอย่าง ได้แก่ โครเมียม แคดเมียม สังกะสี ทองแดง โรงงานผลิตโซดาไฟในกระบวนการผลิตแบบเก่า จะมีพวกสารปรอทปะปนอยู่ โรงงานผลิตสี หรือโรงงานทอผ้าที่มีการย้อมสี จะมีสารพวกตะกั่ว ปรอท และสารหนู เป็นต้น โรงกลั่นน้ำมันอาจมีโลหะหนัก เช่น ตะกั่วเจือปนอยู่ สำหรับแหล่งโลหะจากชุมชนบ้านเรือน จะมีการพบโลหะหนักจากของที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ชากถ่านไฟฉายที่ใช้แล้ว จะมีสารโลหะหนักพวกแมงกานีส หรือแคดเมียมอยู่ใน ชากแบตเตอรี่รถยนต์เก่ามีสารโลหะหนักพวก ตะกั่วเหลืออยู่ นอกจากนี้หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่หมดอายุใช้งานแล้ว ยังคงมีสารปรอทเหลืออยู่ เศษของเสียเหล่านี้ถ้าถูกทิ้งไปโดยไม่ดูแลให้ถูกต้อง โลหะหนักดังกล่าวอาจถูกน้ำชะล้างออกมาปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อมได้ สำหรับการพบโลหะหนักจากการทำเกษตร โลหะหนักจะถูกนำไปเป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย จะเห็นได้ว่าน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในการดำรงชีวิตประจำวัน ซึ่งปัจจุบันปริมาณของเสียอุตสาหกรรมมีจำนวนเพิ่มขึ้น การกำจัดขยะมูลฝอยยังนิยมใช้วิธี การฝังกลบ ทำให้มีปัญหาคาราคอซังของน้ำชะขยะออกนอกบริเวณที่ฝังกลบ ซึ่งอาจทำให้เกิดมลพิษต่างๆและเกิดการปนเปื้อนโลหะหนักในแหล่งน้ำ โลหะหนักเหล่านี้ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี นิกเกิล ปรอท ยูเรเนียม ซีลีเนียม สารหนู เงิน ทอง และ แคดเมียม จัดเป็นสารอันตรายประเภทมีพิษร้ายแรง เนื่องจากไม่สามารถเสื่อมสลายทางชีวภาพ ซึ่งนอกจากจะไม่เปลี่ยนรูปตามกาลเวลาแล้ว ยังสามารถส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำตามธรรมชาติและยังถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียงนั้นได้โดยผ่านทางห่วงโซ่อาหาร

คนเรามีความเสี่ยงต่อการนำโลหะหนักเข้าสู่ร่างกาย นทางการบริโภคอาหาร หรือดื่มน้ำที่มีสารเหล่านี้ปนเปื้อนอยู่ โลหะหนักสามารถทำลายระบบประสาท ตับ กระดูก และขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ที่สำคัญในร่างกาย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ วิธีการกำจัดโลหะหนักมี 3 วิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ กระบวนการกำจัดโลหะหนักขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น เทคโนโลยีของการบำบัดน้ำเสีย ความเข้มข้นและสถานการณ์ออกซิเดชัน (Oxidation) ของโลหะ ความเป็นกรด-เบสของน้ำ และกลไกการกำจัดโลหะ

เทคนิคที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ วิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี ซึ่งมีหลายกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) กระบวนการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration)

ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าผ่านเครื่องกรอง (Electrodialysis) กระบวนการออสโมซิสผันทกลับ (Reverse Osmosis) กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมี (Precipitation and coagulation) และกระบวนการดูดซับ เป็นต้น

โครงการวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้อลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) เป็นตัวดูดซับซึ่งเป็นซีโอไลต์ชนิดหนึ่ง นิยมใช้เป็นตัวดูดซับ เนื่องจากมีคุณสมบัติในการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่างของรูพรุน ซึ่งเป็นหลักพื้นฐานของกระบวนการดูดซับระดับโมเลกุล (Molecular sieves) โดยสามารถเลือกดูดซับเฉพาะบางโมเลกุลได้นอกจากนี้ยังศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์เป็นไปตามสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อสังเคราะห์อลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) โดยใช้  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
- 2) เพื่อตรวจสอบเอกลักษณ์ของอลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) ด้วย FT-IR XRD TGA SEM และ BET เป็นต้น
- 3) เพื่อศึกษาการดูดซับของโลหะหนักและไอโซเทอมจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้อลูมิเนียมฟอสเฟต

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) สังเคราะห์อลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) โดยใช้เทคนิคตกตะกอนอย่างง่าย สภาวะที่ในการทดลองที่มี สารตั้งต้นคือ อะลูมิเนียมไนเตรทโนนไฮเดรต ( $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) ทำปฏิกิริยากับ สารประกอบฟอสเฟต คือ โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ )
- 2) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของอลูมิเนียมฟอสเฟต โดยใช้เทคนิคต่างๆ ดังนี้
  - 2.1 ตรวจสอบการสั่นของโมเลกุลและไอออนของสารที่เตรียมได้ทั้งหมด รวมทั้ง อนุพันธ์ทางความร้อนของสารด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR )
  - 2.2 ตรวจสอบความเป็นผลึกของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)
  - 2.3 ตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของสารที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนอลิซิส (Thermal Gravimetric Analysis, TGA)
  - 2.4 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของสารที่ได้ทั้งหมดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
  - 2.5 ตรวจสอบค่าพื้นที่ผิว (surface area) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ ด้วย เทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว หรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน (Brunauer-Emmett-Teller, BET)
- 3) ศึกษาการดูดซับ เลด (Pb) ไนเตรต ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) ซิงค์ (Zn) ไนเตรต ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ ) และ นิกเกิล (Ni) ไนเตรต ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ ) โดยใช้อลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) วัดค่าการดูดซับด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน สเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS) โดยมีปัจจัยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดคือ ความเร็วรอบในก ารเขย่า ความเข้มข้นของโลหะหนัก ปริมาณของอะลูมิเนียมฟอสเฟต

- 4) ศึกษาไอโซโทมการดูดซับตะกั่ว สังกะสี และ นิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวดูดซับ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถเตรียมอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $AlPO_4$ ) ด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่าย
- 2) สามารถดูดซับตะกั่ว สังกะสี และนิกเกิล จากแหล่งน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้อะลูมิเนียมฟอสเฟต เป็นตัวดูดซับ
- 3) มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีการดูดซับและกระบวนการดูดซับบนตัวดูดซับอะลูมิเนียมฟอสเฟต
- 4) สามารถใช้ไอโซโทมในการอธิบายรูปแบบกระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับอะลูมิเนียมฟอสเฟต
- 5) สามารถนำการออกแบบการทดลอง  $2^k$  เชิงแฟกทอเรียลมาใช้หาสมการโมเดลของสารตะกั่ว สังกะสี และ นิกเกิลได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 โลหะฟอสเฟต [2-3]

สารประกอบ ฟอสเฟตเป็นสารในกลุ่มที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และมีประโยชน์ทางอ้อมเมื่อสารกลุ่มนี้ถูกทิ้งหรือปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมคือสามารถให้ธาตุอาหารกับพืช ต่างๆ เนื่องจากมีธาตุฟอสฟอรัส (P) ซึ่งเป็นธาตุที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช สารประกอบฟอสเฟตเป็นสารที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น อุตสาหกรรมเนื้อสัตว์ อุตสาหกรรมการผลิตนม ผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็ง และผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ โดยการผลิตสารประกอบฟอสเฟตนั้นสามารถผลิตได้จากกระดูกสัตว์ หินฟอสเฟต หรือปฏิกิริยาระหว่างไอออนของโลหะกับกรดฟอสฟอริก ซึ่งสารประกอบฟอสเฟตนั้นได้รับการรับรอง ว่าเป็นส่วนประกอบของอาหารที่ปลอดภัย (GRAS; Generally Recognized as Safe) จากประเทศสหรัฐอเมริกา ประโยชน์ของ แร่ฟอสเฟต ส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมปุ๋ย นอกจากนี้ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ผงซักฟอก ยาสีฟัน อุปกรณ์ขัดถู วัตถุระเบิด ยาฆ่าแมลง ดอกไม้ไฟ ไม้ขีดไฟ วัสดุไฟฟ้า ยารักษาโรค การกลั่นน้ำมัน และในอุตสาหกรรมเหล็กกล้า

ฟอสเฟตเป็นธาตุอาหารหลักชนิดหนึ่งที่เป็นต่อการเจริญต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่นเดียวกับธาตุอื่น ๆ เช่น คาร์บอน ไนโตรเจน โปแตสเซียม แคลเซียม เหล็ก เป็นต้น ความเป็นประโยชน์ของฟอสเฟตดินขึ้นกับ pH ของดิน ธาตุอาหารพืชจะละลายออกมาอยู่ในสภาพที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ง่าย และพอเพียงกับความต้องการของพืช เมื่อดินมี pH ที่เหมาะสม ปุ๋ยฟอสเฟตมีด้วยกันอยู่หลายชนิด เช่น ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (Diammonium phosphate, DAP), ปุ๋ยหินฟอสเฟต (Phosphate Rock, PR) และปุ๋ยทริเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (Triple superphosphate, TSP) ปุ๋ยฟอสเฟต เป็นปุ๋ยเคมีที่ให้ธาตุฟอสฟอรัสในรูปสารประกอบฟอสเฟต pH ของดินมีผลต่ออนุมูลของฟอสเฟต พบว่า pH ของดินในช่วง 5-8 ฟอสเฟตจะอยู่ในรูป  $H_2(PO_4)^-$  (dihydrogen phosphate ion และ  $H(PO_4)^{2-}$  (hydrogen phosphate ion) ในสภาวะดินในช่วงนี้ ปุ๋ยฟอสเฟตจะช่วยเสริมการเจริญเติบโต และความแข็งแรงของพืชทั้งส่วนราก ลำต้น และใบ ตลอดจนการออกดอกออกผลให้มากยิ่งขึ้น

โลหะฟอสเฟตเป็นแร่ชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งจะผ่านกลไกที่เรียกว่า กระบวนการเฟอร์โรไลซิส (Ferrolysis process) ซึ่งจะเกิดผ่านปฏิกิริยารีดักชัน ภายใต้ภาวะกรด-เบส โดยมีระยะเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม โลหะฟอสเฟตมี การใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น ใ ช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวแลกเปลี่ยนไอออน สีเคลือบป้องกันการกัดกร่อน สารซักล้าง ปุ๋ยที่มีคุณภาพสูง เป็นต้น

จากการที่ฟอสเฟตถูกเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้เกิดประโยชน์ต่อพืชได้เล็กน้อย เท่านั้น แต่ประโยชน์ของโลหะฟอสเฟตขึ้นอยู่กับสภาวะความเป็นกรด -เบสของดินด้วย เช่น อะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $AlPO_4$ ) เป็นประโยชน์ต่อพืชได้น้อยแต่จะละลายน้ำได้บ้างในดินที่มีสภาวะเป็นกรด

โลหะฟอสเฟตนั้นยังสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ ซึ่งในการสังเคราะห์สามารถทำได้หลากหลายวิธีคือ

เอกสารนี้เป็น 1.00 วิธีการตกตะกอน (Precipitation) การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีการเตรียมแบบไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal method)
3. วิธีการเตรียมแบบโซล-เจล (Sol-gel)
4. วิธีการเตรียมแบบใช้สภาวะตัวกลาง (Media synthetic method)
5. วิธีการเตรียมจากการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method)
6. วิธีการเตรียมโดยใช้โซลโวเทอร์มัล (Solvothermal method)
7. วิธีการเตรียมโดยไมโครเวฟ (Microwave method)

ในแต่ละวิธีข้างต้นนั้น สามารถที่จะผลิตโลหะฟอสเฟตได้เป็นอย่างดีและมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบันมีผู้สนใจในการสังเคราะห์โลหะฟอสเฟตเป็นจำนวนมาก เพราะเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็วกว่าวิธีที่โลหะฟอสเฟตเกิดขึ้นตามธรรมชาติ

### 2.1.1 ซีโอไลต์

ซีโอไลต์คือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม ( $\text{SiO}_4$  หรือ  $\text{AlO}_4$ ) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม นอกจากซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก สามารถต้มให้เดือดระเหยออกไปได้ ทำให้เป็นที่มาของชื่อซีโอไลต์นั่นเอง

ซีโอไลต์นั้นอาจเกิดขึ้นตามธรรมชาติในรูปของแร่ธาตุ มีการทำเป็นเหมือนซีโอไลต์ในพื้นที่หลายแห่งของโลก หรืออาจสังเคราะห์ขึ้นได้โดยกระบวนการทางเคมี เพื่อประโยชน์ทางการค้า ซึ่งจะทำให้ได้ซีโอไลต์ที่มีสมบัติเฉพาะเจาะจง รวมทั้งอาจมีการสังเคราะห์ซีโอไลต์ในห้องปฏิบัติการเพื่อประโยชน์ในการศึกษาลักษณะทางเคมีของซีโอไลต์เองด้วย

## 2.2 โลหะหนัก

โลหะหนัก (Heavy Metal) หมายถึง ธาตุที่มีน้ำหนักมากกว่าน้ำ 5 เท่า หรือมีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 ขึ้นไป มีเลขอะตอมตั้งแต่ 23-92 จำนวนทั้งหมด 72 ธาตุ ในคาบที่ 4-7 อาทิ แคดเมียม โครเมียม สังกะสี ตะกั่ว นิกเกิล เป็นต้น ซึ่งธาตุโลหะหนักเหล่านี้ บางชนิดมีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม บางชนิดมีประโยชน์ต่อร่างกาย แต่บางชนิดก็เป็นพิษต่อร่างกาย โลหะหนักสามารถละลายน้ำได้ สามารถเปลี่ยนเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ สามารถตกตะกอนหรือเป็นอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ

โลหะหนักที่แพร่กระจายไปสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจาก อุตสาหกรรมการผลิตต่างๆที่มีการใช้วัตถุดิบหรือสารเคมีที่มีโลหะหนักปนเปื้อน อาทิ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมถลุงแร่ อุตสาหกรรมย้อมสี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุตสาหกรรมฟอกหนัง และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้อาจปล่อยมลพิษ และของเสียจากกระบวนการผลิตออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ทั้งทางอากาศเสีย น้ำเสีย และกากของเสีย โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ที่มีขุดเปิดหน้าดิน และขุดตักดินลงลึก ทำในช่วงฤดูเกิดการชะหน้าดินที่อาจมีโลหะหนักลงสู่แม่น้ำสาธารณะได้ง่าย แหล่งกำจัดขยะ ซึ่งมักเป็นแหล่งรวบรวม และกำจัดขยะในปริมาณมหาศาล โดยกองขยะที่รวบรวมไว้มักมีขยะหลายชนิดที่มีโลหะหนักปนเปื้อน อาทิ แบตเตอรี่ พิวซี ถ่านไฟฉาย สีพ่น เป็นต้น ซึ่งหากมีการกำจัดไม่ถูกหลักย่อมเสี่ยงต่อการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย โดยเฉพาะการชะล้างของฝน และการซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

ความเป็นพิษของโลหะหนัก เกิดจากร่างกายได้ รับประทานอาหาร ซึ่งโลหะหนักนั้น จะไปรบกวนการทำงานของเอนไซม์ของเซลล์และยึดกับเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้การควบคุมการลำเลียงของสารต่างๆของเยื่อหุ้มเซลล์ผิดปกติไป ความเป็นพิษของโลหะหนักขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมีของสารประกอบของโลหะหนักแต่ละชนิด และเส้นทางที่ร่างกายได้รับเข้าไป เช่น ทางระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหาร ผิวหนัง เป็นต้น ซึ่งสารพิษเหล่านี้เมื่อสะสมอยู่ในร่างกายจนถึงระดับหนึ่งก็จะแสดงอาการออกมาให้เห็น

### 2.2.1 การเข้าสู่ร่างกายของโลหะหนัก

2.2.1.1 การสูดดมเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ การหายใจเอาโลหะหนักเข้าร่างกาย ถือเป็นช่องทางหนึ่งที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้มาก โดยผู้ที่มีโอกาสเสี่ยง ได้แก่ ผู้ที่ทำงานในเหมืองแร่ ผู้ที่ทำงานในโรงงานหลอมแร่หรือโลหะ ผู้ที่ทำงานในโรงงานเชื่อมหรือบัดกรีและอื่นๆ

2.2.1.2 การกินเป็นช่องทางหนึ่งที่โลหะหนักสามารถเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ได้มากที่สุด ซึ่งมักเกิดจากการรับประทานอาหารหรือดื่มน้ำที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักเข้าไป แบ่งได้เป็น การกินอาหารที่วัตถุปนเปื้อนโลหะหนัก เช่น ข้าวที่ปลูกในแหล่งเหมืองแร่ที่มีโลหะหนัก และ การดื่มน้ำ เช่น แหล่งน้ำดื่มใกล้เหมืองแร่ซึ่งอาจปนเปื้อนโลหะหนักได้

2.2.1.3 การซึมเข้าสู่ผิวหนัง และเนื้อเยื่อ มักเกิดขึ้นไม่บ่อยนัก และมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับช่องทาง 2 อย่าง ข้างต้น แต่ก็พบมีโอกาสเกิดขึ้นได้ ได้แก่ การสัมผัสกับไอโลหะหนักในโรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงกลั่นแร่และการแช่น้ำหรืออยู่ในแหล่งน้ำที่มีโลหะหนักปนเปื้อนสูง

โลหะหนักปริมาณน้อยๆที่ปนเปื้อนในน้ำจะไม่สามารถตรวจวัดได้ โลหะหนักเหล่านั้น ได้แก่ ตะกั่ว สารหนู แคดเมียม แมงกานีส และสังกะสี ซึ่งมีความคงทนและไม่สลายตัวเมื่ออยู่ในน้ำ จึงทำให้โลหะหนักเข้าไปสู่ห่วงโซ่อาหาร และเป็นอันตรายต่อมนุษย์ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะหนัก แหล่งที่พบ และผลกระทบของโลหะหนักต่อสุขภาพมนุษย์

โลหะหนัก	แหล่งที่มา	ผลต่อสุขภาพ	ระดับที่อนุญาตให้ใช้ได้ (ppm)
สารหนู (As)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สารกำจัดศัตรูพืช</li> <li>- สารกำจัดเชื้อรา</li> <li>- การถลุงโลหะ</li> <li>- การทำเหมืองแร่</li> </ul>	<p>หลอดเลือดอักเสบ</p> <p>ผิวหนังอักเสบ</p> <p>ระบบทางเดินอาหาร</p>	0.02
แคดเมียม (Cd)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การเชื่อมโลหะ</li> <li>- การชุบโลหะ</li> <li>- สารกำจัดศัตรูพืช</li> <li>- ปุ๋ยแบตเตอรี่</li> <li>- โรงปฏิกรณ์ปรมาณู</li> </ul>	<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"> <li>- โรงงานทำสี</li> <li>- สารกำจัดศัตรูพืช</li> <li>- ควันท่อไอเสียรถยนต์</li> <li>- การทำเหมือง</li> <li>- การเผาถ่าน</li> </ul>	<p>ทำลายตับ, ไต</p> <p>ระบบทางเดินอาหาร</p> <p>ในเด็กทำให้ปัญญาอ่อน</p>	0.1

โลหะหนัก	แหล่งที่มา	ผลต่อสุขภาพ	ระดับที่อนุญาตให้ใช้ได้ (ppm)
แมงกานีส (Mn)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การเชื่อมโลหะ</li> <li>- สารเติมในน้ำมัน</li> </ul>	<p>สุดคมหรือสัมผัสจะทำลาย</p> <p>ระบบประสาทส่วนกลาง</p>	0.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่อออนไลน์ การค้า ไม่ว่าการฉ้อโกงใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	- เชื้อเพลิงการผลิตโลหะผสมเหล็กและแมงกานีส		
ปรอท (Hg)	-สารกำจัดศัตรูพืช -แบตเตอรี่ -อุตสาหกรรมกระดาษ	ทำลายระบบประสาท	0.01
สังกะสี (Zn)	-โรงกลั่น -การผลิตทองเหลือง -การชุบโลหะ -ท่อประปา	ไอของสังกะสีกัดกร่อนผิวหนัง, ทำลายเยื่อประสาท	15

### 2.3 ตะกั่ว (Pb) [6-7]

ถึงแม้ว่าปัจจุบันประเทศต่างๆ รวมทั้งประเทศไทยได้เลิกใช้น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ที่มีตะกั่ว แต่ปัญหาภาวะตะกั่วเป็นพิษต่อสุขภาพยังคงเป็นปัญหากว้างขวางระดับโลก เนื่องจากตะกั่วถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย เช่น อุตสาหกรรมการผลิตสีและหมึกพิมพ์ การผลิตแบตเตอรี่ การผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ทีวี หรือวิทยุ นอกจากนี้ปัญหาของตะกั่วเป็นพิษยังเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น ความบกพร่องในการปล่อยของเสียจากโรงงาน ทำให้ตะกั่วซึ่งสลายได้ยากมีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมทั้งใน ดิน น้ำอากาศ และอาหาร จึงเกิดการเป็นพิษของสารตะกั่ว (lead poisoning) ต่อชุมชนในบริเวณใกล้เคียง ปัญหาของพิษจากตะกั่วเข้าส่วนใหญ่มักเกิดกับ บุคคลที่ประกอบอาชีพหรือทำงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตะกั่ว โดยไม่ป้องกันตัวเอง เพราะความละเลยหรือขาดความรู้ สารตะกั่วถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ประมาณปีละ 3-4 ล้านตัน ในธรรมชาติพบสารตะกั่ว 2 ประเภท คือ

1) สารตะกั่วอนินทรีย์ (Inorganic lead) ได้แก่ lead dioxide ( $PbO_2$ ) , lead suboxide ( $Pb_2O$ ) , lead sulfate ( $PbSO_4$ ) เป็นต้น

2) สารตะกั่วอินทรีย์หรือตะกั่วที่มีคาร์บอน (Organic lead) ได้แก่ tetraethyl lead (TEL) หรือ tetra methyl lead (TML) , lead stearate และ lead acetate เป็นต้น

ซึ่งอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ตะกั่วเป็นวัตถุดิบมีจำนวนมาก อุตสาหกรรมที่ใช้ตะกั่ว เช่น อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า อุตสาหกรรมการผลิตหลอดภาพ โทรทัศน์สี และอุตสาหกรรมการผลิตตรงควัตถุ เป็นต้น

### 2.3.1 คุณสมบัติของสารตะกั่ว

ตะกั่ว (Lead) เป็นธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 82 สัญลักษณ์คือ Pb ในภาษาละตินคือ Plumbum มีมวลอะตอม 207.2 g/mol จุดหลอมเหลว 327.46°C จุดเดือด 1749°C ความหนาแน่น 11.34 g/cc ที่อุณหภูมิห้อง ตะกั่วเป็นธาตุโลหะ เนื้ออ่อนนุ่มสามารถยืดได้ เมื่อตัดใหม่ๆ จะมีสีขาวอมน้ำเงิน แต่เมื่อถูกกับอากาศสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทา

### 2.3.2 ความเป็นพิษของสารตะกั่ว

ภาวะตะกั่วเป็นพิษเป็นโรคที่พบได้บ่อยในประเทศไทย อาการของตะกั่วเป็นพิษเป็นอาการที่เกิดขึ้นกับอวัยวะหลายระบบ และคล้ายกับอาการของโรคอื่น ๆ ตะกั่วเป็นสารที่พบปนเปื้อนทั่วไป ในสมัยก่อนเด็กเป็นโรคพิษตะกั่วจากการรับประทานสีทาบ้าน หรือใช้มือจับของที่ติดสีดังกล่าว ในปัจจุบันสีทำด้วยตะกั่วน้อยลง แหล่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดพิษสำหรับผู้ใหญ่คือจากอุตสาหกรรมได้แก่ โรงงานทำ battery และโรงงานอื่นๆ ที่มีการใช้ตะกั่วอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรม electronics และ computer สำหรับประชาชนโดยทั่วไปอาจได้รับตะกั่วจากอากาศ ซึ่งมักมีตะกั่วปนเปื้อนจากการใช้ tetraethyl lead ในน้ำมันรถยนต์ นอกจากนี้ยังมีแหล่งอื่นๆ อีกจำนวนมากที่อาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะตะกั่วเป็นพิษได้แก่ หัวกระสุนตะกั่วที่ตกค้างในร่างกาย การทำงานในสนามยิงปืน ยาสมุนไพร หมึก แป้งทาตัวเด็ก ผลิตภัณฑ์จากแบตเตอรี่ เครื่องยนต์ที่ใช้ตะกั่วเป็นส่วนประกอบ เป็นต้น สารตะกั่วเป็นพิษจะพบได้บ่อยที่สุดในบรรดาโรคที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมมักจะเกิดในเด็กอายุตั้งแต่ 6 เดือน - 6 ปีโดยมักเกิดในเด็กที่พ่อแม่มีฐานะไม่ดีโดยได้สารนี้จากเศษสีที่หล่น หรือจากอากาศ น้ำ หรืออาหาร อาการเป็นพิษจะเกิดเมื่อมีการสะสมของตะกั่วในร่างกายสูงพอ ซึ่งจะมีผลเสียต่อร่างกายดังต่อไปนี้

2.3.2.1 สารตะกั่วจะมีผลเสียต่อสมองและการติดต่อของเซลล์ประสาท โดยสารตะกั่วจะไปจับกับเซลล์แทนที่แคลเซียม พบว่าหากมีสารตะกั่วในเลือดเพิ่มขึ้นทุก 10 mcg/dL จะทำให้ IQ ลดลง 1-3 จุด

2.3.2.2 ผลต่อเม็ดเลือดแดงจะทำให้เม็ดเลือดแดงแตกง่ายเป็นโรคโลหิตจางและมีผลต่อการทำงานของไต

2.3.2.3 ผลต่อการตั้งครรภ์และทารก สารตะกั่วสามารถก่อปัญหาให้แก่ทารกในครรภ์หากมีสารตะกั่วเป็นปริมาณมากอาจทำให้เกิดแท้ง คลอดก่อนกำหนด เด็กที่เกิดจะมีน้ำหนัก น้อยกว่าปกติ การทำงานของสมองจะพัฒนาช้า ปัญญาอ่อน ชัก หากตรวจเลือกคุณแม่พบว่าหากมากกว่า 20 mcg/dL จะเกิดความเสียหายต่อทารก ขนาดที่เป็นพิษ 20-25 mcg/mL นอกจากนี้ตะกั่วยังมีผลต่อการทำงานของตับ หัวใจ และเส้นเลือด และยังเป็นสารก่อมะเร็งอีกด้วย

### 2.3.3 การป้องกันความเป็นพิษของสารตะกั่ว

พบว่าเด็กอเมริกาทุก 1 คนใน 11 คนจะมีระดับสารตะกั่วในเลือดสูง ท่านผู้อ่านจะต้องเรียนรู้วิธีป้องกันสารตะกั่ว เนื่องจากสารตะกั่วสามารถมาสู่ตัวท่านโดยที่ไม่ว่าตัวเพราะสารตะกั่วมาโดยไม่มีรูรัส กลิ่น หรือเสียง สารตะกั่วสามารถป้องกันได้ดังนี้

2.3.3.1 ทำความสะอาดบ้าน ฝุ่นในบ้านอาจจะมีสารตะกั่วผสมอยู่ เด็กอาจจะกลืนโดยการดูดนิ้ว เลียของเล่นหรือรับประทานอาหารโดยที่ไม่ล้างมือ หรือสูดเอาสารตะกั่วเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.2 ยายนำสารตะกั่วเข้าบ้าน สำหรับท่านที่ทำงานก่อสร้าง การรื้อทำลาย ทาสี แบตเตอรี่ ร้านซ่อมเครื่องยนต์ ท่านอาจจะนำฝุ่นตะกั่วเข้าบ้านและอยู่ในสิ่งแวดล้อมอีกนาน

2.3.3.3 ทำน้ำดื่มให้ปราศจากสารตะกั่ว น้ำประปาทั่วไปจะไม่มีสารตะกั่ว แต่สารตะกั่ว ที่มีในน้ำประปามาจากอุปกรณ์เครื่องใช้ภายในบ้าน การต้มน้ำไม่ทำให้สารตะกั่วลดลง หากท่าน สงสัยว่าจะมีสารตะกั่วในน้ำ ท่านอาจจะนำน้ำไปตรวจวิเคราะห์เพื่อหาสารตะกั่ว ระดับตะกั่วในน้ำ จะสูงถ้าน้ำนั้นอยู่ในท่อนาน น้ำนั้นร้อน หรือมีความเป็นกรดสูง

2.3.3.4 หลีกเลี่ยงสารตะกั่ว บ้านสมัยเก่าที่ทาสีมีสารตะกั่วผสม เมื่อเก่าจะทำให้เกิด สะเก็ดสีตาม ฝาผนัง ขอบหน้าต่าง และจะพบมากบริเวณที่มีการเสียดสี เช่นหน้าต่างซึ่งจะทำให้ เกิดสะเก็ดสี หากเด็กได้รับประทานเข้าไปจะเกิดอันตรายต่อเด็กได้

2.3.3.5 ป้องกันสารตะกั่วจากการกิน อย่าเก็บอาหารไว้ในถ้วยที่มีสารตะกั่ว

2.3.3.6 เลือกใช้ถ้วยชามเซรามิก ถ้วยชามเซรามิกจะเป็นแหล่งของสารตะกั่ว ท่าน สามารถป้องกันได้

## 2.4 นิกเกิล (Ni) [8]

นิกเกิล (Nickel) เป็นธาตุในกลุ่มทรานสิชัน นิกเกิลเป็นโลหะที่มีความมันวาวสีขาว เงิน อยู่กลุ่มเดียวกับเหล็กมีความแข็งแรงแต่ตีเป็นแผ่นได้ นิยมนำมาใช้ประโยชน์ทางการผลิตโลหะต่างๆ รวมถึงใช้ ประโยชน์ในด้านเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ในอุตสาหกรรม ในธรรมชาติจะทำปฏิกิริยาเคมีกับกำมะถันเกิด เป็นแร่มีลเลอร์ไรต์ (millerite) ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีกับสารหนู (arsenic) จะเกิดเป็นแร่นิกกอลไลต์ (niccolite) แต่ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีกับทั้งสารหนูและกำมะถันจะเป็นก้อนนิกเกิลกลานซ์ (nickel glance) โดยส่วนใหญ่ นิกเกิลจะถูกใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมมากกว่า มีการค้นพบในภายหลังว่ามีประโยชน์ใน ด้านโภชนศาสตร์ แต่มีประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับแร่ธาตุอื่นๆ ในธรรมชาติพบเลขออกซิเดชันหลายค่า คือ 0, +1, +2, +3 และ +4 แต่โดยทั่วไปจะเสถียรอยู่ในรูปของประจุ +2 เป็นส่วนใหญ่

### 2.4.1 คุณสมบัติของนิกเกิล

สัญลักษณ์เคมีของ นิกเกิล คือ Ni นิกเกิล เป็นโลหะหนักมี Atomic number 28 และ Atomic weight 58.6934 g/mole จุดหลอมเหลว 1455°C จุดเดือด 2913°C ความหนาแน่น 8.908 g/cc ที่อุณหภูมิห้อง

### 2.4.2 ความเป็นพิษของนิกเกิล

ความเป็นพิษของนิกเกิลมักเกิดจากฝุ่น นิกเกิล และนิกเกิลคาร์บอนิล ที่เกิดจากกระบวนการทำ นิกเกิลบริสุทธิ์ รวมถึงนิกเกิลอิสระในรูปของประจุ +2 และสารประกอบของนิกเกิลอื่นๆ ซึ่งนิกเกิล และ สารประกอบของนิกเกิลสามารถทำให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ และสัตว์ได้

นิกเกิลอาจถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย ทางหายใจ ทางผิวหนัง และจากทางเดินอาหาร ภาวะพิษ ของนิกเกิล เกิดจากการรับสัมผัสทางการหายใจและจากอาชีพเป็นหลัก โดยความสามารถในการถูกดูดซึม ขึ้นกับความสามารถในการละลายในน้ำของสารประกอบนิกเกิล สารที่ละลายน้ำได้ดี ได้แก่ นิกเกิลคาร์ บอนิล เป็นสารประกอบที่ถูกดูดซึมได้ดีกว่าสารประกอบที่ละลายในน้ำได้ไม่ดี เช่น นิกเกิลออกไซด์และนิกเกิล ซัลไฟด์ นิกเกิลถูกกำจัดจากร่างกายทางปัสสาวะ การสัมผัสนิกเกิลคาร์บอนิลทางการหายใจจะทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่เป็นการค้า ไม่ว่าจะโดยวิธีใดก็ตาม ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาการไข้ ไอ เจ็บหน้าอก หายใจลำบาก ปวดศีรษะ หลังจากนั้น 12-36 ชั่วโมงอาจเกิดภาวะปอดอักเสบเฉียบพลัน ซึ่งอาจทำให้ผู้ป่วยเสียชีวิตจากภาวะการหายใจล้มเหลว การฟื้นตัวจากภาวะปอดอักเสบนี้ใช้เวลาหลายสัปดาห์ถึงหลายเดือน ซึ่งผู้ป่วยจะยังคงมีอาการอ่อนเพลียและเหนื่อยง่ายในระยะยาว การสัมผัสชนิดที่ผิวหนัง อาจทำให้เกิดภาวะผิวหนังอักเสบเป็นผื่นสัมผัส (Contact dermatitis) หรือเป็นผื่นแพ้ในส่วนอื่นๆของร่างกาย ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาภูมิแพ้ ผู้ป่วยที่แพ้จะเกิดผื่นได้แม้สัมผัสชนิดเพียงเล็กน้อย ผู้ที่ดื่มน้ำที่มีการปนเปื้อนชนิดเกิด อาจมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดมวนท้อง และท้องเสีย มีรายงานอุบัติการณ์ของมะเร็งในโพรงจมูก และที่ปอดเพิ่มขึ้นในกลุ่มคนงานที่รับสัมผัสชนิด

#### 2.4.3 การป้องกันความเป็นพิษของชนิด

ต้องดูแลสุขภาพแวดล้อมในการทำงาน ให้ปริมาณความเข้มข้นของชนิดในบรรยากาศไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด ดูแลสุขภาพคนงานโดยการให้ความรู้เกี่ยวกับอันตรายต่อสุขภาพของชนิด การแต่งกายและใช้อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลที่เหมาะสม จัดพื้นที่สำหรับอาบน้ำหรือชำระล้างตัวหลังจากเลิกงาน และการตรวจสุขภาพตามระยะ เช่น การตรวจผิวหนัง การตรวจโพรงจมูก การเอ็กซเรย์ทรวงอก ตรวจการทำงานของไต เมื่อคุณครอบครองเครื่องประดับที่มีส่วนผสมชนิด คุณสามารถหลีกเลี่ยงอาการแพ้ได้ โดยการนำเครื่องประดับของคุณไปชุบโรเดียม (Rhodium Plated) วิธีนี้สามารถสร้างโลหะกั้นกลางไม่ให้ผิวหนังสัมผัสชนิดโดยตรงได้ ทั้งนี้ ควรจะชุบยาเครื่องประดับทุกๆ 2-3 ปี อีกวิธีง่าย ๆ ก็คือการเคลือบโลหะที่มีส่วนผสมชนิดด้วยน้ำยาเคลือบเล็บ วิธีนี้สามารถสร้างตัวกั้นกลางชั่วคราวได้เช่นกัน และยังมีอีกวิธีที่สามารถทำเองที่บ้านได้ คือ การแช่เครื่องประดับในน้ำส้มสายชู และเปอร์ออกไซด์เดือด ด้วยวิธีนี้จะช่วยขจัดชนิดคลอไรด์ออกจากบริเวณผิวเครื่องประดับได้ แต่วิธีนี้จะคงใช้ได้จนกระทั่ง ผิวหนังสัมผัสชนิดจนเกิดการกระตุ้นทางเคมีให้ชนิดคลอไรด์สร้างตัวอีกครั้ง ฉะนั้น การป้องกันอาการแพ้ชนิดที่ดีที่สุด ก็คือการเลือกซื้อเครื่องประดับกับร้านเครื่องประดับที่ไว้วางใจได้ และได้รับมาตรฐานสากล

#### 2.5 สังกะสี (Zn) [9]

สังกะสีเป็นแร่ธาตุที่พบได้ทั่วไปบนพื้นผิวโลก มนุษย์รู้จักนำสังกะสีมาใช้ตั้งแต่สมัยหลายพันปีก่อน โดยนำมาทำเป็นสิ่งของต่างๆ เช่น หม้อใส่อาหาร เครื่องประดับ สังกะสีถูกนำมาใช้ทั้งในรูปบริสุทธิ์ และโลหะผสม คือผสมกับทองแดงได้เป็นทองเหลือง (Brass) การทำเหมืองสังกะสีมีอยู่ทั่วโลก สินแร่ที่มีสังกะสีมาก เช่น ซาเลอร์ไรต์ (Sphalerite) เมื่อถูกขุดและหลอมเสร็จแล้ว จะถูกนำมาใช้ทั้งในรูปโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสม สังกะสีเป็นโลหะสีขาวมีความวาวคล้ายเงิน แต่เมื่อถูกกับอากาศจะขุ่นมัว เพราะเกิด ออกไซด์ ที่ผิวซึ่งป้องกันไม่ให้เนื้อโลหะข้างในถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้ สมบัติ ขื่อนี้นำไปใช้ในการเคลือบเหล็ก (Iron) หรือเหล็กกล้า (Steel) เพื่อกันสนิม เรียกว่ากระบวนการเคลือบสังกะสี (Galvanization) ซึ่งอาจทำโดยการชุบโลหะลงในสังกะสีหลอมร้อนโดยตรง หรือเคลือบโดยการใช้อิทธิพลไฟฟ้า (Electroplating) ก็ได้ โลหะที่ผ่านกระบวนการเคลือบสังกะสีนี้ แล้วถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายอย่าง เช่น เป็นแผ่นสังกะสี (Galvanized sheet) ทำหลังคาบ้าน ทำเสาไฟฟ้า ทำราวจับบันได ทำรั้วบ้าน ทำถังน้ำ แม้ว่าโลหะเคลือบสังกะสีจะป้องกันการเกิดสนิมได้ดีกว่าการใช้โลหะปกติ แต่หากสัมผัสกรด เกลือ หรือถูกน้ำ ก็จะทำให้เป็นสนิมได้ง่ายขึ้น แผ่นสังกะสีทำหลังคาบ้านที่ถูกฝนกรดจึงยังคงเป็นสนิมได้ เมื่อก่อนมีการนำโลหะเคลือบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวมนิวเคลียร์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังกะสีมาใช้ทำท่อน้ำด้วย แต่เนื่องจากเกิดปัญหามีสนิมเกิดขึ้นภายในท่อ ปัจจุบันจึงเลิกการใช้ไป แต่อาจพบได้ในอาคารที่ยังใช้ท่อน้ำรุ่นเก่าอยู่

การใช้สังกะสีในด้านอื่นที่พบได้อีกคือ ใช้ในรูปโลหะทองเหลือง ซึ่งเป็นโลหะผสมที่ทนการกัดกร่อนได้ดี จึงนำมาใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องดนตรี งานศิลปะ เครื่องประดับ ก๊อกน้ำ วาล์วปิดเปิดระบบท่อต่างๆ สังกะสียังเป็นส่วนผสมในเนื้อโลหะทำเหรียญของบางประเทศ สารประกอบของสังกะสี เช่น สังกะสีออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) นำมาใช้ประโยชน์หลายอย่าง เช่น เป็นเม็ดสีสีขาวในอุตสาหกรรมสี ใช้เป็นสารตัวกลางในอุตสาหกรรมยางและพลาสติก ใช้เป็นส่วนผสมหลักของยาทาแก้คัน เรียกว่าคาลาไมน์ (Calamine) และเกิดขึ้นได้เองในกระบวนการตัดเชื่อมโลหะที่เคลือบสังกะสี สารประกอบสังกะสีอีกชนิดคือ สังกะสีคลอไรด์ (Zinc chloride; ZnCl<sub>2</sub>) ใช้ทำระเบิดควัน ใช้เป็นตัวประสาน (Flux) ในงานเชื่อมโลหะ และใช้ในการผลิตสารเคมีชนิดอื่น และเนื่องจากสังกะสีมีอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม จึงพบเป็นปริมาณน้อยๆ ได้ในอาหารแทบทุกชนิด ในน้ำดื่ม และในอากาศ สำหรับร่างกายมนุษย์เรา

สังกะสีจัดว่าเป็นแร่ธาตุจำเป็นต่อร่างกายที่ต้องได้รับในปริมาณน้อยๆ (Essential trace element) มีเอนไซม์กว่า 300 ชนิดในร่างกายที่มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบ สังกะสีมีส่วนช่วยในการเจริญเติบโต กระบวนการเผาผลาญ กระบวนการแปลรหัสพันธุกรรม ระบบภูมิคุ้มกัน และระบบสืบพันธุ์ สามารถพบสังกะสีได้ในอวัยวะต่างๆ เช่น สมอง กล้ามเนื้อ กระดูก ไต ตับ และต่อมลูกหมาก ในน้ำสุกก็มีสังกะสีอยู่มาก เนื่องจากเป็นธาตุอาหารจำเป็นจึงมีการผลิตสังกะสีเป็นอาหารเสริมด้วย วิตามินรวมแทบทุกสูตรมักจะมีสังกะสีผสมอยู่

### 2.5.1 คุณสมบัติของสังกะสี

สัญลักษณ์เคมีของ สังกะสี คือ Zn สังกะสีเป็นโลหะหนักมี Atomic number 30 และ Atomic weight 65.409 g/mole จุดหลอมเหลว 419.53°C จุดเดือด 907°C ความหนาแน่น 7.14 g/cc ที่อุณหภูมิห้อง

### 2.5.2 ความเป็นพิษสังกะสี

พิษจากการทำงานกับสังกะสีที่พบบ่อยที่สุดคือโรคไข้ฟุ้งโลหะ (Metal fume fever) หรืออาจเรียก Brass founders ague, Zinc shakes, Monday morning fever, Galvanizer's poisoning, Smelter's chill ซึ่งเกิดจากการสูดหายใจเอาฟุ้งของสังกะสีออกไซด์เข้าไปในปริมาณมาก (ฟุ้งคือของแข็งที่ลอยอยู่ในอากาศ มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน) โรคนี้สามารถเกิดจากการสูดหายใจเอาฟุ้งของออกไซด์โลหะชนิดอื่น เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ ทองแดงออกไซด์ ได้เช่นกัน แต่ก็พบว่าเกิดจากฟุ้งของสังกะสีออกไซด์บ่อยที่สุด โรคนี้มักพบในคนที่ทำงานสัมผัสฟุ้งของสังกะสีออกไซด์ที่เกิดจากความร้อนในปริมาณสูง เช่น งานเคลือบสังกะสีด้วยความร้อน เชื่อมหรือตัดโลหะเคลือบสังกะสี หรือทองเหลือง งานหลอมสังกะสีเพื่อผลิตเป็นทองเหลือง อาการที่เกิดคือ มีไข้ หนาวสั่น เหงื่อแตก หายใจขัด ไอ เจ็บหน้าอก คลื่นไส้ ลื่นมีรสโลหะ เจ็บกล้ามเนื้อ เจ็บตามข้อ ปวดศีรษะ อ่อนเพลีย และระดับเม็ดเลือดขาวนิวโทรฟิลสูงขึ้น โดยรวมอาการจะคล้ายๆ โรคไข้หวัดใหญ่ (Flu-like symptoms) อาการมักเกิดภายใน 3 – 10 ชั่วโมงหลังการสัมผัส จัดเป็นโรคที่มีอาการเบาถึงปานกลาง มักหายได้เองภายใน 24 – 48 ชั่วโมง ถ่ายภาพรังสีทรวงอกอาจพบว่าเป็นปกติ หรือพบการอักเสบเป็นปื้น (Patchy infiltration) หรือพบลักษณะน้ำเกิน (Increase เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

vascular congestion) การศึกษาข้อมูลจากศูนย์พิษแห่งหนึ่ง พบว่าอาการที่เกิดขึ้นมักเกิดในวันจันทร์ ซึ่งอาจเป็นที่มาของชื่อ Monday morning fever บางคนเชื่อว่าที่อาการมักเกิดในวันจันทร์อาจเพราะในระหว่างสัปดาห์ร่างกายมีการปรับตัวให้เกิดความทนขึ้นโดยกลไกบางอย่าง เมื่อหยุดพักความทนลดลง การทำงานในวันจันทร์ซึ่งเป็นวันแรกของสัปดาห์จึงเกิดอาการขึ้นได้บ่อยที่สุด พิษของสังกะสีคลอไรด์ เช่น การได้รับจากระเบิดควันที่ใช้ในทางทหาร จะทำให้เกิดการทำลายปอดได้มากกว่า คือระคายเคืองเยื่อปอด หลอดลมบวม ทางเดินหายใจเป็นแผล ปอดบวม น้ำปอดอักเสบจากสารเคมี และในรายที่รุนแรงอาจเกิดพังผืดในเนื้อปอด

### 2.5.3 การป้องกันความเป็นพิษของสังกะสี

การป้องกันสามารถทำได้ดังนี้

- 2.5.3.1 กรณีต้องทำงานหลอมสังกะสี หรือเชื่อมโลหะที่เคลือบสังกะสี ให้ทาระบบปิด หรือใช้เครื่องจักรแทนคนทำงานถ้าสามารถทำได้
- 2.5.3.2 จัดพื้นที่ทำงานให้เปิดโล่งอากาศถ่ายเทดี ควบคุมระดับสังกะสีในบรรยากาศที่ทำงานไม่ให้เกินค่ามาตรฐาน
- 2.5.3.3 ให้ความรู้เรื่องโรคไข้ฟุ่มโลหะกับคนทำงาน อาจให้ใช้หน้ากากกรองสารเคมีที่กันฟุ่มได้
- 2.5.3.4 ต้องเฝ้าระวังสุขภาพ ให้หมั่นสอบถามอาการไข้ หนาวสั่นหลังเลิกงานว่ามีหรือไม่ ถ้ามีต้องรีบปรับปรุงสภาพภายในโรงงาน
- 2.5.3.5 ตรวจสอบสุขภาพประจำปีควรดูระบบทางเดินหายใจเป็นหลัก เช่น ตรวจภาพรังสีทรวงอก ตรวจสมรรถภาพปอด การตรวจหวังเพื่อให้ความพร้อมในการทำงาน และค้นหาโรคอื่นๆ ที่ทำให้สมรรถภาพปอดลดลง แต่ไม่ใช่ เพื่อคัดกรองโรคไข้ฟุ่มโลหะเพราะโรคนี้อาจเกิดเร็วหายเร็ว โอกาสคัดกรองพบทำได้ยาก
- 2.5.3.6 การตรวจระดับสังกะสีในเลือดและปัสสาวะคนทำงานเพื่อหวังจะเฝ้าระวังสุขภาพไม่มีประโยชน์ ไม่แนะนำให้ทำ

## 2.6 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย [10]

การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียมีหลายวิธีและขั้นตอน ขึ้นอยู่กับสภาพของน้ำเสียและวัตถุประสงค์ในการบำบัด เช่น การบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูงให้อยู่ในระดับที่สามารถนำกลับมาดื่มได้ ต้องอาศัยขั้นตอนการบำบัดหลายขั้นตอน ตัวอย่างวิธีการบำบัดที่ใช้โดยทั่วไปมีดังนี้

- 2.6.1 การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (Precipitation)
- 2.6.2 กระบวนการแยกไฟฟ้าเมมเบรน (Electrodialysis)
- 2.6.3 การออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis)
- 2.6.4 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)
- 2.6.5 การใช้สารดูดซับ (Adsorption)
- 2.6.6 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-Exchange)
- 2.6.7 การระเหย (Evaporation)

### 2.6.1 การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (Precipitation)

เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ทำหน้าที่เปลี่ยนสภาพของสารที่ละลายอยู่ในรูปสารละลายให้เป็นสารที่ไม่ละลาย โดยอาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไป ทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มตะกอนตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลงมา การตกตะกอนทางเคมี จะมีหลายวิธีการด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนัก มีด้วยกัน 2 วิธี คือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ และการตกตะกอนซัลไฟด์

### 2.6.2 กระบวนการแยกไฟฟ้าเมมเบรน (Electrodialysis)

เป็นการแยกไอออนของสารออกจากน้ำเสียโดยใช้กระแสไฟฟ้าตรง แผ่นเมมเบรนแบบ Cation Exchange Membrane จะอนุญาตให้เฉพาะไอออนบวกผ่านได้ และเช่นเดียวกัน แผ่น Anion Exchange Membrane ยอมให้เฉพาะไอออนลบผ่านไปได้ ในการวางแผ่น เมมเบรนทั้งสองชนิดสลับกัน เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้า จะทำให้เกิดการแยก ชนิดของไอออนผ่านเมมเบรนเข้าไปในแต่ละห้อง (Cell) แต่ละห้องจะมีความเข้มข้น ของสารละลายที่เจือจาง และเข้มข้นแยกออกจากกัน ในบางระบบจะมีการสลับกระแสไฟฟ้า เป็นครั้งคราวเพื่อลดการอุดตันที่เมมเบรน

### 2.6.3 การออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis)

เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยการใช้หลักความแตกต่างของแรงดัน โดยการให้ความดันที่สูงกว่าความดันออสโมติก (osmotic pressure) ทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่จากจากสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า ผ่านเยื่อกึ่งซึมผ่านได้ (semi permeable membrane) ไปยังสารละลายที่เจือจางกว่า ซึ่งเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับของกระบวนการออสโมซิส (osmosis) ตามธรรมชาติ

### 2.6.4 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)

วิธีการนี้เป็นการแยกโลหะหนักโดยใช้กระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนที่อยู่ในรูปสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด และจะมีการเกิด ออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้จะเหมาะสมกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง

### 2.6.5 การใช้สารดูดซับ (Adsorption)

วิธีนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ(adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ(adsorbent) โดยสารที่ใช้ในการดูดซับส่วนใหญ่จะใช้ ซีโอไลต์ เนื่องจากมีคุณสมบัติการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่างรูพรุน ซึ่งสามารถเลือกดูดซับเฉพาะบางโมเลกุลที่สนใจได้

### 2.6.6 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-Exchange)

กระบวนการนี้อาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกจับโดยเรซิน การจับของสารและเรซิน เกิดขึ้นได้เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุเหมือนกันระหว่างไอออนที่อยู่ในเรซินกับไอออนที่อยู่ในสารละลาย เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและมีประสิทธิภาพสูง

### 2.6.7 การระเหย (Evaporation)

เป็นวิธีการที่ทำโดยระเหยน้ำออกทำให้ความเข้มข้นสูงขึ้น มีทั้งการระเหยที่ความดันบรรยากาศ และการระเหยใต้สุญญากาศ การระเหยนี้ได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูง เป็นวิธีที่ใช้ต้นทุนในการดำเนินงานสูง

## 2.7 กระบวนการในการดูดซับ (Adsorption) [11-13]

### 2.7.1 นิยามของการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (adsorption) เป็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารถูกดูดซับ (adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิว (surface free energy) เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

energy) ต่ำจะถูกดูดซับได้ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ กระบวนการดูดซับ เกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ ปริมาณการดูดซับขึ้นกับหลาย ปัจจัย เช่น ธรรมชาติของสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ พลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ และสภาวะการดูดซับ อาทิ อุณหภูมิ ความเข้มข้น ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับสารดูดซับ จะเป็นการดูดซับแบบระหว่างสถานะต่างๆ ทั้ง 3 สถานะ คือ ของเหลว (liquid) ก๊าซ (gas) และ ของแข็ง (solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว- ของเหลว ก๊าซ- ของเหลว ก๊าซ- ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเข้มข้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง

การดูดซับเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส (interface) โดยที่มีวฏภาคหนึ่งเป็นของแข็งเสมอ และเป็นวฏภาคคายความร้อน โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวหน้าของของแข็งของสารดูดซับ ดังนั้นการดูดซับด้วยของแข็งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของของสารดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้น เนื่องจากแรงดึงดูดที่พื้นผิวของของแข็งซึ่งเป็นสารดูดซับมีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของของเหลว นั้น การดูดซับบนผิวของแข็ง แบ่งออกได้ตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี [12]

#### 2.7.1.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) อาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อนๆ เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) หรือพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารใน ของเหลวกับของเหลว [14] ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่สารดูดซับแทน การดูดซับทางกายภาพไม่มีแรงกระตุ้น (activation energy) มาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ง่ายและการดูดซับเกิดซ้อนกันได้หลายชั้น (multilayer) โดยแต่ละชั้นจะ ซ้อนทับกันอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารและเกิดขึ้นได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำ

#### 2.7.1.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับทำ ปฏิกิริยาเคมีกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมขึ้นใหม่โดยมีพันธะเคมีที่แข็งแรง แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ มีพลังงานกระตุ้น (activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ยากและการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว

ตารางที่ 2.2 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนของการดูดซับ 50-400 kJ/mol	ค่าความร้อนของการดูดซับประมาณ 20 kJ/mol หรือน้อยกว่า
เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง	เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ
ไม่เกิดการผันกลับ	เกิดการผันกลับได้เป็นส่วนใหญ่
เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว	เกิดการดูดซับหลายชั้น
มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้อง	ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้องในกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุมัติจากทางมหาวิทยาลัย

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดที่แข็งแรง (เกิดพันธะเคมี)	แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ (แรงแวนเดอร์วาลส์)

นอกจากการแบ่งประเภทการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีแล้ว ยังอาจแบ่งประเภทการดูดซับตามกลไกเพิ่มเติมได้อีก คือ การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (exchange adsorption) เป็นการดูดซับที่อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณผิว เมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงกันข้าม และการดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (specific adsorption) เกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุล ตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวดูดซับ พฤติกรรมการดูดซับนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพ และเคมี

### 2.7.2 กลไกการดูดซับ

การดูดซับประกอบไปด้วย 3 กลไก ได้แก่ กลไกทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic mechanism) กลไกทางเคมี (Chemical) และ กลไกทางกายภาพ (Physical)

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งได้ 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกที่มีโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่พื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับดูดติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

### 2.7.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนการกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนย่อยดังนี้

2.7.3.1 การขนส่งอนุภาค (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลว จะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวหรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

2.7.3.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวแทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวถูกดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3.3 การขนส่งภายในอนุภาค (Interpartical transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัว ถูกดูดซับละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ เรียกว่า การแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

#### 2.7.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

อัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้ [17]

##### 1) การปั่นกววน (Turbulence)

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film Diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore Diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมี การปั่นกววนต่ำ ฟิล์มน้ำ ที่ล้อมรอบด้วยตัวดูดซับจะมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับในทางตรงข้าม ถ้าน้ำมีการปั่นกววนสูงทำให้น้ำไม่สามารถสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา ซึ่งเป็นผลทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

##### 2) ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวดูดซับ คือ ขนาดและพื้นที่ผิว ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับในทางลบ กล่าวคืออัตราเร็วการดูดซับเป็นอัตราส่วนที่ผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าขนาดใหญ่ ญ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) นั่นคือ ตัวดูดซับที่มี พื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

##### 3) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด- ด่าง มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด- ด่างต่ำมีปริมาณไฮโดรเนียม ไอออนมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด- ด่างสูงซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่นั้น ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ กล่าวคือในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวกตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายมีความเป็น กรด-ด่างต่ำจะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแย่งกันที่จะถูกดูดซับของตัวถูกดูดซับ เมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด- ด่างสูง เนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนมี ปริมาณน้อยลง และปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) เพิ่มขึ้น จึงลดผลในการเข้าแย่งจับหรือดูดซับกับตัวถูกดูดซับ และในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุลบก็จะให้ผลตรงข้ามในทำนองเดียวกัน

##### 4) อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับในระบบเป็นประเภทใด ถ้าเป็ นการดูดซับทางกายภาพ อุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปในทางน้อยลงหรือคงที่ ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมี อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นไปด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสที่ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับของตัวดูดซับได้มากขึ้น

##### 5) ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ

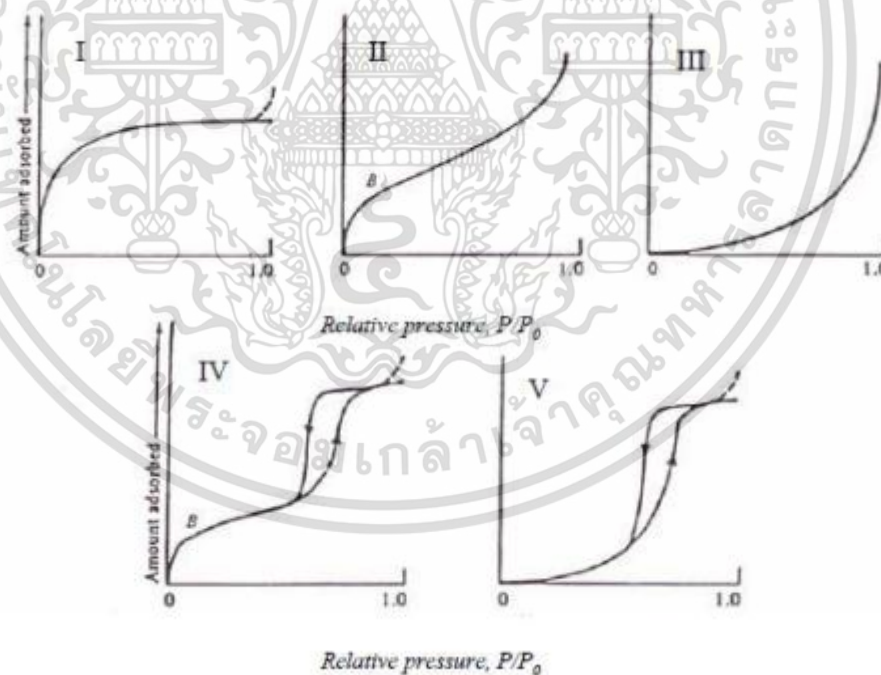
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลตัวดูดซับจะถูกดึงดูดออกจากน้ำก่อน แล้วจึงไปเกาะติดบนผิวของแข็ง สารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำอย่างเหนียวแน่นมากกว่าสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างบนไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุผลนี้ไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ ว่าความสามารถในการดูดซับ และความสามารถในการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กันอย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

#### 6) ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของสาร ที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เช่น การดูดซับกรดอินทรีย์ โดย ถ่านกัมมันต์ จะพบว่า ถ่านกัมมันต์ดูดซับกรดฟอร์มิก กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และ กรดบิวเทอริกได้มากขึ้นตามลำดับของขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อการละลายด้วย โดยสารอินทรีย์ มีโครงสร้างที่ยาว มักจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้ลดลง จึงส่งผลให้เกิดการดูดซับโดยตัวดูดซับมากขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนมาก สารที่มีโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนมักจะถูกดูดซับได้ดีมากกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากสารโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้ารูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่จะดูดซับมีอยู่น้อย เนื่องจาก พื้นที่ผิวภายนอกเป็นรูพรุน

### 2.7.5 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) [11]



ภาพที่ 2.1 ประเภทไอโซเทอมการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแต่ละประเภทอธิบายได้ดังนี้

แบบ I

เป็นไอโซเทอมของการดูดซับลักษณะเฉพาะของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า 2 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(microporous adsorbent) การดูดซับส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก ลักษณะไอโซเทอมจะเป็นโค้งเข้า (concave) หากแกน P/P0 สารดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก สารดูดซับมีพื้นที่ผิวภายใน นอกร้อย ดังนั้นการดูดซับจะถูกจำกัดเนื่องจากไม่สามารถเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ การบรรจุโมเลกุลลงในรูพรุนขนาดเล็กของสารดูดซับนี้ได้อย่างสมบูรณ์และมีการอิ่มตัวที่แน่นอนโดยเกิดการเรียงเป็นชั้นเดียว ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Langmuir หรือ L-shape isotherm

#### แบบ II

เป็นรูปแบบปกติของไอโซเทอมที่เกิดในสารดูดซับที่ไม่มีรูพรุน (nonporous) หรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (microporous) โดยในแบบนี้จะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) อย่างสมบูรณ์ก่อนจึงเกิดเป็นหลายชั้น (multilayer) ในต่อมาจากไอโซเทอมตรงบริเวณจุดเปลี่ยนโค้งหรือจุด B (break through) จะแสดงถึงการดูดซับแบบขั้นเดี่ยวนั้นเสร็จสมบูรณ์จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Sigmoid หรือ S-shape isotherm

#### แบบ III

เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วย กันมีค่อนข้างมาก จากกรณีนี้จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ ในแบบที่ III จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบ II ซึ่งเส้นกราฟจะโค้งออก (convex) จากแกน P/P0 จำนวนสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างไม่จำกัด ซึ่งเป็นแบบพิเศษ

#### แบบ IV

เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer) ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าเติมในรูพรุนอีกครั้ง และการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่นภายในรูพรุนของของแข็ง (Capillary Condensation in Pores) โดยลักษณะของกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับชนิดที่ 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้ง จะแสดงถึงการดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์

#### แบบ V

เป็นไอโซเทอมรูปแบบพิเศษ มีความคล้ายกับแบบ III เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีค่าน้อย ซึ่งจะพบในสารดูดซับที่มีขนาดรูพรุนในช่วงเดียวกับไอโซเทอมแบบ IV สำหรับไอโซเทอมแบบ III และแบบ V นี้จะคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยาก เนื่องจากชั้นการดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์

## 2.8 เทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์โลหะฟอสเฟต

เทคนิคการเตรียมสารโลหะฟอสเฟตมีหลายวิธี ตัวอย่างเช่น หลักการเตรียมแบบตกตะกอน (Precipitation method) วิธีการเตรียมแบบไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal method) วิธีการเตรียมแบบโซล - เจล (Sol-gel method) วิธีการเตรียมด้วยตัวกลาง (Media method) วิธีการเตรียมแบบตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method) วิธีการเตรียมโซลโวเทอร์มัล (Solvothermal method) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และวิธีเตรียมไมโครเวฟ (Microwave) เป็นต้น จากหลักการเตรียมที่แตกต่างกัน จะก่อให้เกิด คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารที่ต้องการตัวหนึ่งๆ มีความแตกต่างกันและยังพบอีกว่าสถานะตัวแปรการเตรียม เช่น อุณหภูมิ เวลา ความเป็น กรด - เบส และสารตั้งต้นจะแตกต่างกันขึ้นกับวิธีการเตรียมโดยเทคนิคที่ใช้สังเคราะห์โลหะฟอสเฟตแต่ละวิธีมีดังต่อไปนี้

### 2.8.1 การเตรียมแบบตกตะกอน [18]

การตกตะกอน (Precipitation) เป็นการแยกตะกอนแขวนลอยออกจากของเหลวเพื่อให้ได้ส่วนของชั้นใส (Clear fluid) และชั้นของ slurry ที่มีความเข้มข้นของตะกอนสูง การเตรียมแบบตกตะกอนถือเป็นกระบวนการเตรียมที่ง่าย สะดวกรวดเร็วคือทำการเตรียมสารตั้งต้นให้ปฏิกิริยาละลายความเข้มข้นตามที่ต้องการ จากนั้นเตรียมสารที่สามารถทำให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งตัวทำให้เกิดตะกอนส่วนมากจะเป็นสารที่เป็นกรดแก่หรือเบสแก่ โดยส่วนใหญ่สารโลหะฟอสเฟตจะตกตะกอนในสภาวะความเป็นกรดหรือเบสที่แตกต่างกัน เช่นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Amorphous  $AlPO_4$  ในอัตราส่วนโดยโมล  $AVP = 1$  จากระบบสารตั้งต้น  $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$  ผสมกับ  $H_3PO_4$  ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิ  $0^\circ C$  แล้วปรับค่าความเป็นกรดต่างด้วยสารละลายแอมโมเนียให้มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 จากนั้นทำการกรอง และล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน ทำตะกอนให้แห้งที่ อุณหภูมิ  $110^\circ C$  เป็นเวลาหนึ่งคืน และทำการเผาที่อุณหภูมิ  $650^\circ C$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

### 2.8.2 วิธีการเตรียมแบบไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal method) [19]

หลักการ คือ การผสมสารตั้งต้นที่ประกอบด้วยโลหะซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารโลหะออกไซด์ (Metal oxide) สารแหล่งของฟอสฟอรัส ได้แก่  $Na_2HPO_4$ ,  $H_3PO_4$ ,  $KH_2PO_4$ ,  $K_2HPO_4$ ,  $(NH_4)_2HPO_4$  และสารสุดท้ายคือน้ำ โดยผสมตามสัดส่วนโมลของสารขึ้นอยู่กับสารโลหะฟอสเฟตที่ต้องการ จากนั้นบรรจุในอุปกรณ์ที่ปิดสนิท และนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมพร้อมกำหนดระยะเวลา เช่น การสังเคราะห์  $AlPO_4$  ที่มาจาก อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

### 2.8.3 วิธีการเตรียมแบบโซล-เจล (Sol-gel) [20]

กระบวนการเตรียมแบบโซล - เจล เป็นกระบวนการเตรียมเชิงเคมีประเภทหนึ่งที่ได้ได้รับความนิยมสูงเนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงและนอกจากนี้ยังสามารถนำไปดัดแปลง ประยุกต์ใช้งานในการผลิตวัสดุได้หลายรูปแบบ เช่น การผลิตสารเร่งปฏิกิริยา (Catalysts) ตัวดูดซับ (Adsorbent) แผ่นฟิล์มบาง (Thin film) การฉาบผิววัสดุ (Coating) เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (Nuclear fuel) แผ่นกรองและเส้นใยเซรามิกแก้วชนิดพิเศษ ผงขัดและวัสดุชีวภาพ (Biomaterial) ต่างๆ คำว่า “โซล - เจล” คือ เป็นเทอมที่มีลักษณะเฉพาะตัวและเกี่ยวข้องกับเทคนิคต่างๆ มากมายที่สามารถนำมาใช้เพื่อเตรียมสารที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุล โดยทั่วไปกระบวนการ “โซล - เจล” คือกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวที่ เรียกว่า “โซล” ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของอนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยอย่างคงตัวในของเหลว โดยที่โซลจะมีความหนาแน่นของของแข็งมากกว่าของของเหลวที่อยู่บริเวณรอบๆ อนุภาคของแข็งที่อยู่ในของเหลวที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอนไปเป็นสารที่จับตัวกันแข็งเป็นก้อนมีความ หนืดสูง เป็นอนุภาคของแข็งที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนเชื่อมต่อกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามมิติ ซึ่งเรียกว่า “เจล” ปฏิกริยาที่สำคัญในกระบวนการโซล - เจล มี 3 ปฏิกริยา คือ Hydrolysis, Water Condensation และ Alcohol condensation มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกริยา คือ ความเป็นกรดต่าง ตัวเร่งปฏิกริยา อัตราส่วนโมลของน้ำกับโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ในสภาวะที่ต่างกันจะทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติโครงสร้างต่างกัน ข้อดีของเทคนิค โซล - เจล คือ มีการรวมตัวกันของทุกโมเลกุลเป็นเนื้อเดียวกัน สารประกอบที่ได้จะมี ความบริสุทธิ์สูง อนุภาคขนาดเล็ก ละเอียดมากอยู่ในช่วง 20 ถึง 50 นาโนเมตรส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมาก การเผาผลึกเพื่อให้เกิดการจับตัวแน่น ทำให้อุณหภูมิสูง

#### 2.8.4 วิธีการเตรียมแบบใช้สภาวะตัวกลาง (Media synthetic method)

การเตรียมแบบนี้ส่วนใหญ่จะใช้สารตั้งต้นผสมกันใน ตัวกลางที่ไม่ใช้น้ำแต่อาจจะเป็นสารประเภท แอลกอฮอล์ สารพอลิเมอร์หรือสารโปรตีน เป็นต้น เมื่อผสมแล้วทำให้ตกตะกอนโดยใช้สภาวะอุณหภูมิหรือ สภาวะความเป็นกรดหรือเบส ก็จะได้สารโลหะฟอสเฟตที่ต้องการ

#### 2.8.5 วิธีการเตรียมแบบการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method)[21]

เทคนิคการเตรียมแบบการตกตะกอนร่วมคือกระบวนการที่จะนำสารโลหะมากกว่าสองชนิดเข้าไป อยู่ในตำแหน่งแลตทิซภายในโครงสร้างโลหะฟอสเฟตทำให้เกิดสารประกอบตัวใหม่ ที่เรียกว่าทวิโลหะ ฟอสเฟต (Binary metal phosphates) ซึ่งหลักการจะคล้ายกับวิธีการตกตะกอนแบบธรรมดา คือ เตรียม สารละลายโลหะสองชนิดแล้วนำไปผสมกับแหล่งของฟอสฟอรัส พร้อมกับปรับความเป็นกรดหรือเบสให้ เหมาะสม เพื่อทำให้เกิดตะกอน เช่น การเตรียมตัวเร่ง  $\text{Ni}/\text{AlPO}_4$  โดยทำให้  $\text{AlPO}_4$  gel ชุ่มด้วย นิกเกิลไน เตรท แล้วทำการเผา (Calcined) ที่อุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสม

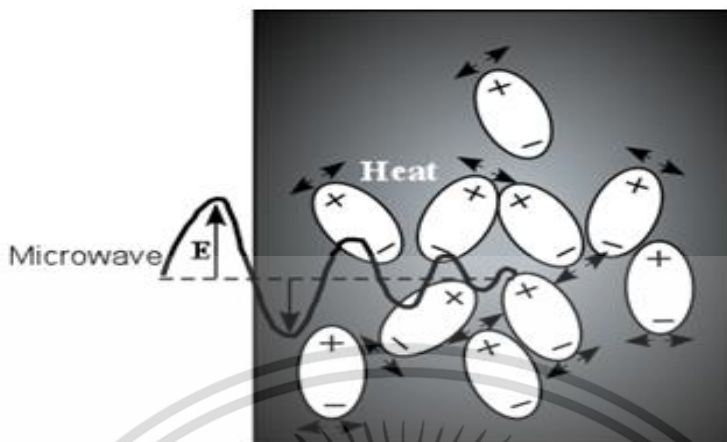
#### 2.8.6 วิธีการเตรียมโดยใช้โซลโวเทอร์มัล (Solvothermal method)

วิธีโซลโวเทอร์มัล คือการเตรียมสารโลหะฟอสเฟตโดยอาศัยการเกิดปฏิกริยาในผลึกของสารอินทรีย์ และใช้ตัวทำละลายที่เป็นสารอินทรีย์เป็นตัวเร่งปฏิกริยาภายใต้สภาวะอุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่ต่ำ ใช้ ความดันในการสังเคราะห์สูง ซึ่งปฏิกริยานี้สามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกริยาที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจาก การใช้ความดันสูงในการทดลองจึงจำเป็นต้องทำการสังเคราะห์ในหม้อความดันนี้ (Autoclave) ทำด้วย เหล็กกล้าที่มีความแข็งแรง ทนทานและสามารถทนอุณหภูมิได้สูงโดยปกติแล้วจะมีการบุผนังภายในของ หม้อด้วยเทฟลอน (Teflon) อีกทีเพื่อลดปัญหาเรื่องการกัดกร่อนของผนังหม้อความดันจากสารละลาย ซึ่ง ผลที่ได้มีความเป็นผลึกสูง มีรูปร่างเหมือนกันและมีการกระจายตัวใกล้เคียงกัน

#### 2.8.7 วิธีการเตรียมโดยไมโครเวฟ (Microwave method)[22]

กระบวนการเตรียมโดยไมโครเวฟ เป็นกระบวนการที่จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นโดยการใช้คลื่น ไมโครเวฟที่มีความถี่สูง สอดคล้องกับ ภาพที่ 2.2 ซึ่งแสดงแบบจำลองการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแล้วเกิด เป็นความร้อนขึ้นของวัสดุ ไดอิเล็กตริกโดยโมเลกุลไดโพลจะถูกบังคับให้หมุนภายใต้สนามไฟฟ้าที่ เปลี่ยนแปลงตามเวลาของคลื่นไมโครเวฟ การชนกัน ระหว่างโมเลกุลขณะหมุนทำให้เกิดแรงเสียดทานและ เกิดเป็นความร้อนขึ้น เพื่อทำให้โมเลกุลของน้ำภายในชิ้นงานเกิดการสั่นสะเทือนและชนโม เลกุลอื่นต่อ จน

เกิดเป็นพลังงานจลน์ ซึ่งพลังงานจลน์นี้จะกลายเป็นพลังงานความร้อน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 2.2 แบบจำลองการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแล้วเกิดเป็นความร้อนของวัสดุ[22]

คลื่นไมโครเวฟมีลักษณะเด่น 3 ประการคือ

- 1) การสะท้อนกลับ (Reflection) เมื่อคลื่นไมโครเวฟไปกระทบกับวัตถุที่เป็นโลหะ หรือมีส่วนผสมของโลหะคลื่นไม่สามารถทะลุผ่านวัตถุดังกล่าวได้ และจะเกิดการสะท้อนกลับหมดทำให้ไม่สามารถให้ความร้อนแก่วัตถุได้
- 2) การส่งผ่าน (Transmission) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านภาชนะที่ทำด้วยแก้ว กระจก ไม้ เซรามิก และพลาสติกได้ เพราะวัตถุดังกล่าวไม่มีส่วนผสมของโลหะ จึงเหมาะสำหรับการใช้งานไมโครเวฟ
- 3) การดูดซึม (Absorption) ส่วนใหญ่วัตถุที่ต้องการให้ความร้อนจะประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำเมื่อโมเลกุลของน้ำดูดซึมคลื่นไมโครเวฟแล้วจะสลายตัวทันทีและไม่สะสมภายในของวัตถุ

## 2.9 การตรวจสอบเอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์อะลูมิเนียมฟอสเฟต

### 2.9.1 เครื่องตรวจวัดสเปกโทรสโกปี การสั่นแบบอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared, FT-IR) [23]

เครื่องตรวจวัดสเปกโทรสโกปี การสั่นแบบอินฟราเรด เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพอลิเมอร์ในโมเลกุลรวมถึงสามารถบอกปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมด้วย งานที่ไม่ทราบชนิดซึ่งเทคนิค FT-IR นี้มีความไวสูงใช้เวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่น ๆ โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรดที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) อินฟราเรเดียนไกล(Near Infrared) มีเลขคลื่นอยู่ในช่วง  $12800-4000 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งใน แถบการดูดกลืนแสงของโมเลกุลในย่านนี้ส่วนใหญ่เกิดจากโอเวอร์โทน (Overtone)

2) อินฟราเรเดียนกลาง (Middle infrared) มีเลขคลื่นอยู่ในช่วง  $4000-200 \text{ cm}^{-1}$  ใช้ศึกษาคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์ในช่วงนี้จะเป็นช่วงกลุ่มความถี่ที่ใหญ่ของโมเลกุล

3) อินฟราเรเดียนไกล (Far infrared) มีเลขคลื่นอยู่ในช่วง  $200-10 \text{ cm}^{-1}$  จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับการหมุนของโมเลกุลเนื่องจากพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการทรานสิชันที่มีระดับพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อพิจารณาโมเลกุลของสารโดยทั่วไปจะประกอบด้ว อะตอมที่ยึดเกาะกันดี วัยพันธะ เคมีเมื่อโมเลกุลได้ รับรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับการสั่นของโมเลกุลแล้ว จะทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลง โดโพลโมเมนต์ ทำให้โมเลกุลนั้นสามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้โดยการสั่นของ โมเลกุล แบบ 2 ประเภท คือ การยืดหด (Stretching) การโค้งงอ (Bending หรือ Deformation)

#### องค์ประกอบของเครื่อง FT-IR



ภาพที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบของเครื่อง FT-IR

1. แหล่งกำเนิด Laser เพื่อใช้แสง Laser ในการปรับระยะของ Mobile Mirror
2. Mobile Mirror เป็นกระจกเงาที่สามารถสะท้อน รังสีอินฟราเรดและสามารถที่จะเคลื่อนที่ได้
3. Fixed Mirror เป็นกระจกเงาที่สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรดเช่นเดียวกับ Mobile Mirror แต่ไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ได้
4. Beam Splitter เป็นส่วนที่จะทำการแยกอินฟราเรดที่ผ่านเข้ามาให้เป็นสองส่วนคือ สามารถให้แสงทะลุผ่านได้ 50 % และจะสะท้อนกลับ 50 %
5. เป็นกระจกเงาที่สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรดใช้ในการบังคับทิศทางการเดินทางของรังสีอินฟราเรด ให้ไปตามทิศทางที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. Sample Compartment เป็นส่วนที่จะใช้ในการบรรจุ Sample เข้าไปเพื่อการวิเคราะห์

7. Detector ใช้วัดความเข้มแสงที่เหลือจากการดูดกลืนของตัวอย่าง

### การทำงานของเครื่อง FT-IR

1. แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดจะทำการผลิตรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น หรือเลขคลื่นที่จะใช้ในการวิเคราะห์

2. Beam Splitter ซึ่ง Beam Splitter จะปล่อยให้ทะลุผ่านไปที่ Fixed Mirror 50% และสะท้อน กลับมาที่ Mobile Mirror 50%

3. Fixed Mirror จะสะท้อนกลับมาที่ Beam Splitter

4. Mobile Mirror จะสะท้อนกลับมาที่ Beam Splitter

5. อินฟราเรดที่สะท้อนมาจาก ทั้ง Mobile Mirror และ Fixed Mirror จะมา รวมกันและเกิดการแทรกสอดกันขึ้น แต่จากการที่ Mobile Mirror สามารถเคลื่อนที่ได้โดยการ ควบคุมระยะการเคลื่อนที่ โดย Laser เมื่อ Mobile Mirror เคลื่อนที่ก็จะทำให้ระยะทางการ สะท้อนกลับของ รังสีอินฟราเรด ของ Mobile Mirror และ Fixed Mirror ไม่เท่ากันซึ่งก็จะส่งผล ให้ รังสีอินฟราเรดที่ได้มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไป อันเกิดจาก การแทรกสอด แบบเสริมกัน หรือ หักล้างกัน เรียกว่า Interferogram

6. อินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่างๆ จะสะท้อนไปที่ Sample Compartment ผ่าน Sample ซึ่งจะมีการดูดกลืนอินฟราเรด เอาไว้บางส่วนในบางความยาวคลื่น ส่วน อินฟรา เรดที่ไม่ถูกดูดกลืนก็จะผ่าน เข้าสู่ Detector สัญญาณที่ได้คอมพิวเตอร์จะทำการแปลง สัญญาณ Interferogram ด้วยสมการ Fourier transform ผลที่ได้จะเป็นสเปกตรัม การ ดูดกลืนแสงอินฟราเรดของสารที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

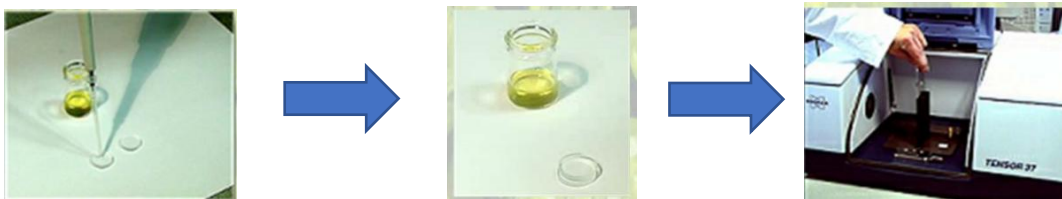
### การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค Infrared Spectroscopy

การวิเคราะห์ตัวอย่างชนิดต่าง ๆ ด้วยเทคนิค Infrared Spectroscopy นั้นมีหลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและคุณสมบัติทางกายภาพของสารตัวอย่าง ซึ่งวิธีดังกล่าวได้แก่

- การวัดสเปกตรัมโดยใช้การ Transmission กระบวนการดังกล่าวนี้จะใช้สำหรับการเตรียม ตัวอย่างก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์หา IR spectrum ด้วยการ Transmission ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กัน อยู่ในปัจจุบันได้แก่

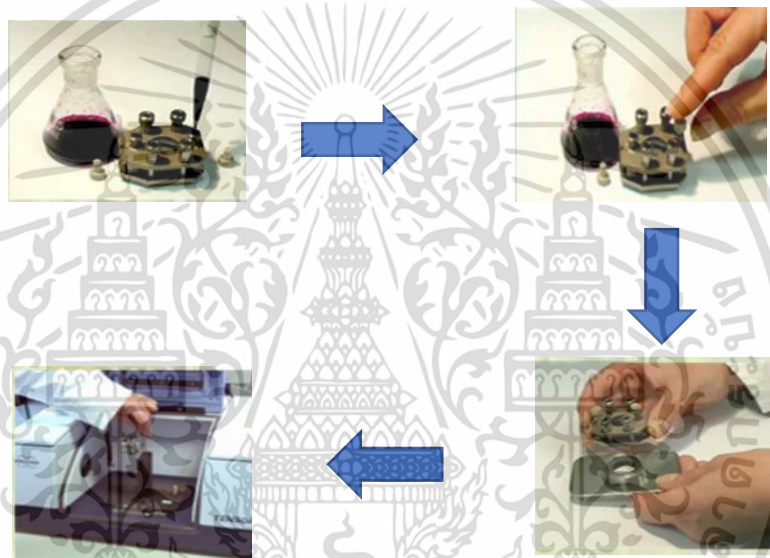
ตัวอย่างเป็นของเหลว :สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

- 1) ทำการหยดตัวอย่างจำนวน 1 หยด บน KBr cell แล้วใช้ KBr cell อีก 1 ชั้นประกบทับ แล้วนำไปใส่ในช่อง cell เพื่อทำการวัด



ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างของเหลว

2) ทำการเติมตัวอย่างลงไป ใน liquid cell แล้วนำไปใส่ในช่อง cell เพื่อทำการวัด

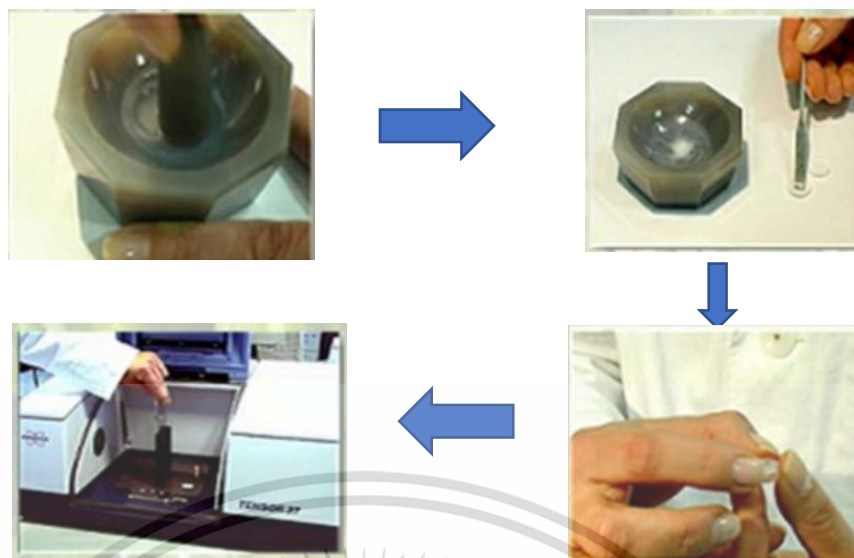


ภาพที่ 2.5 การวัดของเหลวบนเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

ตัวอย่างเป็นผงละเอียด : สามารถทำได้ 2 วิธีคือ

1) ตัวอย่างสามารถละลายในตัวทำละลายได้หมด : ให้นำตัวอย่างไปละลายในตัวทำละลายแล้วทำการวัดเหมือนกับการวัดตัวอย่างที่เป็นของเหลว

2) ตัวอย่างที่ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายได้ : ให้นำตัวอย่างไปละลายใน Nujol แล้ว นำตัวอย่างที่ได้ไปป้ายบน Cell หลังจากนั้นทำการวัดต่อไป ซึ่งแสดงได้ดังภาพ



ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างที่ไม่สามารถละลายได้

#### ตัวอย่างเป็นของแข็ง

สามารถเตรียมตัวอย่างโดยการนำตัวอย่างไปบดผสมกับ KBr (ควรใช้ตัวอย่าง ปริมาณ 1-5%) เมื่อตัวอย่างถูกบดผสมเข้ากับ KBr แล้วให้นำไปใส่ในเบ้าเพื่อที่จะนำไปอัดให้เป็นแผ่น หลังจากที่ได้ตัวอย่างเป็นแผ่นแล้วก็นำไปใส่ในช่องใส่ตัวอย่างแล้วทำการวัดต่อไป

#### ข้อดีของ FT-IR

- ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วและมีความไวสูง
- มีอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio : s/n) ต่ำ อัตรา s/n จะแปรผันกับรากที่สองของปริมาณสัญญาณที่ตรวจวัดได้ทั้งหมด
- ความไวของเครื่องตรวจวัดสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการเพิ่ม s/n ร่วมกับการเพิ่มจำนวนรอบของสแกน มีการใช้ circular optical aperture แทนที่ entrance slit ทำให้ลำรังสีมีขนาดมากกว่า แบบ Dispersive ถึง 75-100 เท่า
- มีกำลังแสงสูง เหมาะสำหรับตัวอย่างหรือเทคนิคบางเทคนิคที่มีข้อจำกัดของกำลังแสง
- นอกจากนี้ FTIR ยังให้ประสิทธิภาพในการแยกสูงรวมทั้งมีความถูกต้องไม่ต่ำกว่า  $0.01 \text{ cm}^{-1}$  มีกลไกทำงานที่ง่าย

#### ข้อจำกัดของ FT-IR

ในการเตรียมตัวอย่างบางเทคนิคที่ต้องใช้สารละลายที่ยินยอมให้รังสีทะลุผ่านและ ตัวอย่างจะต้อง active ในช่วงอินฟราเรด และ เครื่องมือที่ใช้มีราคาค่อนข้างสูงและมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง

### 2.9.2 เครื่องวิเคราะห์ความเป็นผลึกของ ตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) [24]

เป็นวิธีการวิเคราะห์วัสดุพื้นฐานแบบไม่ ทำลายสารตัวอย่าง (nondestructive analysis) โดยจะให้ผลการวิเคราะห์ เกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (crystal structure) การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆและองค์ ประกอบทางแร่ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(quantitative) ซึ่งอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์และความรู้เกี่ยวกับระบบโครงสร้างผลึก (crystallography)

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีค่าความยาว คลื่นอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 10 นาโนเมตรเมื่อรังสีเอ็กซ์เกิดอันตรกิริยากับสสารจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การเปล่งแสง การดูดกลืนการกระเจิงแสงหรือการเลี้ยวเบน ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้มีลักษณะเฉพาะที่ขึ้นอยู่กับสารตัวอย่างแต่ ละชนิดเนื่องจากของแข็งที่ผลึกจะมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบในสามมิติและมีหลายชุดระนาบเมื่อรังสีเอ็กซ์ มาตกกระทบบนผิวของชุดระนาบต่างๆ ด้วยมุมที่เหมาะสมจะทำให้พฤติกรรมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ขึ้นกับความเข้ม(Intensity, I) ของรังสีเอ็กซ์ขึ้นกับกระแสไฟฟ้ที่ไซ (Current, i) ความต่างศักย์ (Voltage, V) และเลขอะตอมของธาตุที่เป็นเป้า (Z) ตัวแปรทั้งหมดมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$I = kiZV^2 \quad \dots\text{สมการที่ 2.3}$$

ส่วนความถี่ของรังสีเอ็กซ์แบบเฉพาะจะเป็นฟังก์ชันกับเลขอะตอมตามกฎของมอสลีย์ (Moseley's Law)

$$U = k(z-1) \quad \dots\text{สมการที่ 2.4}$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แบ่งออกเป็นสองชนิดคือสำหรับตัวอย่างที่เป็นผง (Powder X-ray Diffraction) และสำหรับตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single-Crystal X-ray Diffraction)

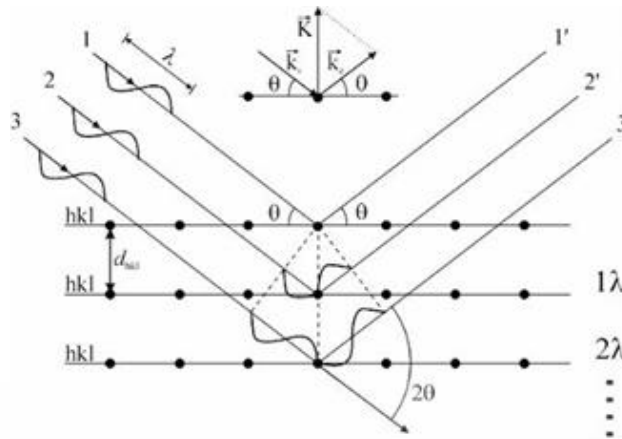
#### 1) Powder X-ray Diffraction

ซึ่งสามารถวิเคราะห์ชนิดของวัสดุได้ เนื่องจากการเกิดรังสีเอ็กซ์ Diffraction จะให้สเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุสามารถบอกวิภูภาคเชิงผลึกของวัสดุได้มีความเป็นผลึก หรืออสัณฐาน เทคนิคนี้มีประโยชน์ ในการวิเคราะห์ ลักษณะของตัวเร งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ เพราะสามารถบอกชนิดของสารที่อยู่ในตัวเร งปฏิกิริยา รวมทั้งวิภูภาคของวัสดุได้

#### 2) Single-Crystal X-ray Diffraction หรือ X-ray Crystallography

สามารถหาโครงสร้างของโมเลกุลได้ คือ สามารถบอกการจัดเรียงตัวของอะตอม ความยาวพันธะมุม ระหว่างอะตอมในโมเลกุลได้ เนื่องจากวัสดุตัวอย่าง สำหรับเทคนิคนี้ต้องเป็นผลึกเดี่ยว ดังนั้น ขั้นตอนการตกผลึกจึงมีความสำคัญมากในการศึกษาตัวเร งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้นขนาดความยาว

คลื่นของรังสีเอ็กซ์ อยู่ในช่วงเดียวกับระยะห วาระหว างอะตอมในผลึกของของแข็ง ซึ่งทำให้ รังสีเอ็กซ์สามารถเกิดการเลี้ยวเบนได้ดังแสดงในภาพ



ภาพที่ 2.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดจากการกระเจิงและแทรกสอดของรังสี

### หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เมื่อรังสีเอ็กซ์ ตกกระทบผิวหน้า  $n$  ของผลึกโดยทำมุม  $\theta$  บางส่วนของรังสีเอ็กซ์ จะเกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า  $n$  อีกส่วนหนึ่งของรังสีเอ็กซ์ จะผ่านไปยังชั้นที่  $2$  ของ อะตอม ซึ่งบางส่วนก็เกิดการกระเจิง และส่วนที่เหลือก็ผ่านเขาไปยังชั้นที่  $3$  ของอะตอม ดังแสดง ในรูป ด้านบน ถ้าอะตอมในผลึกมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและมีระยะห่างระหว่างอะตอม เท่าๆ กัน ลำรังสีเอ็กซ์ ที่ผ่านเขาไปในแต่ละชั้นของอะตอมจะเกิดการเลี้ยวเบนเป็นลำขนานกัน การเลี้ยวเบนนี้มีลักษณะคล้ายกับการเลี้ยวเบนด้วยเกรตติงแบบสะท้อน (reflection grating) ในการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ขึ้นอยู่กับภาวะ 2 ประการ คือ

- 1) รังสีที่ตกกระทบ รังสีที่เลี้ยวเบน และเส้นตั้งฉากกับผิวหน้าจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน
- 2) ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอม ควรมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์กับระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึกและมุมตกกระทบ สามารถอธิบายโดยไซกกฎของแบรกก (Bragg's law) ดังสมการ

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

...สมการที่ 2.5

โดย  $n$  คือ อันดับของการสะท้อน

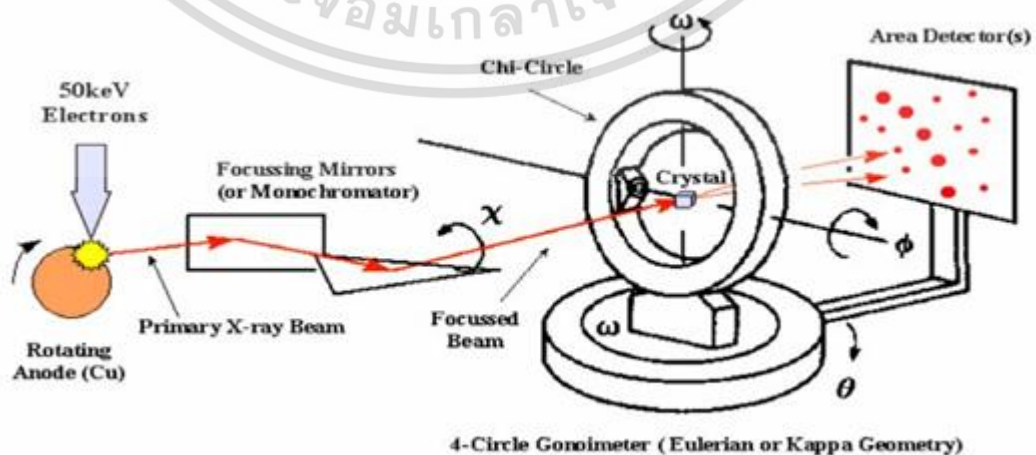
$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีที่ใช่

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

$\theta$  คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบผลึก

โดยทั่วไปผลึกของวัสดุในธรรมชาติมีโครงสร้าง ที่แน่นอน ถ้ามองลึกเข้าไปถึงระดับอะตอมผลึก ประกอบด้วยอะตอมและกลุ่มอะตอมที่จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมีมุมและระยะห่างระหว่างอะตอมที่แน่นอนและซ้ำ กันในทุกทิศทางในการศึกษาโครงสร้างผลึกจะศึกษารูปแบบของโครงตาข่าย (lattice) ที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปทรงทางเรขาคณิตที่แน่นอน ซึ่งต้องอาศัยหลักความสมมาตรกัน ในการศึกษาผลึกแบรกก อธิบายว่า ผลึกประกอบด้วยโครงตาข่ายที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในลักษณะที่เป็ นกลุ่ม ของระนาบที่ขนานกัน เมื่อรังสีของคลื่นตกกระทบผลึกที่กลุ่ มของระนาบที่ขนานกันภายในผลึก แต่ ระนาบสะท้อนรังสีตกกระทบ บางส่วนออกมาในลักษณะคล้ายกับกระจกเงาแนวรังสีสะท้อน จะพบได้เมื่อรังสีสะท้อนจากกลุ่มระนาบ ที่ขนานกันแทรกสอดกันแบบเสริม ดังที่กล าวมาแล้วข้างต้น พลังงานรังสีเอ็กซ์ ที่สะท้อนออกมามีค่าเท่ากับ พลังงานรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ เครื่องมือที่วัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ คือ เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) มีหลักการทำงานคือ เมื่อปล่อยกระแสเขาไปยัง ขั้วแคโทด ซึ่งเป็นเส้นลวดให้ความร้อน เพื่อให้ไฮโดรเจนหรือมีพลังงานสูงพอ ทำให้ อิเล็กตรอนพลังงานสูงหลุดออกมาจากขั้วแคโทดและพุ่งเข้าชนแอนโนด ซึ่งเป็น โลหะที่นำความร้อนได้ดี (โลหะที่นิยมใช้ เป็นขั้วแอนโนด คือ ทองแดงและโมลิบดีนัม โดยหลอดที่ใส่ทองแดงจะเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมกับผลึกขนาดเล็กหรือมีขนาดหน่วยเซลล์ใหญ่ ส่วนโมลิบดีนัมเหมาะ สำหรับผลึกขนาดใหญ่ หรือผลึกที่มีการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ได้ดี ) จึงทำให้ อิเล็กตรอนวงในหลุดออกมาเมื่ออิเล็กตรอนชั้นอื่น เข้าไปแทนที่ออร์ บิทัลที่ว่าง แอนโนดจะคายพลังงานออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์ และความรอน จะต้องมึ่น้ำหล่อเย็น โดยทั่วไปรังสีเอ็กซ์ จะเกิดขึ้นโดยปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ของพลังงานที่คายออกมาทั้งหมด รังสีเอ็กซ์ ที่คายออกมามีทั้งรังสีเอ็กซ์ แบบเฉพาะตัว (characteristic) ที่เป็น  $K\alpha$  และ  $K\beta$  จากนั้นจึงใช้แผ่นกรองแสงซึ่งเป็นตัวดูดกลืนความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการกำจัดเอาฟิคของ  $K\beta$  ออกไป เพื่อให้เหลือรังสีเอ็กซ์ ที่มีการเลี้ยวเบนจะถูกตรวจวัดโดยดีเทคเตอร์ (detector) ซึ่งสามารถวัดรังสีกระเจิงได้ ณ มุมต่างๆ ทำให้หาค่า  $2\theta$  ได้ ข้อมูลที่บันทึกผลออกมา แสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง ค่าความเข้ม (intensity) และค่า มุม  $2\theta$  โดยสารแต่ละชนิดจะให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกันไป โดยสามารถทำการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้ โดยการนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูล มาตรฐานที่อยู่ในแฟมข้อมูล Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDS)



เอกสารนี้เป็นเอกสาร ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง XRD (X-ray diffractometer)[23] การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

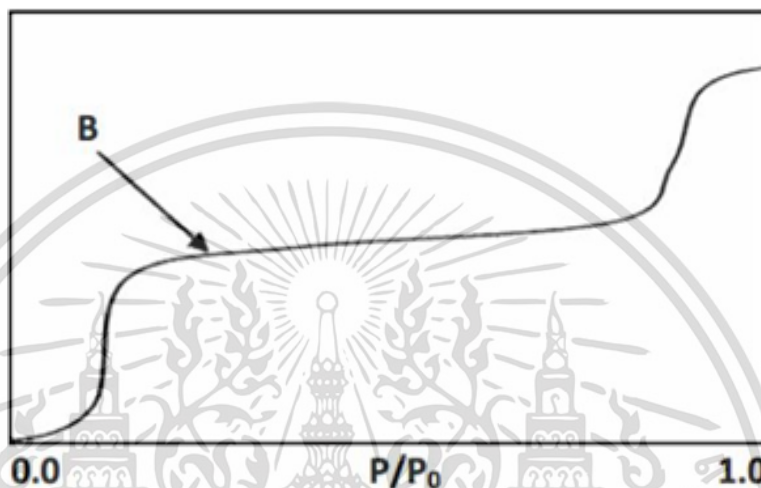


ออกมาหลายรูปแบบ และสัญญาณเหล่านั้นสามารถจับไวหรือรวมไวแล้ว เปลี่ยนแปลงให้เป็นภาพซึ่งถ่ายไวได้ เมื่อลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบตัวอย่าง ำเกิดปฏิกิริยา ระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวตัวอย่าง ำทำให้มีอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ซึ่งมีพลังงานต่ำ หนีออกมาจากชั้นบางของพื้นผิว (ไม่เกิน 5 nm) อิเล็กตรอนประเภทนี้บางประจําอาจหนีออกมาไม่ได้เพราะถูกดูดกลับเข้าชั้นในตัวอย่าง (ส่วนที่ลึกเกิน 5 nm) ก็สูญหายไปเป็นที่สุด ประจําอิเล็กตรอนบริเวณชั้น บนของผิวตัวอย่าง ำที่หลุดออกมาจะถูกจับและรวมเป็นสัญญาณ โดยอุปกรณ์ รวบรวมสัญญาณ ซึ่งสัญญาณนี้จะเปลี่ยนไปเป็นโปรตอนไปเป็นอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนชุดหลังจะถูกขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยตัวขยายสัญญาณ (amplifier) ใหม่จํานวนเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ในที่สุดสัญญาณไฟฟ้าเหล่านั้นจะถูกแปรไปเป็นภาพขาวดำที่ปรากฏบนจอโทรทัศน์ หรือจอภาพหลอดรังสีแคโทด (cathode ray tube, CRT) พร้อมทั้งบันทึกภาพ ซึ่งเกิดจากความแตกต่างระหว่างความสว่าง (ขาว) กับความมืด (ดำ) บนจอภาพ ด้วยกล้องถ่ายภาพ ภาพที่ปรากฏบนจอภาพ CRT เป็นภาพขยายของบริเวณ สี่เหลี่ยมจัตุรัสของพื้นผิวที่ลำแสงอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านในชวงเวลานั้น การที่จะเพิ่ม หรือลดกำลังขยายของภาพจําต้องควบคุมเนื้อที่ที่ลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิส่องกราดไป บริเวณจัตุรัสขนาดเล็ก ภาพที่ปรากฏจะเป็นภาพขยายขนาดใหญ่ หรือในทางกลับกัน หากกำหนดให้ ลำแสงอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในบริเวณที่กว้าง ำใหญ่ภาพที่ปรากฏบนจอ CRT ก็เป็นภาพที่มีกำลังขยายต่ำ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องกราดไปบนผิวของวัตถุตัวอย่าง ำแล้วจะปรากฏเป็นภาพขยายมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรืออาจบันทึกภาพด้วยแผ่นฟิล์ม ลักษณะพิเศษของ SEM ใหญ่คุณสมบัติกำลังขยายและรายละเอียดสูง ำภาพที่มีความลึกหรือมองเห็นเป็นภาพ 3 มิติกล้องชนิดนี้ส่วนใหญ่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (electronics) ซึ่งเปิดโอกาสใหญ่ให้ผู้ใช้ได้มีโอกาส ดัดแปลงโดยต่อเติมอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้มีการแสดงผลในรูปแบบต่างๆ เช่น วิเคราะห์หาธาตุ (element analysis) การคํานวณหามวลและปริมาตร เป็นต้น ส่วนการเคลือบ หรือฉาบผิวตัวอย่าง ำนิยมใช้สารตัวนำไฟฟ้า ำพวกโลหะหนักที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น คาร์บอน ทอง และโลหะผสมทองพัลลาเดียม เป็นต้น โดยจุดประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้า ำให้กับสารตัวอย่าง ำ ทั้งนี้มีหลักการเบื้องต้นของการฉาบผิว คือ ต้องกระทำภายใต้ภาวะสุญญากาศ และใช้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อให้โลหะหนักเปลี่ยนสภาพ จากแท่งโลหะมาเป็มนโมเลกุล และตกลงบนผิวตัวอย่าง ำในอัตราส่วนเดียวกัน ทำให้โลหะฉาบผิวตัวอย่าง ำได้เป็นเนื้อเดียวกัน

#### 2.9.4 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาครูพรุนโดยวิธีบีอีที (BET) [26]

พื้นที่ผิว (Surface Area) ของสารเป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้ประกอบการพิจารณา เพื่อนำสารนั้นไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ หรือตามมาตรฐานกำหนด การวัดพื้นที่ผิวภายในวัสดุที่มีความพรุนทำได้ โดยการศึกษาคัดซ้บของ แก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สอื่นที่มีขนาดเล็ก เช่น อาร์กอน โดยใช้ประโยชน์จากไอโซเทอม ของการดูดซ้บทางกายภาพ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือวิธีบีอีที (BET ย่อมาจาก Brunauer-Emmett-Teller Method) ที่อุณหภูมิของแก๊สเหลว (ในที่นี้เป็ นอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวหรืออาร์กอนเหลว) ซึ่งขึ้นอยู่กับ การดูดซับ โดยจะหาจำนวนโมเลกุลที่ใช่ เพื่อ เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งจะทำให้ สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวภายในได้ การดูดซับของ  $N_2$  ดังภาพ จะ เกิดได้เร็วในช่วงแรกโดยจะเพิ่มตามความดัน จนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยน แ ปลง (ตำแหน่ง B) ซึ่งเสนกราฟจะ ราบ แสดงถึงปรากฏการณ์ที่ การดูดซับบนพื้นผิวแบบชั้นเดียว จะเกิดการควบแน่น ของไนโตรเจนในรูพรุน ทำให้ปริมาตรของ การดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 2.9 กราฟการวัดพื้นที่ผิวโดยวิธีการดูดซับของแก๊สด้วยบีอีที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

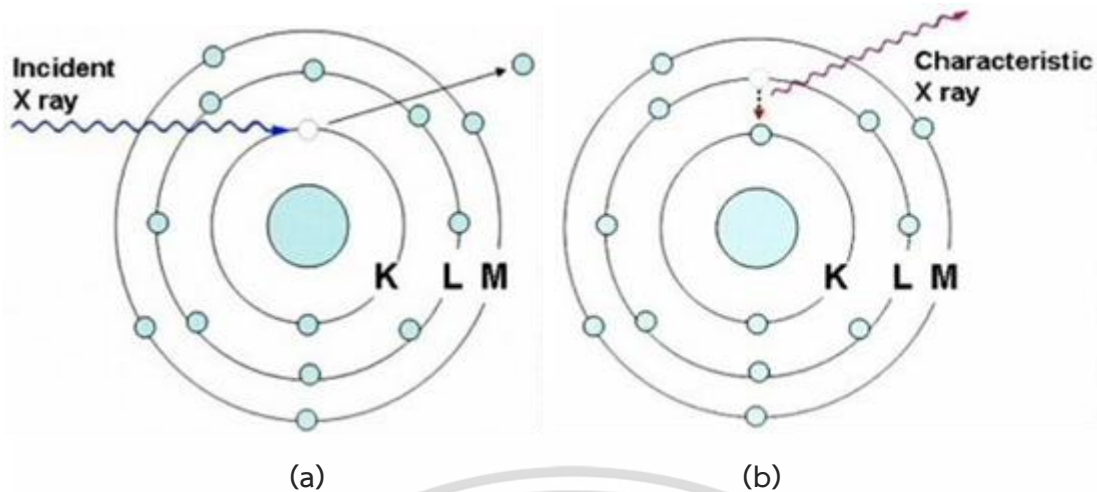
### 2.9.5 ตรวจสอบหารปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวดูดซับโดยอาศัยการวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อย (XRF) [27]

เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนตเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูง ไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X-ray) ของแต่ละธาตุ อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม แบ่งเป็นชั้น (shells) โดยชั้นในสุด ได้แก่ ชั้น K มีระดับพลังงาน (energy level) ต่ำสุด ถัดออกมา ได้แก่ ชั้น L, M, N, ... ซึ่งจะมีระดับพลังงานสูงขึ้นตามลำดับ นอกจากอิเล็กตรอนในชั้น K ที่มีระดับพลังงานเดียวแล้ว อิเล็กตรอนในชั้นอื่นยัง แบ่งเป็นชั้นย่อย ได้แก่ LI, LII, LIII และ MII, MIII, MIV, MV ซึ่งอะตอมของธาตุแต่ละชนิด จะมีความแตกต่างของพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน



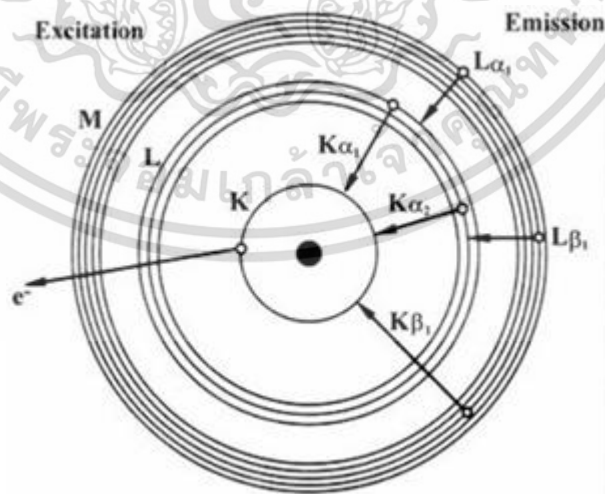
ภาพที่ 2.10 อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมแบ่งเป็นชั้น[26]

อิเล็กตรอนในแต่ละชั้นของวงโคจร มีพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ที่ได้รับจาก นิวเคลียสแตกต่างกัน อิเล็กตรอนวงในที่อยู่ ใกล้ นิวเคลียส จะได้รับพลังงานยึดเหนี่ยวมากกว่า อิเล็กตรอนวงนอก และธาตุที่มีเลขอะตอม (Z) สูงขึ้นจะมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่ออิเล็กตรอนมากขึ้น เมื่อยังรังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา อิเล็กตรอน หรือโปรตอนไปยังอะตอมของธาตุจะชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจร และทำให้ อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอม ทำให้ตำแหน่งนั้นว่าง อิเล็กตรอนในชั้นที่มีพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ เช่น จากชั้น L ไปชั้น K จากชั้น M ไปชั้น K หรือจากชั้น M ไปชั้น L โดยคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X-ray) ของแต่ละธาตุ



ภาพที่ 2.11 (a) รังสีเอ็กซ์พลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกไปจากวงโคจร (b) อิเล็กตรอนในชั้นที่ M ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาแทนที่โดยคายรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานจำเพาะออกมา [26]

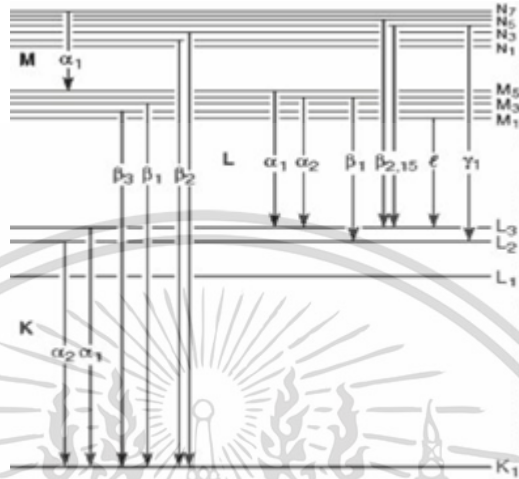
รังสีเอ็กซ์จำเพาะ (characteristic X-ray) ที่เกิดจากอิเล็กตรอนในชั้นที่สูงกว่าลงไป แทนที่ วงในชั้น K เรียกว่า K radiation หรือ K X-ray และเรียกว่า L radiation หรือ L X-ray ถ้าเป็นรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากอิเล็กตรอน ลงไปแทนที่วงในชั้น L โดยส่วนใหญ่อิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากวงโคจรจะเป นอิเล็กตรอนในชั้น K ทำให้รังสีเอ็กซ์จำเพาะที่คายออกมามีความ เข้มของ K X-ray มากกว่า L X-ray รังสีเอ็กซ์จำเพาะจากอิเล็กตรอนในชั้นที่สูงกว่าหนึ่งระดับจะกำกับด้วยเครื่องหมาย  $\alpha$  เช่น อิเล็กตรอนจากชั้น L ไป K =  $K\alpha$  หรือ อิเล็กตรอนจากชั้น M ไป L =  $L\alpha$



ภาพที่ 2.12 สัญลักษณ์ของรังสีเอ็กซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน

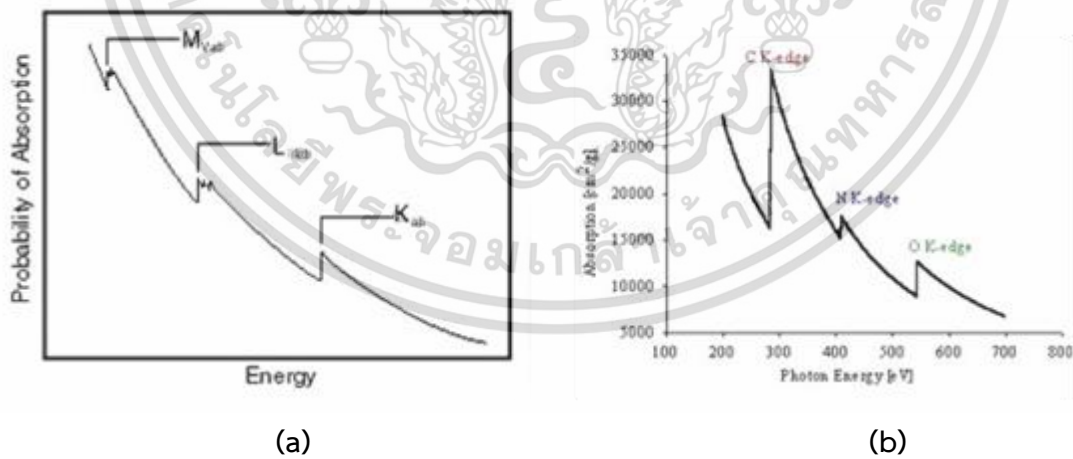
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีเอกซ์จำเพาะจากอิเล็กตรอนในชั้นย่อยของแต่ละระดับที่ลงไปแทนที่ว่างจะกำกับเพิ่ม ด้วยหมายเลข เช่น อิเล็กตรอนจากชั้นย่อยของ LIII ไป  $K = K\alpha_1$  และ LII ไป  $K = K\alpha_2$  หรือ MV ไป LIII =  $L\alpha_1$  และ MIV ไป LIII =  $K\alpha_2$  นอกจากนี้ รังสีเอกซ์ จากอิเล็กตรอนจาก ชั้นอื่นที่ลงมาแทนที่ จะมีเครื่องหมายและหมายเลขกำกับแตกต่างกัน เช่น  $K\beta_1, K\beta_2, L\beta_1, L\beta_2, L\gamma_1, L\gamma_2$  ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 สัญลักษณ์ของรังสีเอกซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน

รังสีที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอม จะต้องมียุทธศาสตร์สูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของ อิเล็กตรอน หรือ แอ็บซอร์บชันเอ็ดจ (absorption edge) โดยจะมีสัมประสิทธิ์ในการ เกิดปฏิกิริยาสูงสุดเมื่อมีพลังงาน ใกล้กับ absorption edge และจะมีคาลดลงเมื่อรังสีที่เข้าทำ ปฏิกิริยามีพลังงานสูงขึ้น โดยมีค่าแตกต่างกัน สำหรับอิเล็กตรอนแต่ละชั้นและแตกต่างกันใน แต่ละธาตุ ดังภาพ



ภาพที่ 2.14 (a) แอ็บซอร์บชันเอ็ดจของอิเล็กตรอนในชั้น K, L, M และ (b) แอ็บซอร์บชันเอ็ดจของคาร์บอน ไนโตรเจนและออกซิเจน

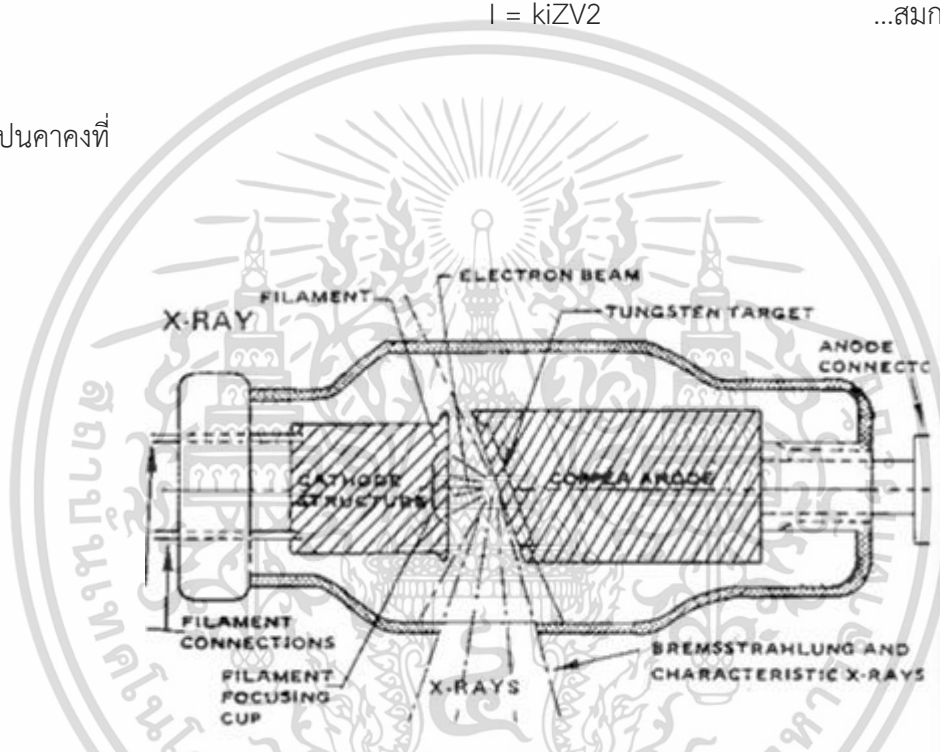
การหาชนิดของธาตุ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ พลังงานของรังสีเอกซ์ จำเพาะ ขณะที่การหาปริมาณธาตุ สามารถทำได้ โดยการวิเคราะห์ ความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่คายออกมา การวิเคราะห์ โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์โดยทั่วไป จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม โดยใช้รังสีเอกซ์พลังงานสูงจากเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์พลังงานสูงสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่น่าจะเหมาะเกินไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลอดรังสีเอ็กซ์ (X-ray tube) หรือไอโซโทปริงส์ (radioisotope) ที่ให้รังสีเอ็กซ์ หลอดรังสีเอ็กซ์ประกอบด้วยไส้หลอด (filament) ที่เป็นแคโทด (cathode) หรือขั้วลบ และแอโนด (anode) หรือขั้วบวกที่มีความต่างศักย์สูง (high voltage) ทำด้วยโลหะที่มีเลขอะตอมสูงและทนความร้อนได้ดี เช่น W, Mo หรือ Rh เมื่อป้อนไฟฟ้าเข้าไป จะทำให้เกิดความร้อนที่แคโทดและมีอิเล็กตรอนหลุดออกมา ความต่างศักย์จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าชนแอโนดที่เป็นเป้า (target) และปล่อยรังสีเอ็กซ์แบบต่อเนื่องหรือเบรมสตราห์ลุง (Bremsstrahlung) ออกมาโดยมีความเข้ม (I) แปรผันตามกระแสไฟฟ้า (i) ศักย์ไฟฟ้า (V) และ เลขอะตอม (Z) ของธาตุที่ใช้ทำแอโนด ตามสมการที่ 2.6

$$I = kiZV^2$$

...สมการที่ 2.6

โดย k เป็นค่าคงที่



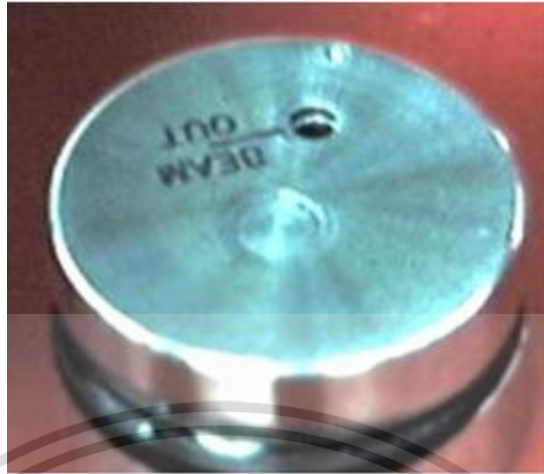
ภาพที่ 2.15 ส่วนประกอบของหลอดรังสีเอ็กซ์

ไอโซโทปริงส์ที่ใช้ในงานเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนตเป็นไอโซโทปที่ให้รังสีเอ็กซ์ ได้แก่ Fe-55, Cd-109, Am-241 และ Pu-238 ซึ่งมีลักษณะเป็นวงแหวนหรือบรรจุอยู่ในตัวยูที่มีของเปด ดังรูปด้านบน โดยมีคุณสมบัติ ดังตาราง

ตารางที่ 2.3 ต้นกำเนิดรังสีเอ็กซ์แบบไอโซโทปริงส์[26]

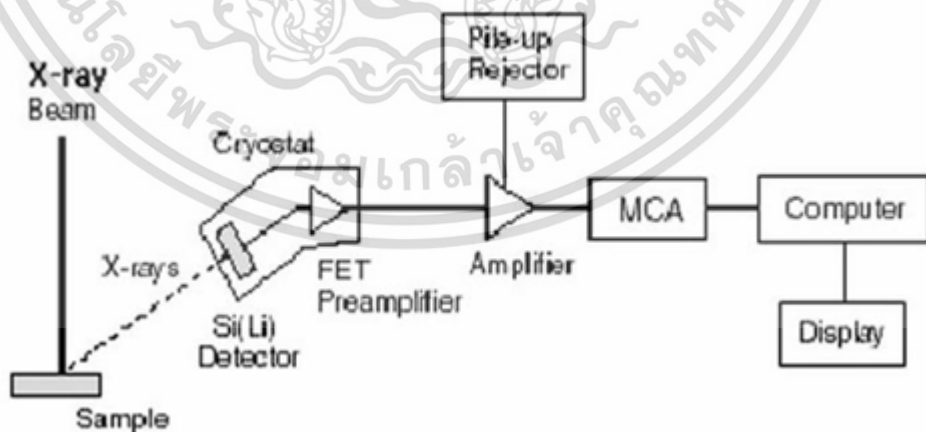
Isotope	T1/2	Decay mode	x-ray emission
Fe-55	2.7 year	Electron capture	5.9 keV
Cd-109	453 day	Electron capture	22.1, 887 keV
Am-241	458 year	Alpha emission	59.57, 26.4 keV
Pu-238	86.4 year	Alpha emission	12-17 keV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.16 ต้นกำเนิดรังสีเอ็กซ์แบบไอโซโทปรังสี

รังสีเอ็กซ์ที่ไหลออกมาจากแต่ละธาตุในตัวอยาง สามารถวิเคราะห์พลังงานของรังสีเพื่อหาชนิดของธาตุ และวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเพื่อหาปริมาณธาตุได้ โดยใช้หัววัดรังสีเอ็กซ์แบบก๊าซ (gas ionization chamber) ชนิด proportional counter หัววัดรังสีแบบเปล่งแสง (scintillation counter) หรือหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ หัววัดชนิดซิลิกอน (ลิเทียม): Si(Li) หรือเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง : HPGe อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดรังสีเอ็กซ์ โดยทั่วไป ประกอบด้วย หัววัดรังสี (detector) ส่วนขยายสัญญาณ (preamplifier) ส่วนขยายสัญญาณ (amplifier) ส่วนวิเคราะห์สัญญาณ (multichannel analyzer) หรือ MCA ประกอบ กับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมประมวลผลและแสดงผลการวิเคราะห์ ดังภาพ

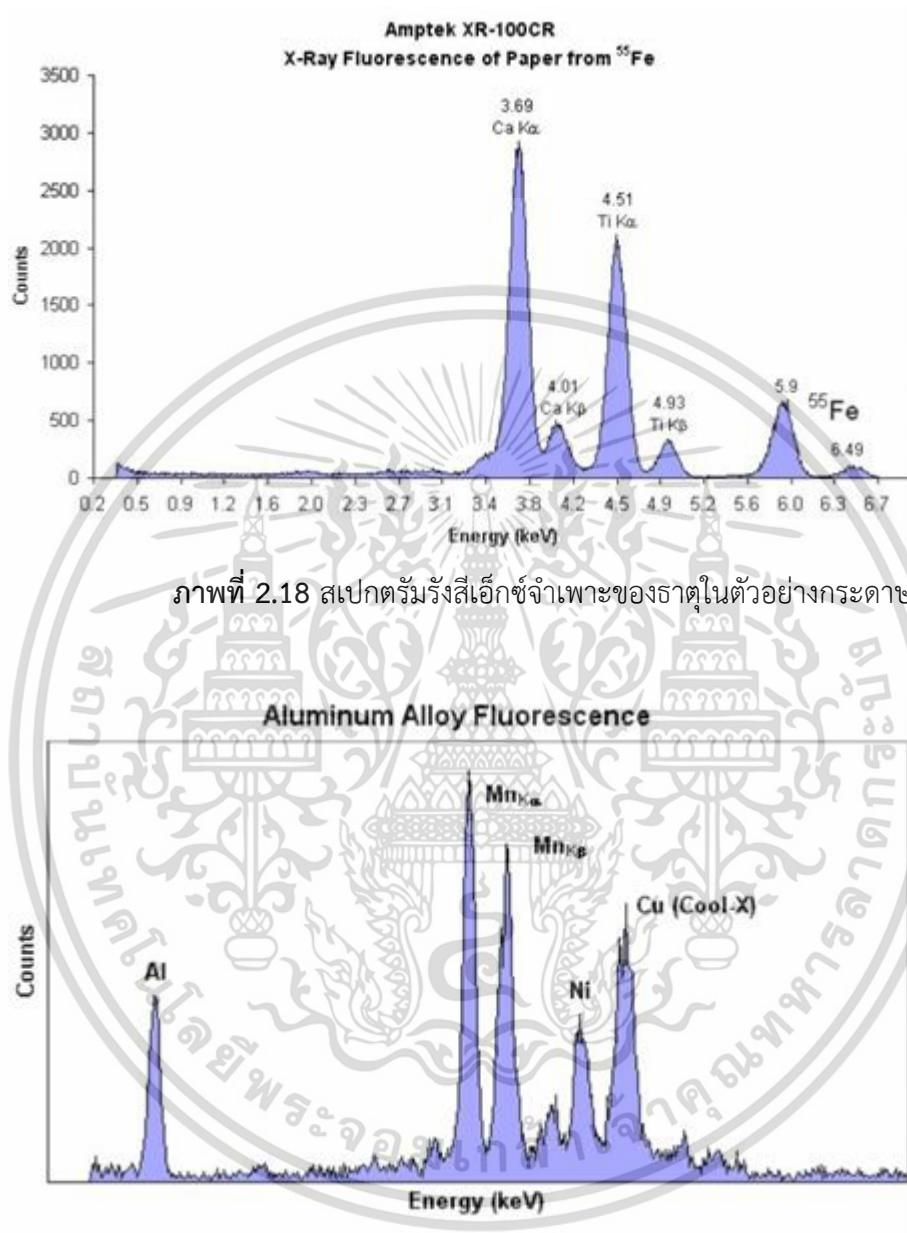


ภาพที่ 2.17 การจัดต่อประกอบอุปกรณ์การวิเคราะห์โดยเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์

รังสีเอ็กซ์พลังงานสูงจากต้นกำเนิดรังสีเอ็กซ์แบบไอโซโทปหรือหลอดรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบตัวอย่าง จะทำให้ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์จำเพาะของแต่ละธาตุออกมา ซึ่งแสดงผลการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นแถบพลังงานหรือสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ ดังรูป ตำแหน่งที่แสดงผลการวัดรังสีเอ็กซ์ของแต่ละธาตุ เรียกว่า โฟโตพีค (photopeak) ซึ่งมีพื้นที่ของพีค (peak area) เป็นคานับวัด (count) ของรังสีเอ็กซ์ ที่มีค่าแปรผันตามปริมาณธาตุในตัวอย่าง



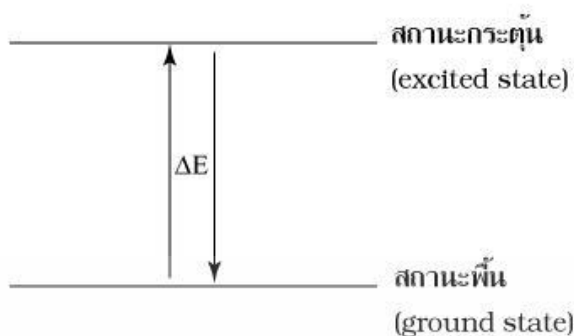
ภาพที่ 2.18 สเปกตรัมรังสีเอ็กซ์จำเพาะของธาตุในตัวอย่างกระดาษ

ภาพที่ 2.19 สเปกตรัมรังสีเอ็กซ์จำเพาะของธาตุในโลหะผสมอลูมิเนียม

## 2.10 การตรวจสอบเอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบการดูดซับอะลูมิเนียมฟอสเฟต (Aluminium Phosphate) [28-30]

เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ (metal element) ในตัวอย่าง ที่ต้องการ ทดสอบ เป็นเครื่องมือที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectroscopy เป็นกระบวนการที่อะตอมอิสระ (free atom) ของธาตุ มีการดูดกลืน (absorb) แสงที่มีความยาวคลื่น ในระดับหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับธาตุแต่ละธาตุ เนื่องจากธาตุแต่ละชนิดมีระดับของพลังงานไม่เท่ากันจึงมีการดูดกลืนพลังงานได้แตกต่างกัน พลังงานที่พอเหมาะกับความถี่เฉพาะจะไม่ผ่านรังสีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของธาตุจะทำให้อิเล็กตรอนของธาตุนั้นๆ เปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น (ground state) ไปเป็นสถานะกระตุ้น (excited state)



ภาพที่ 2.20 การเปลี่ยนสถานะเมื่อการดูดกลืนพลังงาน

### 2.10.1 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

1) เทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีหลายวิธีคือ

1.1) Flam Atomization ใช้พลังงานความร้อนจากเปลวไฟทำให้เกิด atomization process มี 5 ขั้นตอน

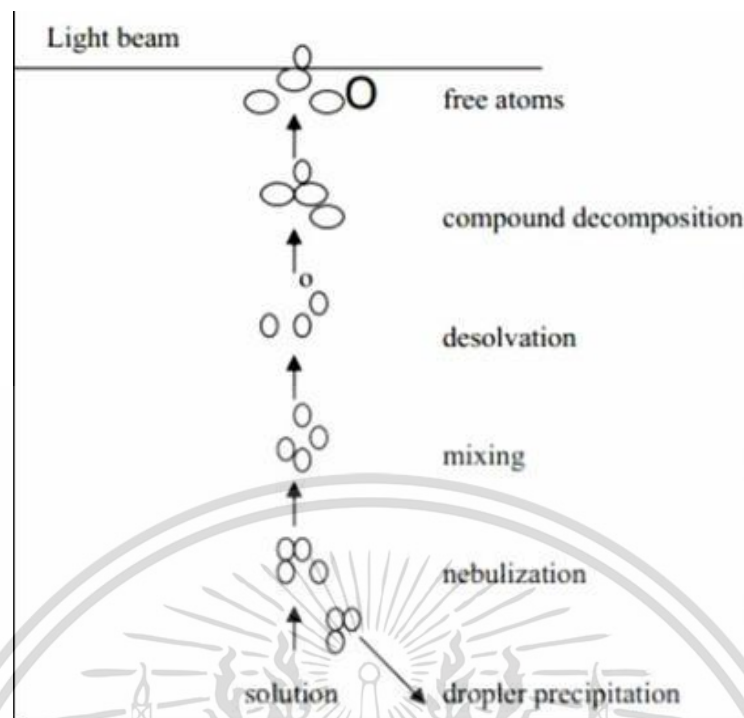
1.1.1) Nebulization เป็นกระบวนการเปลี่ยนของเหลวให้เป็นละอองฝอยเล็กๆ ด้วย ส่วนของเครื่องเรียกว่า nebulizer

1.1.2) Droplet precipitation เป็นกระบวนการที่ละอองเล็กบางส่วนรวมกันเป็นหยดสารละลาย ไม่สามารถลอยอยู่ในอากาศได้จึงตกลงมาแล้วออกไปทางท่อน้ำทิ้ง (drain)

1.1.3) Mixing เป็นกระบวนการที่ mist หรือ aerosol ผสมกับแก๊สเชื้อเพลิง (fuel) และออกซิเจนที่แก๊ส (oxidant gas)

1.1.4) Desolvation เป็นกระบวนการที่ตัวทำละลายที่อยู่ใน mist หรือ aerosol ถูกกำจัดออกไปทำให้เป็นอนุภาคเล็กๆ ของสารประกอบ (solid particles)

1.1.5) Compound decomposition เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในเปลวไฟ โดยพลังงานความร้อนจากเปลวไฟทำให้สารประกอบเกิดการแตกตัวเป็น ออกไซด์เป็น โมเลกุล และเป็นอะตอมอิสระ



ภาพที่ 2.21 แสดง Flame Atomization process[28]

1.2) Electrothermal atomization ใช้พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้าทำให้เกิด atomization process สามารถตั้งโปรแกรมให้อุณหภูมิของการเผาและระยะเวลา มีค่า ต่างๆกันได้

1.2.1) Drying stage เป็นการค่อยๆให้ความร้อน เพื่อจะทำการระเหยตัวทำละลาย ออกไป โดยจะใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส

1.2.2) Ashing stage เป็นการให้ความร้อนสูง เพื่อต้องการที่จะกำจัดสารอินทรีย์และ สารอนินทรีย์

1.2.3) Atomization stage เป็นการเผาสารที่เหลือที่อุณหภูมิสูง อาจถึง 3000 องศา เซลเซียส

1.3) Hydride Generation Technique เนื่องจากธาตุบางชนิดจะเปลี่ยนให้เป็น อะตอมโดยตรง ด้วยเทคนิค 1.1) และ 1.2) ไม่ได้ จำเป็นต้องใช้วิธีทำให้แตกตัวในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน เพื่อ ป้องกันการรวมกับออกซิเจน ดังนั้น จึงต้องใช้วิธีทำให้ธาตุเหล่านั้นกลายเป็นสารที่เป็นไอได้ ง่ายๆ ที่ อุณหภูมิห้องด้วยการ reduce ให้เป็น hydrided แล้วให้ hydrided นั้นผ่านเข้าไปในเปลวไฟไฮโดรเจนจะ ทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมอิสระได้ เทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ As, Bi, Se, Pb, Sb, Sn และ Te

1.4) Cold Vapor Technique จัดเป็นวิธี flameless atomization แบบ Vapor Generation ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่เปลี่ยนเป็นไอได้ง่าย ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์ปรอท โดยใช้การ reduction ของสารประกอบปรอท

2.องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง AAS จะมีด้วยกัน 5 ส่วน

2.1) แหล่งกำเนิดแสง(light source) โดยทั่วไป เป็นหลอดแบบ hollow cathode lamp (HCL) และ electrodeless discharge lamp (EDL)

2.2) ส่วนที่ทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมอิสระ (atomizer หรือ atomization process)

การทำให้อะตอมของธาตุในสารประกอบเกิดเป็นอะตอมอิสระได้นั้น ต้องมีการดูดกลืนพลังงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนเข้าไป ซึ่งพลังงานดังกล่าวอาจอยู่ในรูปต่างๆ เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

2.3) Monochromator ใช้แยกความยาวคลื่นของแสงที่ต้องการ (wavelength selector)

2.4) Detector เป็นเครื่องวัดความเข้มของแสง โดยทำหน้าที่วัดผลที่ได้ ของ AAS เป็นชนิด Photo Multiplier Tube (PMT)

2.5) เครื่องประมวลผลและอ่านผล เป็นเครื่องอ่านค่าการดูดกลืนแสงโดยตรง ประกอบด้วย เครื่องขยายสัญญาณและเครื่องบันทึกสัญญาณหรืออาจจะเป็นระบบอ่านสัญญาณอื่นๆ เช่น คอมพิวเตอร์

3. ขั้นตอนของการหาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่จะใช้เทคนิค AAS มีขั้นตอนในการเตรียมความพร้อม ดังนี้

3.1) เตรียมสารตัวอย่างให้อยู่ในรูปสารละลายที่เหมาะสมและพร้อมที่จะใช้กับเครื่อง AAS

3.2) พิจารณาวาจะทำการวิเคราะห์เพื่อหาอะไร และเลือกวิธีการให้เหมาะสมทั้งในเชิง

คุณภาพและปริมาณวิเคราะห์

3.3) จัดเครื่องมือให้พร้อมที่จะทำงานได้เช่น คอมพิวเตอร์ไมโครโพรเซสเซอร์ควบคุม มี software ที่เก็บข้อมูลของธาตุแต่ละชนิดไว้แล้วเป็นเสมือน cook book ให้ผู้วิเคราะห์สามารถเลือกให้ได้ซึ่งมี

-เลือก HCL ของธาตุที่จะทำการวิเคราะห์ใส่เข้าไปในเครื่องและเลือก กระแสไฟฟ้าที่ต้องใช้

-จัดเครื่องให้มีสภาพที่เหมาะสมกับเทคนิคที่ใช้เช่น ใช้ Flame หรือ flameless atomization การปรับอัตราการไหลของออกซิเจนที่อากาศและเชื้อเพลิง เป็นต้น

-จัดความกว้างของช่องแสงเข้าออกจากโมโนโครเมเตอร์ (slit-width) ให้เหมาะสม

3.4) เลือกโปรแกรมการวัดผล การคำนวณ ตลอดจนการรายงานผลวิเคราะห์

### 2.10.2 การทำคุณภาพวิเคราะห์ด้วย AAS (Qualitative Analysis)

โดยทั่วไปแล้วเทคนิค AAS นั้นไม่เหมาะสมที่จะใช้สำหรับทำคุณภาพวิเคราะห์เพราะ เสียเวลาไม่สะดวก เนื่องจากต้องเปลี่ยน HCL และต้อง scan ความยาวคลื่น ประกอบกับค่าใช้จ่ายสูงจึงไม่นิยมใช้สำหรับตรวจหา อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ก็สามารถใช้ได้เช่น ต้องการตรวจสอบว่าสารละลายตัวอย่างมี Pb เป็นองค์ประกอบหรือไม่เราก็ใช้ HCL เป็น Pb และใช้ Flame (air/C<sub>2</sub> H<sub>2</sub>) เป็น atomizer ใช้ความยาวคลื่นของธาตุ Pb คือ 217 nm สำหรับตรวจวัด หลังจากนำสารละลายตัวอย่างพ่นเข้าไปในเปลวไฟแล้วดูว่าที่ความยาวคลื่น 217 nm มีการดูดกลืนแสงหรือไม่ถ้ามีแสดงว่าสารตัวอย่างมีธาตุ Pb แต่ถ้าไม่มีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นนี้แสดงว่าสารตัวอย่างไม่มี Pb ดังนั้น ถ้าต้องการตรวจหาธาตุใดก็สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน

### 2.10.3 การทำปริมาณวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS (Quantitative Analysis) สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้ [29]

1) Calibration Method ใช้ในกรณีที่สารตัวอย่างไม่ค่อยมีสิ่งรบกวนและสารตัวอย่างเจือจาง ทำการวิเคราะห์ได้โดยเทียบกับสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนแล้ว เป็นวิธีที่ นิยมใช้กัน ทั่วไปโดยปรับสัญญาณที่ได้จาก blank ให้เป็นศูนย์แล้วจึงวัดค่าแอมพลิจูดของ สารละลาย มาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน (4-5 ความเข้มข้น) เมื่อใช้ flameless atomization technique อาจ ใช้วัด peak area หรือความสูงของพีค (peak height) แล้วนำมาเขียนกราฟเพื่อ หาความสัมพันธ์กับ ความเข้มข้นของสารละลายจะได้ calibration curve ซึ่งอาจเป็นเส้นตรงหรือ เส้นโค้งก็ได้การเขียนกราฟ อาจใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ หรือเครื่องคำนวณทำงานให้ถ้าเป็นเส้นตรง least squares fit แต่ถ้าเป็นเส้นโค้ง อาจให้เครื่องลากเส้นโค้งให้ได้ calibration curve ใช้ได้เฉพาะ การวิเคราะห์แต่ละครั้งเท่านั้น เพราะ parameter ต่างๆที่ใช้ อาจเปลี่ยนแปลงได้

2) ใช้ Factor Method วิธีนี้ใช้ได้เมื่อ calibration curve เป็นเส้นตรง โดยนำสารละลายมา 2 ส่วนเท่าๆกัน ( X และ Y) และมีปริมาตร  $V_z$  นำส่วน X มาเติมสารละลายมาตรฐานที่มี ความเข้มข้นเป็น  $C_s$  ลงไปปริมาตร  $V_s$  สำหรับส่วน Y นำมาเติมสารละลายลงไปปริมาตร  $V_s$  แล้วนำสารละลายทั้ง 2 ส่วน ไปวัดค่าแอมพลิจูดได้เป็น  $A_x$  และ  $A_y$  ตามลำดับ ถ้าให้ความเข้มข้นสารละลายเป็น  $C_u$  จะ คำนวณหาความเข้มข้น ได้จากสมการ  $C_u = A_y V_s C_s / (A_x - A_y) V_z$

3) ใช้ Standard Addition Method เป็นวิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับ matrix effects และ interferences เพราะว่า calibration curve ในการวิเคราะห์สารนั้น สัญญาณที่วัดได้จะแสดง สัญญาณต่างๆ จากสารอื่นที่มีอยู่ในตัวอย่างด้วย ทำได้โดยแบ่งสารละลายตัวอย่างออกเป็น 4-5 ส่วน นำแต่ละส่วนมาเติมสารมาตรฐานที่มีความเข้มข้นเท่ากัน แล้วนำไปวัดค่าแอมพลิจูดแล้วนำมาเขียนกราฟ กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมลงไปด้วย least-square fit ความเข้มข้นของสารตัวอย่างหา ได้จากการ extrapolating ไปตัดแกนความเข้มข้น

4) ใช้วิธี Internal Standard Method วิธีนี้อาศัยหลักการเติมสารมาตรฐาน (reference element) เป็นคนละธาตุกับสารที่จะวิเคราะห์ลงไปในตัวอย่าง และ แบลงค์ หลังจากวัดค่าแอมพลิจูดแล้วหาอัตราส่วนของแอมพลิจูดระหว่างสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน จากนั้นนำไปเขียน กราฟกับความเข้มข้นของธาตุที่จะทำการวิเคราะห์จะได้ calibration curve เพื่อหาความเข้มข้นของ สารละลายตัวอย่างสำหรับวิธีนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ

- ก. สารตัวอย่างต้องไม่มีธาตุที่ใช้เป็นมาตรฐาน (reference element)
- ข. ทั้งสารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะต้องมีลักษณะและคุณสมบัติทางเคมี เหมือนกัน

### 2.10.4 ผลกระทบของสิ่งรบกวนต่อการวิเคราะห์ (Interference Effects) [30]

ถึงแม้ว่าเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างเฉพาะมาก ไม่ว่าจะเป็แหล่งกำเนิดและการดูด กลืนแสง แต่ก็อาจมี โอกาสที่สเปกตรัมของธาตุอื่นที่ปนอยู่มารบกวนได้และจะทำให้ค่าแอมพลิจูดได้มากหรือน้อยกว่า ปกติ จำแนกสิ่งรบกวนได้ดังนี้

1) Physical effects เป็นผลเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของสารละลายที่จะวิเคราะห์ซึ่งไป เกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของสารละลาย เขาไปใน nebulizer ขนาดของหยดสารละลาย (drop size) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แก่ volatility ของตัวสารละลาย surface tension, viscosity ซึ่งสามารถแก้ไขได้คือทำให้สารละลายเจือจางลง หรือเติม organic solvents หรือเตรียม สารละลายให้มี matrix อย่างเดียวกับสารตัวอย่าง

2) Chemical effects ได้แก่แอนไอออน เช่น ฟอสเฟต ซัลเฟต อะลูมิเนียม ซิลิเกต หรือ แอนไอออนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบบางตัวทำให้ผลการหาปริมาณของพวก alkaline earth metals ได้น้อยกว่าปกติเมื่อใช้ air-CH flame หรือ flame temperature ต่ำ เพราะมีการเกิดสารประกอบที่อยู่ตัวบางชนิดเรียกว่า refractory compound จึงทำให้การแตกตัวเป็นอะตอมของธาตุที่จะวิเคราะห์แตกตัวได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น

## 2.11 ค่า Effective nuclear charge [31]

จากการจัดเรียงอิเล็กตรอนภายในอะตอมมีกอร์บิทัลพบว่า เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่รอบนิวเคลียส อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะได้รับ บิทธิพลของแรงดึงดูดจากนิวเคลียสที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับว่าอิเล็กตรอนตัวที่จะพิจารณาอยู่ในออร์บิทัลใด ดังนั้นแรงดึงดูดที่อิเล็กตรอนกับนิวเคลียสจึงแตกต่างกัน เรียกแรงที่เกิดจากนิวเคลียสกระทำกับอิเล็กตรอนแต่ละตัวว่า effective nuclear charge,  $Z_{eff}$  ซึ่งสามารถคำนวณแรงที่เกิดขึ้นโดยประมาณใช้กฎของ Slater (Slater's rule ซึ่งหาได้จาก ความสัมพันธ์ จากสมการนี้

$$Z^* = Z - S$$

เมื่อ  $Z^*$  คือ Effective nuclear charge

$Z$  คือเลขอะตอมของอะตอมที่พิจารณา

$S$  (screening หรือ shielding constant) คือค่าการบดบังของแต่ละออร์บิทัล

ซึ่งการบดบังสามารถหาได้โดยประมาณดังนี้

1. ให้จัดเรียงอิเล็กตรอนและจัดกลุ่มของการบดบังดังนี้ : (1s), (2s, 2p), (3s, 3p), (3d), (4s, 4p), (4d), (4f), (5s, 5p) etc.

2. อิเล็กตรอนที่อยู่กลุ่มที่สูงกว่าจะไม่บดบังอิเล็กตรอนที่พิจารณา

3. กรณีของ ns หรือ np ของออร์บิทัลสามารถคำนวณได้ดังนี้ 1) อิเล็กตรอนแต่ละตัวในกลุ่ม (ns, np) จะบดบัง  $S = 0.35$  2) อิเล็กตรอนในชั้น (n-1) จะบดบัง  $S = 0.85$  3) อิเล็กตรอนในชั้น (n-2) และต่ำกว่าจะบดบัง  $S = 1.00$

4. อิเล็กตรอนในออร์บิทัล nd หรือ nf สามารถพิจารณาได้ดังนี้

4.1) อิเล็กตรอนแต่ละตัวในกลุ่ม nd หรือ nf จะบดบัง  $S = 0.35$

4.2) อิเล็กตรอนที่อยู่ในกลุ่มที่ต่ำกว่าจะบดบัง  $S = 1.00$

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ling-Chu Lin และคณะ (2010) [32] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุในการดูดซับที่มีการจัดเรียงตัวของรูพรุนสม่ำเสมอ (Mesoporous materials, MCM-41) โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal Method) อย่างง่าย ซึ่งจะใช้ซีติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyltrimethyl ammoniumbromide, CTAB) เป็นสารกำหนดโครงสร้าง โดยจะถูกกำจัดออกในกระบวนการเผา (Calcination) และยืนยันโครงสร้างผ่านการตรวจวัดด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบอินฟราเรด (Fourier transform Infrared, FT-IR) ผลของวิธีการเตรียมจะแสดงภายใต้สภาวะการทดลองต่างๆ จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิ ระยะเวลา สภาวะในการเผา และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pH มีผลต่อขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ แต่ที่สภาวะ pH สูงเกินไปจะไม่เหมาะสม สำหรับการสังเคราะห์และยังพบว่าวัสดุที่มีรูพรุนสม่ำเสมอสามารถสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ pH 10 สารดูดซับจะมีประสิทธิภาพสูง และเป็นสภาวะ ในการเตรียมที่เหมาะสมที่สุด โดยพบว่าพื้นที่ผิวสูงถึง 1,568.72 ตารางเมตรต่อกรัม และมีรูพรุน ขนาด 3.07 นาโนเมตร จากการศึกษาทฤษฎีการดูดซับของแลงก์เมียร์ของไอออนโลหะหนัก 3 ชนิด คือ  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  และ  $Ni^{2+}$  แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ทางกายภาพกับค่าการดูดซับ สูงสุดสำหรับตัวอย่างที่เตรียมภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสม พบว่าวัสดุที่เตรียมได้มี ประสิทธิภาพต่อการดูดซับไอออน  $Pb^{2+}$  ดีที่สุดเมื่อเทียบกับไอออน  $Cu^{2+}$  และ  $Ni^{2+}$  เนื่องจาก  $Pb^{2+}$  มีช่วงรัศมีไอออนและค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity) ที่สูงกว่า ดังนั้นวัสดุที่มีรูพรุนสม่ำเสมอจึงมีประสิทธิภาพดีสำหรับการกำจัดไอออนของโลหะหนัก จากสารละลายเมื่อ เปรียบเทียบกับผงถ่านกัมมันต์ (Powdered activated carbon, PAC) ซึ่งเป็นวัสดุดูดซับที่ใช้เชิง การค้า

**Kun Jia และคณะ(2008) [33]** ได้ทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนักจากพวก  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  ที่มีอยู่ในน้ำโดยใช้ตัวรองรับเป็นไทเทเนียมฟอสเฟต (titanium phosphate, TiP) ที่มีผลึกแบบ ออสันฐาน (amorphous) โดยการเตรียม TiP จะเริ่มจากใช้ไทเทเนียมคลอไรด์ (titanium chloride) 40 ml ละลายกับกรดไฮโดรคลอริก 60 ml เข้มข้น 4 โมลาร์ จากนั้นนำ สารละลายที่ได้มาผสมกับไฮโดรเจนฟอสเฟตที่อุณหภูมิห้อง ทาการเข้าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 คืน จากนั้นนำมากรองตะกอนและล้างตะกอนด้วยน้ำ DI ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าไทเทเนียม ฟอสเฟตมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอสันฐาน หลังจากนั้นทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโลหะ หนักบน TiP พบว่า TiP นั้นสามารถดูดซับ  $Pb^{2+}$  ได้ดีที่สุด การดูดซับโลหะหนักทั้งสามชนิดจะ ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด -ด่าง โดยค่าความเป็นกรด -ด่างที่เหมาะสมต่อการดูดซับ  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  ประมาณ 3, 4.5 และ 5 ตามลำดับ

**Fei Ji และคณะ(2012) [34]** ได้ทำการศึกษาการเตรียมการของเซลล์ลูโลสอะซิเตท /เส้นใย ชนิดซีไอไลต์และพฤติกรรมการดูดซับของไอออนโลหะหนักจากพวก คอปเปอร์ และนิกเกิล ใน สารละลาย เมื่อได้ทำการศึกษาวิเคราะห์เซลล์ลูโลสอะซิเตท /เส้นใย ชนิดซีไอไลต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า CA/Z มีโครงสร้างที่มีรูพรุนสูงและมีลักษณะที่ คล้ายฟองน้ำส่วนในการศึกษาความสามารถในการดูดซับนั้นจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิ กแอบซอร์ปชันสเปกโทรสโกปี (AAS) ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับ เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก ค่า pH นั้นมีผลต่อการดูดซับซึ่งจะเห็นได้จาก CA/Z จะดูดซับโลหะหนักดีกว่า pure CA จะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับของ CA/Z ซึ่งเป็นสารละลายที่เป็นกรดอ่อนหรือเป็นกลางจะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าสารละลายที่เป็นกรดแก่ เนื่องมาจากผลของซีไอไลต์ เพราะ ซีไอไลต์นั้นมี  $H^+$  ion สูง เมื่อความเข้มข้นของ  $H^+$  ion สูงจะทำให้ค่า pH นั้นต่ำลงซึ่งแสดงว่าถ้าค่า pH ต่ำ จะมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก ได้ดีกว่า

**Chellapandian Kanna และคณะ(2012) [35]** ได้ทำการศึกษาการนาสี่ย้อมที่เป็น อันตรายออกจากสารละลายผ่าน  $AlPO_4$  ด้วยโครงสร้างพื้นฐานที่มีลักษณะเป็นรูพรุน โดยการดูดซับซึ่งทำการตรวจสอบโมเลกุลของ  $AlPO_4$  ที่สังเคราะห์ขึ้นมาและนาเอาสี่ย้อม Malachite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

green (MG) และ Methylene blue (MB) ที่เป็นอันตรายออกในการสังเคราะห์โมเลกุลที่เป็น  
 ตะแกรงของ  $AlPO_4$  นั้น จะใช้สารเป็น Aluminium hydroxide (98%) ผสมกับ Phosphoric  
 acid (88%) และ long-chain alkylbenzene (SDBS, 25% in water) ซึ่งใช้เป็นตัวแม่แบบใน  
 การกำหนดโครงสร้างของ  $AlPO_4$  การสังเคราะห์  $AlPO_4$  จะใช้ Tetra-methyl ammonium  
 hydroxide (TMAOH) ซึ่งจำเป็นในการปรับค่า pH ในระหว่างการสังเคราะห์  $AlPO_4$  สามารถทน  
 ความร้อนได้อุณหภูมิที่สูงกว่า 1173K และมีลักษณะรูพรุนขนาด 40 nm เมื่อทำการสังเคราะห์  
 เสร็จแล้วก็นำไปดูดซับ MG และ MB ผลจากการทดลองนั้นเห็นได้ว่า  $AlPO_4$  ใช้เวลาในการดูดซับ  
 เร็วเพียงแค่ 20 นาทีเพราะเนื่องจาก  $AlPO_4$  นั้นมีการดูดซับแบบชั้นเดียวมากที่สุด 24.51  
 mg/g สำหรับ MG และ 35.20 mg/g สำหรับ MB การนำกลับมาใช้ใหม่ของ  $AlPO_4$  นั้น จะใช้เอ  
 ทานอลในการทำการคายซับสีย้อมและตามด้วยการนำเอาไปเผาเพื่อนำ  $AlPO_4$  กลับมาใช้งานอีก  
 ครั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### 3.1 บทนำ

โครงการวิจัยนี้สนใจศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับโลหะหนักจากน้ำ เสียสียงเคราะห์โดยใช้อลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก มีการเลือกใช้อลูมิเนียมฟอสเฟตสังเคราะห์ด้วยเทคนิคที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว และไม่ก่อให้เกิดอันตรายในขณะการทำกาทดลอง อลูมิเนียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้พบว่าสามารถสลายตัวไปเป็นกลุ่มไพโรฟอสเฟตได้

เมื่อสังเคราะห์ตัวดูดซับอลูมิเนียมฟอสเฟตได้ จะถูกนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้ FT-IR สำหรับวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณสาร วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดยการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วง Infrared (IR) XRD ใช้วิเคราะห์และระบุชนิดสารประกอบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ SEM ใช้วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด TGA ใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยอาศัยความคุณสมบัติทางความร้อน และ BET ใช้วิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน

หลังจากวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณสมบัติของอลูมิเนียมฟอสเฟตแล้ว นำอลูมิเนียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบความสามารถในการดูดซับ (Adsorption) โลหะหนัก จากน้ำเสียสังเคราะห์ และทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยใช้อลูมิเนียมฟอสเฟตเป็นตัวดูดซับผ่านการใช้เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS)

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.2.1 ชุดเครื่องแก้ว บริษัท DURAN Group GmbH
- 3.2.2 เตาเผา (Furnance) Controller B 170 บริษัท Naber Therm
- 3.2.3 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง GR-200 บริษัท A&D company
- 3.2.4 pH meter Mettler Toledo FiveEasy™ FE20 บริษัท Sigma-Aldrich
- 3.2.5 โถดูดความชื้น (desiccator) บริษัท DURAN Group GmbH
- 3.2.6 เครื่องกรองแบบลดความดัน (Ultrafiltration) Model WJ-20 Serial no.1 YS94S บริษัท SIBATA
- 3.2.7 ตู้อบ (Oven) Serial no.8 502.0552 บริษัท MEMMERT
- 3.2.8 เครื่องกวนสาร EUROSTAR digital บริษัท IKA-Works
- 3.2.9 เครื่องเขย่าแบบตั้งโต๊ะ Gallenkamp Orbital Shaker บริษัท Gemini BV
- 3.2.10 กระดาษกรอง (Filter papers) Whatman 42 บริษัท Whatman International Ltd
- 3.2.11 ครุชีเบล (Crucible) HCT
- 3.2.12 เครื่อง วัดสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) รุ่น FT-IR Spectrum GX บริษัท PerkinElmer

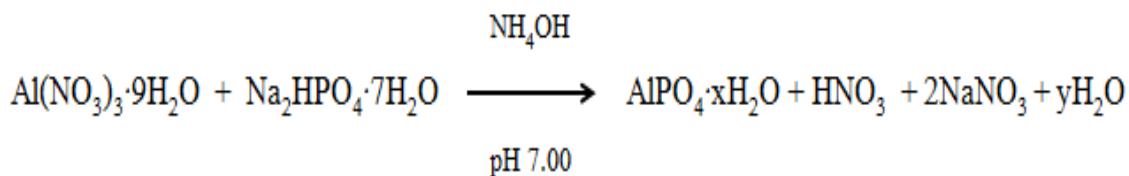
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.13 เครื่องวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) รุ่น D8 Advance บริษัท Bruker AXS
- 3.2.14 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermo Gravimetric Analyzer, TGA) รุ่น Pyris 1 TGA บริษัท PerkinElmer
- 3.2.15 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนของตัวดูดซับโดยใช้วิธีบีบี ที (Brunauer-Emmett-Teller Method, BET)
- 3.2.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron Microscopy, SEM) รุ่น 1455VP บริษัท LEO
- 3.2.17 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) รุ่น AAS-200 บริษัท PerkinElmer

### 3.3 สารเคมี

- 3.3.1 อะลูมิเนียมไนเตรทโนนไฮเดรต (Aluminium nitrate nonahydrate,  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์ ความบริสุทธิ์ 99.0 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Loba Chemie Pvt,Ltd.
- 3.3.2 ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเฮปตะไฮเดรต (Di-Sodium hydrogen phosphate heptahydrate,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck
- 3.3.3 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide,  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) เกรดวิเคราะห์ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร บริษัท Carlo Erba Reagents
- 3.3.4 ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific UK
- 3.3.5 สารละลายมาตรฐานเลด(II)ไนเตรท (Lead(II) nitrate,  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ), เข้มข้น 1000 ppm เกรดวิเคราะห์ บริษัท VWR International Ltd
- 3.3.6 สารละลายมาตรฐานซิงค์(II)ไนเตรท (Zinc(II) nitrate,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ ), เข้มข้น 1000 ppm เกรดวิเคราะห์ บริษัท VWR International Ltd
- 3.3.7 สารละลายมาตรฐานนิกเกิล (II)ไนเตรท (Nickel(II) nitrate,  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ ), เข้มข้น 1000 ppm เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck

### 3.4 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 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$



1) ชั่ง  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  37.5130 กรัม มาละลายด้วยน้ำ DI (Deionized water) โดยปรับปริมาตร 100 ml ให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 1 M

2) ชั่ง  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  26.803 กรัม มาละลายด้วยน้ำ DI (Deionized water) โดยปรับปริมาตร 100 ml ให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 1 M

3) ผสมสารละลาย  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  และสารละลาย  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ที่เตรียมได้อย่างละ 100 ml ลงในปิกเกอร์ขนาด 600 ml พร้อมปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาทีโดยจะทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

4) ปรับค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter ให้ได้ pH 7.0 โดยใช้ 30%  $\text{NH}_4\text{OH}$  จะได้ตะกอนสีขาว ทำการปั่นกวนต่ออีก 1 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ 1 คืน

5) นำตะกอนที่ได้มาล้างด้วยน้ำ DI (Deionized water) และทำการกรองตะกอนด้วยเครื่องกรองแบบลดความดันซึ่งในการล้างครั้งสุดท้ายจะล้างตะกอนด้วยไอโซโพรพานอล

6) อบตะกอนที่ได้ให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

7) นำตะกอนที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วย XRD, FT-IR, SEM, BET โดยจะแบ่งตะกอนไปเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงโดยอัตราการให้ความร้อนคือ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที

### 3.5 วิธีการดูชั้นบนอะลูมิเนียม ( $AlPO_4$ )

#### ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^k$

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งเราต้องการที่จะศึกษาถึงผลรวมที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบมีกรณีพิเศษของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย  $K$  ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ และใน 2 ระดับที่กล่าวนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งใน 1 เรพลีเคตที่บริสุทธิ์ สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วย ข้อมูลทั้งสิ้น  $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  ข้อมูล

การออกแบบ  $2^k$  มีประโยชน์อย่างมากต่องานทดลองในช่วงแรกเริ่ม เมื่อมีปัจจัยที่ เราต้องการจะตรวจสอบเป็นจำนวนมาก การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง  $K$  ชนิดได้

การออกแบบ  $2^k$  สำหรับการทดลองจะประกอบด้วยปัจจัย 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ การออกแบบเช่นนี้เรียกว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^3$  ซึ่งการทดลองรวมปัจจัยทั้ง 8 ในที่นี้จะใช้เครื่องหมาย + และ - แทนระดับสูงและระดับต่ำของปัจจัย เราสามารถเขียนเขียนลำดับมาตรฐานของการทดลองรวมปัจจัยที่จะเกิดขึ้นทั้งหมดได้เป็น (1), a, b, ab, c, ac, bc และ abc

ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  แฟกทอเรียล

Run Number	Treatment Combination	Factor		
		A	B	C
1	1	-	-	-
2	A	+	-	-
3	B	-	+	-
4	Ab	+	+	-
5	C	-	-	+
6	Ac	+	-	+
7	Bc	-	+	+
8	Abc	+	+	+

กำหนดให้  
 a : ความเข้มข้นของโลหะหนัก ,  
 b : น้ำหนักของ  $AlPO_4$   
 c : ความเร็วรอบการเขย่า

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรสำหรับการทดลองแบบ  $2^k$  แฟกทอเรียล

A ความเข้มข้น	B น้ำหนักของ $AlPO_4$			
	0.05 %wt/v		0.2 %wt/v	
	C ความเร็วรอบการเขย่า		C ความเร็วรอบการเขย่า	
	140	180	140	180
10	1	5	3	7
50	2	6	4	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.1 การสร้างกราฟมาตรฐานด้วยสารละลายเลด(II)ไนเตรท

1) เตรียมสารละลายมาตรฐานเลด(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ppm ปริมาตร 10 ml โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเลด(II)ไนเตรทเข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 10 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานเลด(II)ไนเตรทเข้มข้น 100 ppm จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเลด(II)ไนเตรทเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 10 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานเลด(II)ไนเตรทเข้มข้น 10 ppm จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเลด(II)ไนเตรทเข้มข้น 10 ppm ปริมาตร 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2) วัดค่าการดูดกลืนโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ซึ่งทำการวัดตะกั่วที่ความยาวคลื่น 217 นาโนเมตร

### 3.5.2 การสร้างกราฟมาตรฐานด้วยสารละลายซิงค์(II)ไนเตรท

1) เตรียมสารละลายมาตรฐานซิงค์(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4 และ 1.6 ppm ปริมาตร 10 ml โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานซิงค์(II)ไนเตรทเข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 10 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานซิงค์(II)ไนเตรทเข้มข้น 100 ppm จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม(II)ไนเตรทเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 10 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียม(II)ไนเตรทเข้มข้น 10 ppm จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม(II)ไนเตรทเข้มข้น 10 ppm ปริมาตร 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2) วัดค่าการดูดกลืนโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ซึ่งทำการวัดแคดเมียมที่ความยาวคลื่น 213.86 นาโนเมตร

### 3.5.3 การสร้างกราฟมาตรฐานด้วยสารละลายนิกเกิล(II)ไนเตรท

1) เตรียมสารละลายมาตรฐานนิกเกิล(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ppm ปริมาตร 10 ml โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานนิกเกิล(II)ไนเตรทเข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 10 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานนิกเกิล(II)ไนเตรทเข้มข้น 100 ppm จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานนิกเกิล(II)ไนเตรทเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 10 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียม(II)ไนเตรทเข้มข้น 10 ppm จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานนิกเกิล(II)ไนเตรทเข้มข้น 10 ppm ปริมาตร 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, และ 8 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2) วัดค่าการดูดกลืนโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ซึ่งทำการวัดแคดเมียมที่ความยาวคลื่น 232 นาโนเมตร

### 3.5.4 การดูดซับของตะกั่วบนตัวดูดซับอะลูมิเนียมฟอสเฟต โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^k$

#### 3.5.4.1 การดูดซับสารละลายเลด(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 10 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) เตรียมสารละลายเลด(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 10 ppm ปริมาตร 50 ml โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเลด(II)ไนเตรทเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 50 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จากนั้นปิเปตสารละลายเลด(II)ไนเตรทที่ปรับความเข้มข้นเรียบร้อยแล้วลงในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 50 ml

2) ชั่งอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) 0.05 %wt/v และ 0.2 %wt/v อย่างละ 2 ขวด ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายเลด(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 10 ppm

3) นำขวดรูปชมพู่ที่มีอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) และสารละลายเลด(II)ไนเตรทไปเขย่าบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 45 นาทีด้วยความเร็วรอบ 140 และ 180 rpm โดยแบ่งเขย่าขวดที่มีน้ำหนัก  $\text{AlPO}_4$  0.05 %wt/v และ 0.2 %wt/v อย่างละสองขวด

4) นำสารละลายในขวดรูปชมพู่มากรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดันเพื่อแยกอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) ออก

5) นำสารละลายที่กรองได้จากแต่ละขวดไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลือนำด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ซึ่งทำการวัดตะกั่วที่ความยาวคลื่น 217 นาโนเมตร

#### 3.5.4.2 การดูดซับสารละลายเลด(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 50 ppm

1) เตรียมสารละลายเลด(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 50 ppm ปริมาตร 50 ml โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเลด(II)ไนเตรทเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 50 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จากนั้นปิเปตสารละลายเลด(II)ไนเตรทที่ปรับความเข้มข้นเรียบร้อยแล้วลงในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 50 ml

2) ชั่งอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) 0.05 %wt/v และ 0.2 %wt/v อย่างละ 2 ขวด ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายเลด(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 50 ppm

3) นำขวดรูปชมพู่ที่มีอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) และสารละลายเลด(II)ไนเตรทไปเขย่าบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 45 นาทีด้วยความเร็วรอบ 140 และ 180 rpm โดยแบ่งเขย่าขวดที่มีน้ำหนัก  $\text{AlPO}_4$  0.05 %wt/v และ 0.2 %wt/v อย่างละสองขวด

4) นำสารละลายในขวดรูปชมพู่มากรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดันเพื่อแยกอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) ออก

5) นำสารละลายที่กรองได้จากแต่ละขวดไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลือนำด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ซึ่งทำการวัดตะกั่วที่ความยาวคลื่น 217 นาโนเมตร

#### 3.5.4.3 การดูดซับสารละลายซิงค์(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 10 ppm

1) เตรียมสารละลายซิงค์(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 10 ppm ปริมาตร 50 ml โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานซิงค์(II)ไนเตรทเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 50 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จากนั้นปิเปตสารละลายซิงค์(II)ไนเตรทที่ปรับความเข้มข้นเรียบร้อยแล้วลงในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 50 ml

2) ชั่งอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) 0.05 %wt/v และ 0.2 %wt/v อย่างละ 2 ขวด ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายซิงค์(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 10 ppm

3) นำขบวนการผสมที่มีอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) และสารละลายซิงค์(II)ไนเตรทไปเขย่าบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 45 นาทีด้วยความเร็วรอบ 140 และ 180 rpm โดยแบ่งเขย่าขวดที่มีน้ำหนัก  $\text{AlPO}_4$  0.05 %wt/v และ 0.2 %wt/v อย่างละสองขวด

4) นำสารละลายในขวดผสมมากรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดันเพื่อแยกอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) ออก

5) นำสารละลายที่กรองได้จากแต่ละขวดไปวิเคราะห์หาปริมาณ ซิงค์ที่เหลือนำด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ซึ่งทำการวัดซิงค์ที่ความยาวคลื่น 213.86 นาโนเมตร

#### 3.5.4.4 การดูดซับสารละลายซิงค์(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 50 ppm

1) เตรียมสารละลายซิงค์(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 50 ppm ปริมาตร 50 ml โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานซิงค์(II)ไนเตรทเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 50 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจากนั้นปิเปตสารละลาย ซิงค์(II)ไนเตรทที่ปรับความเข้มข้นเรียบร้อยแล้วลงในขวดรูปผสมปริมาตร 50 ml

2) ชั่งอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) 0.05 %wt/v และ 0.2 %wt/v อย่างละ 2 ขวด ใส่ลงในขวดรูปผสมที่มีสารละลายซิงค์(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 50 ppm

3) นำขบวนการผสมที่มีอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) และสารละลาย ซิงค์(II)ไนเตรทไปเขย่าบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 45 นาทีด้วยความเร็วรอบ 140 และ 180 rpm โดยแบ่งเขย่าขวดที่มีน้ำหนัก  $\text{AlPO}_4$  0.05 %wt/v และ 0.2 %wt/v อย่างละสองขวด

4) นำสารละลายในขวดรูปผสมมากรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดันเพื่อแยกอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) ออก

5) นำสารละลายที่กรองได้จากแต่ละขวดไปวิเคราะห์หาปริมาณ ซิงค์ที่เหลือนำด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ซึ่งทำการวัดซิงค์ที่ความยาวคลื่น 213.86 นาโนเมตร

#### 3.5.4.5 การดูดซับสารละลายนิกเกิล(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 10 ppm

1) เตรียมสารละลาย นิกเกิล(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 10 ppm ปริมาตร 50 ml โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานนิกเกิล(II)ไนเตรทเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 50 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจากนั้นปิเปตสารละลาย นิกเกิล(II)ไนเตรทที่ปรับความเข้มข้นเรียบร้อยแล้วลงในขวดรูปผสมปริมาตร 50 ml

2) ชั่งอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) 0.05 %wt/v และ 0.2 %wt/v อย่างละ 2 ขวด ใส่ลงในขวดรูปผสมที่มีสารละลายซิงค์(II)ไนเตรทที่ความเข้มข้น 10 ppm

3) นำขบวนการผสมที่มีอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) และสารละลาย ซิงค์(II)ไนเตรทไปเขย่าบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 45 นาทีด้วยความเร็วรอบ 140 และ 180 rpm โดยแบ่งเขย่าขวดที่มีน้ำหนัก  $\text{AlPO}_4$  0.05 %wt/v และ 0.2 %wt/v อย่างละสองขวด

4) นำสารละลายในขวดรูปผสมมากรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดันเพื่อแยกอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) ออก

5) นำสารละลายที่กรองได้จากแต่ละขวดไปวิเคราะห์หาปริมาณ นิกเกิลที่เหลือนำด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ซึ่งทำการวัดนิกเกิลที่ความยาวคลื่น 232 นาโนเมตร

### 3.5.4.6 การดูดซับสารละลายนิกเกิล(II)ในเตรทที่ความเข้มข้น 50 ppm

1) เตรียมสารละลาย นิกเกิล(II)ในเตรทที่ความเข้มข้น 50 ppm ปริมาตร 50 ml โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานนิกเกิล(II)ในเตรทเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 50 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจากนั้นปิเปตสารละลายนิกเกิล(II)ในเตรทที่ปรับความเข้มข้นเรียบร้อยแล้วลงในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 50 ml

2) ชั่งอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $AlPO_4$ ) 0.05 %wt/v และ 0.2 %wt/v อย่างละ 2 ขวด ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายนิกเกิล(II)ในเตรทที่ความเข้มข้น 50 ppm

3) นำขวดรูปชมพู่ที่มีอะลูมิเนียม ฟอสเฟต ( $AlPO_4$ ) และสารละลาย นิกเกิล(II)ในเตรทไปเขย่าบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 45 นาทีด้วยความเร็วรอบ 140 และ 180 rpm โดยแบ่งเขย่าขวดที่มีน้ำหนัก  $AlPO_4$  0.05 %wt/v และ 0.2 %wt/v อย่างละสองขวด

4) นำสารละลายในขวดรูปชมพู่มากรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดันเพื่อแยกอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $AlPO_4$ ) ออก

5) นำสารละลายที่กรองได้จากแต่ละขวดไปวิเคราะห์หาปริมาณ นิกเกิลที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ซึ่งทำการวัดนิกเกิลที่ความยาวคลื่น 232 นาโนเมตร

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาเรื่องการออกแบบการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้อะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $AlPO_4$ ) ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่าย (precipitation) โดยทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับ ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในส่วนแรกคือผลการสังเคราะห์อะลูมิเนียมฟอสเฟต ส่วนที่สองคือการวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณสมบัติของอะลูมิเนียมฟอสเฟตด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (FTIR), การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD), การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) และการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิคบีอีที (BET) และส่วนที่สามคือการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อประสิทธิภาพการดูดซับได้แก่ ความเร็วรอบในการเขย่า ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ และปริมาณอะลูมิเนียมฟอสเฟตที่ใช้ในการดูดซับ

#### 4.1 ผลการสังเคราะห์อะลูมิเนียมฟอสเฟต

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $AlPO_4$ ) ด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่าย (precipitation) โดยใช้อะลูมิเนียมไนเตรตโนนไฮเดรต ( $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ) เป็นสารตั้งต้นในการตกตะกอนร่วมกับ 1 โมลของแหล่งฟอสเฟตคือ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเฮปตะไฮเดรต ( $Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$ ) และใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $NH_4OH$ ) เป็นตัวปรับ pH ให้มีค่าเท่ากับ 7 ในสภาวะที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 0 องศาเซลเซียส ตะกอนที่ได้ถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการให้ความร้อนคือ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



สมการที่ 4.1



สมการที่ 4.2

ในการสังเคราะห์อะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $AlPO_4$ ) สามารถสรุปน้ำหนักของสารที่ได้จากทางทฤษฎี น้ำหนักของสารที่ได้จากการทดลอง และร้อยละผลิตภัณฑ์ของอะลูมิเนียมฟอสเฟตที่อยู่ในรูปผลึกน้ำ ( $AlPO_4 \cdot 3H_2O$ ) และอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $AlPO_4$ ) ได้ดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.1** ร้อยละผลิตภัณฑ์ของ  $AlPO_4 \cdot 3H_2O$  ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่ายโดยมี  $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$  และ  $Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$  เป็นสารตั้งต้น

ครั้งที่	สารตั้งต้น $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (g)	น้ำหนักของ สารที่ได้จาก ทางทฤษฎี (g)	น้ำหนักของ สารที่ได้จาก การทดลอง (g)	ร้อยละ ผลิตภัณฑ์ของ $AlPO_4 \cdot 3H_2O$	ร้อยละ ผลิตภัณฑ์ เฉลี่ย
1	37.50	17.60	13.56	77.05	77.39
2	37.50	17.60	13.41	76.19	
3	37.50	17.60	13.89	78.92	

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 ร้อยละผลิตภัณฑ์เฉลี่ยของ  $AlPO_4 \cdot 3H_2O$  ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่ายมีค่าเท่ากับ 77.39 และน้ำหนักของ  $AlPO_4 \cdot 3H_2O$  ที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักที่ได้จากทางทฤษฎี ทั้งนี้อาจเกิดจากกระบวนการในการทำการทดลอง ขั้นตอนการล้างตะกอน ซึ่งส่งผลให้สูญเสียผลิตภัณฑ์ไปบางส่วน รวมถึงการควบคุมสภาวะของการทดลอง เช่น อุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่าง ก็ต่างส่งผลต่อร้อยละการผลิตเช่นกัน

**ตารางที่ 4.2** ร้อยละผลิตภัณฑ์ของ  $AlPO_4$  หลังจากนำ  $AlPO_4 \cdot 3H_2O$  ไปเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

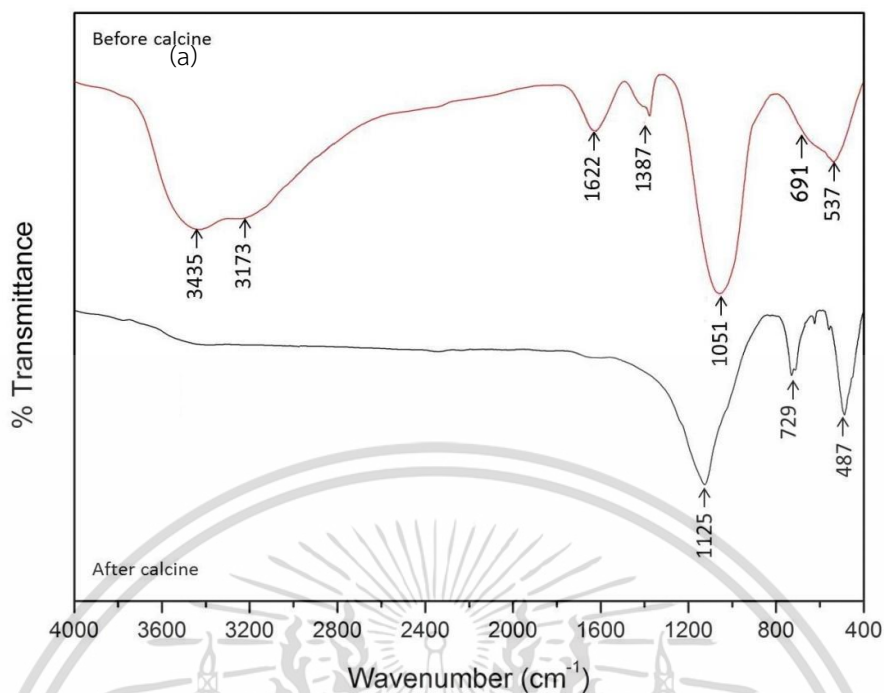
ครั้งที่	สารตั้งต้น $AlPO_4 \cdot 3H_2O$ (g)	น้ำหนักของสารที่ได้จากทางทฤษฎี (g)	น้ำหนักของสารที่ได้จากการทดลอง (g)	ร้อยละผลิตภัณฑ์ของ $AlPO_4$	ร้อยละผลิตภัณฑ์เฉลี่ย
1	13.02	9.02	8.04	89.14	89.84
2	13.02	9.02	8.17	90.58	
3	13.02	9.02	8.10	89.80	

จากตารางที่ 4.2 ร้อยละผลิตภัณฑ์เฉลี่ยของ  $AlPO_4$  ที่ได้หลังจากนำ  $AlPO_4 \cdot 3H_2O$  ไปเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 89.84 ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์บางส่วนอาจสูญเสียไประหว่างการเปลี่ยนภาชนะบรรจุ

## 4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณสมบัติของอะลูมิเนียมฟอสเฟต

4.2.1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $AlPO_4$ ) โดยการวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

การวิเคราะห์ หมู่ฟังก์ชันของอะลูมิเนียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้ โดยการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) 4000 ถึง  $400\text{ cm}^{-1}$  แสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 สเปกตรัม FTIR ของอะลูมิเนียมฟอสเฟต (a) ก่อนเผา ( $\text{AlPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) (b) หลังเผา ( $\text{AlPO}_4$ )

จากภาพที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบแถบการสั่นของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ก่อนเผาและหลังเผา พบว่าอะลูมิเนียมฟอสเฟตทั้งก่อนเผาและหลังเผามีแถบการสั่นของ  $\text{PO}_2$ ,  $\text{AlO}$  และ  $\text{AlOP}$  ปรากฏขึ้นโดยมีเลขคลื่นประมาณ  $1050 - 1130 \text{ cm}^{-1}$ ,  $691 \text{ cm}^{-1}$  และ  $800 - 400 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งแถบการสั่นเหล่านี้เป็นแถบการสั่นสำคัญที่ยืนยันว่าสารที่สังเคราะห์ได้เป็นอะลูมิเนียมฟอสเฟต ในส่วนของอะลูมิเนียมฟอสเฟตก่อนเผา พบว่ามีแถบการสั่นของ  $\text{POH}$  ปรากฏขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ  $3400 \text{ cm}^{-1}$  แถบการสั่นของน้ำปรากฏขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ  $3170 \text{ cm}^{-1}$  และ  $1620 \text{ cm}^{-1}$  และแถบการสั่นของ  $\text{NH}_2$  ซึ่งเกิดจากสารแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับ pH ขณะทำการสังเคราะห์สารปรากฏขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ  $1400 \text{ cm}^{-1}$

จากภาพที่ 4.1 สามารถอธิบายแถบการสั่นและรูปแบบการสั่นของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ก่อนเผาและหลังเผาได้ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.3** แถบการสั่นและรูปแบบการสั่นของอะลูมิเนียมฟอสเฟตก่อนเผา ( $\text{AlPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่ายโดยมี  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  เป็นสารตั้งต้น

แถบการสั่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	รูปแบบการสั่น
3435	การสั่นแบบยืดหดของ $\text{POH}$
3173	การสั่นแบบยืดหดของโมเลกุลน้ำ
1622	การสั่นแบบโค้งงอของโมเลกุลน้ำ
1387	การสั่นแบบโค้งงอของ $\text{NH}_2$
1051	การสั่นแบบยืดหดของ $\text{PO}_2$
691	การสั่นแบบยืดหดของ $\text{AlO}$
537	การสั่นแบบยืดหดของ $\text{AlOP}$

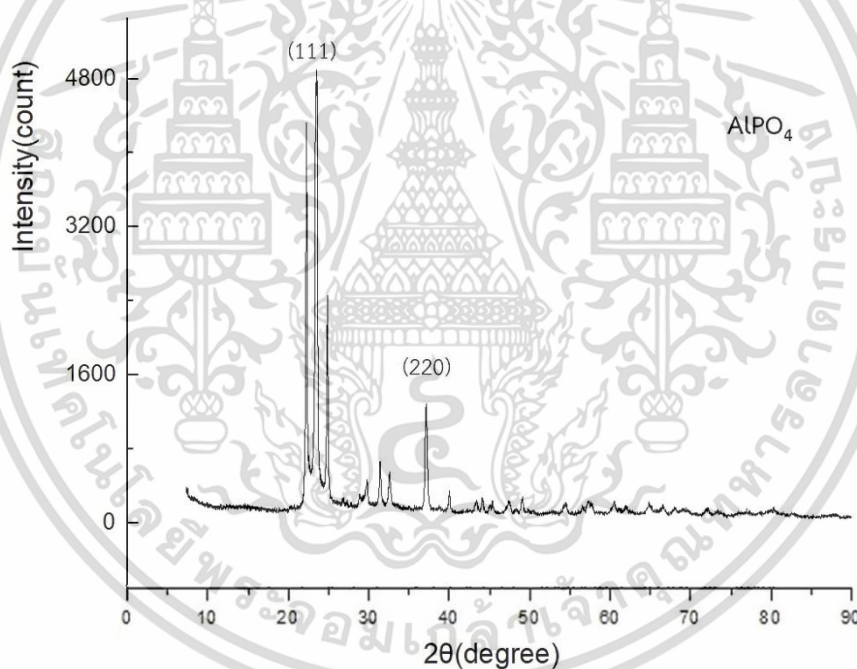
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แถบการสั่นและรูปแบบการสั่นของอะลูมิเนียมฟอสเฟตหลังเผา ( $\text{AlPO}_4$ ) ที่ได้จากนำ  $\text{AlPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ไปเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

แถบการสั่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	รูปแบบการสั่น
1125	การสั่นแบบยืดหดของ $\text{PO}_2$
729	การสั่นแบบยืดหดของ $\text{AlO}$
487	การสั่นแบบยืดหดของ $\text{AlOP}$

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) ที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) โดยทำการสแกนที่มุม  $2\theta$  ในช่วงตำแหน่งมุมระหว่าง  $10 - 90$  องศา รูปแบบ XRD ของอะลูมิเนียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้แสดงดังภาพที่ 4.2



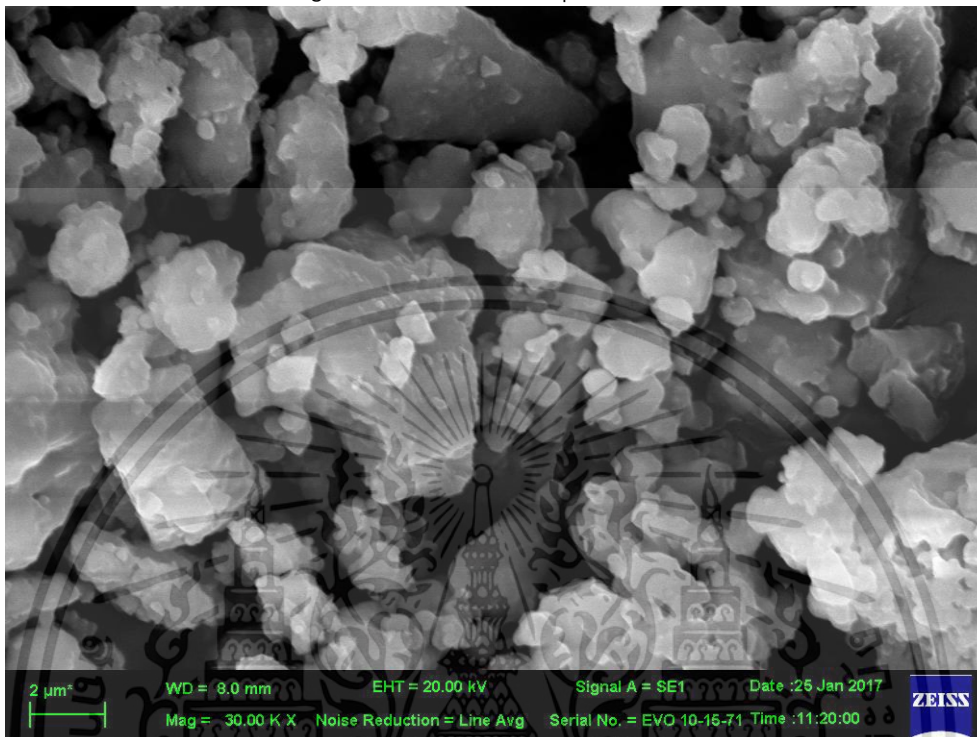
ภาพที่ 4.2 รูปแบบ XRD ของอะลูมิเนียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้ ( $\text{AlPO}_4$ )

จากภาพที่ 4.2 รูปแบบ XRD ของอะลูมิเนียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้ มีพีคปรากฏขึ้นชัดเจนที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $20.3$   $21.5$   $23.0$  และ  $35.5$  องศา โดยพีคที่ปรากฏมีลักษณะแหลม มีความเข้มสูง แสดงให้เห็นว่าอะลูมิเนียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นผลึกและมีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ สารที่สังเคราะห์ได้เป็นอะลูมิเนียมฟอสเฟต รูปแบบไทรดีไมท์ และมีระบบผลึกแบบ Orthorhombic ซึ่งผลที่ได้นี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Suochang Xu, 2016 [36] ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) แสดงดังภาพที่ 4.3

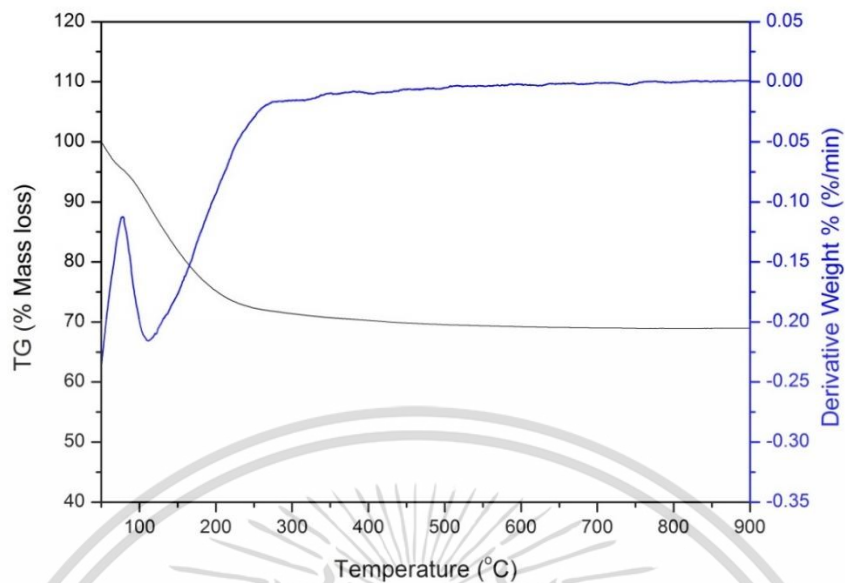


ภาพที่ 4.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 30000 เท่า

จากภาพที่ 4.3 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 30000 เท่า พบว่าอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่าย (precipitation) โดยใช้อะลูมิเนียมไนเตรตโนนะไฮเดรต ( $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเฮปตะไฮเดรต ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) เป็นสารตั้งต้น มีรูปร่างและขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกันและมีลักษณะโครงสร้างแบบผลึก

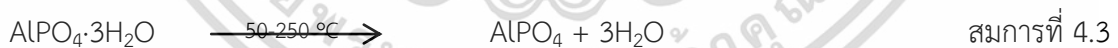
#### 4.2.4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA (Thermal Gravimetric Analysis, TGA)

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ที่สังเคราะห์ได้ โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แสดงข้อมูลดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 เทอร์โมแกรม TGA ของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )

จากภาพที่ 4.4 แสดงการสลายตัวทางความร้อนของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ พบว่าอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ที่สังเคราะห์ได้มีการสลายตัวทางความร้อน 2 ช่วง โดยช่วงแรกมีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 50 – 100 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักประมาณร้อยละ 4 ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของน้ำจากความชื้นบนพื้นผิว และช่วงที่สองมีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 100 – 300 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักประมาณร้อยละ 30 เมื่อคำนวณจากน้ำหนักที่เปลี่ยนไปพบว่าเป็นจากการสลายตัวของน้ำที่อยู่ในอนุภาคของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 650 องศาเซลเซียส น้ำหนักของสารไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมินี้เป็นอุณหภูมิที่เสถียร และไม่ทำให้โครงสร้างของสารมีการสลายตัวมากเกินไป ดังนั้นใน การทดลองจึงใช้ อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ในการกำจัดโมเลกุลของน้ำออกจากโครงสร้าง  $\text{AlPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ได้เป็น  $\text{AlPO}_4$  สำหรับสมการการสลายตัวที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



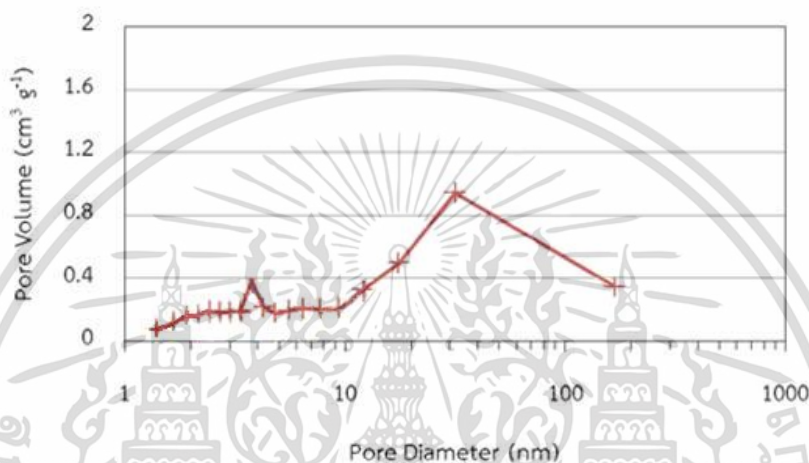
#### 4.2.5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิคบีอีที (Brunauer–Emmett–Teller, BET)

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของอะลูมิเนียมฟอสเฟต โดยใช้เทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) ทั้งทางกายภาพและทางเคมี ร่วมกับสมการของ Brunauer–Emmett–Teller หรือ BET ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ )

ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	ขนาดรูพรุน (nm)	ปริมาตรรูพรุน ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )
$\text{AlPO}_4$	166.40	20.64	0.77

จากตารางที่ 4.5 อะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่าย (precipitation) โดยใช้อะลูมิเนียมไนเตรตโนนไฮเดรต ( $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) และโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต เฮปตะไฮเดรต ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) เป็นสารตั้งต้น มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 166.40 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุน 20.64 นาโนเมตร และปริมาตรรูพรุน 0.77 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งการที่สารมีพื้นที่ผิวมากจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับดีขึ้นด้วย นอกจากนี้การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) ที่สังเคราะห์ได้ แสดงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 กระจายตัวของรูพรุนของอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ )

จากภาพที่ 4.5 อะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) ที่สังเคราะห์ได้ มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุน 2 ขนาดคือรูพรุนแบบไมโครพอร์ (Micropore) และ เมโซพอร์ (Mesopore) การกระจายตัวของขนาดรูพรุน ทั้งแคบและกว้างนี้ยังส่งผลให้อะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $\text{AlPO}_4$ ) มีความสามารถในการดูดซับดีขึ้นอีกด้วย

### 4.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

#### 4.3.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีด้วยอะลูมิเนียมฟอสเฟต

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีโดยอะลูมิเนียมฟอสเฟตเป็นตัวดูดซับ ปัจจัยดังกล่าว ได้แก่ ความเร็วรอบในการเขย่าขณะดูดซับ ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ และปริมาณอะลูมิเนียมฟอสเฟตที่ใช้ในการดูดซับ เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการดูดซับทำการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ ( $q_e$ ) กับความเข้มข้นหลังการดูดซับ ( $C_e$ ) และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับกับปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ จากการศึกษาที่แสดงดังตาราง 4.6, 4.7 และ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ โดยใช้การออกแบบการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักสังกะสี

Condition	$C_e$	$q_e$	%ad
(1) 10 ppm + 0.025 % + 140 rpm	3.65	6.35	63.53%
(2) 10 ppm + 0.025 % + 180 rpm	2.57	7.43	74.33%
(3) 10 ppm + 0.1 % + 140 rpm	3.01	6.99	69.88%
(4) 10 ppm + 0.1 % + 180 rpm	1.88	8.12	81.21%
(5) 50 ppm + 0.025 % + 140 rpm	29.25	20.75	41.50%
(6) 50 ppm + 0.025 % + 180 rpm	28.19	21.82	43.63%
(7) 50 ppm + 0.1 % + 140 rpm	27.16	22.85	45.69%
(8) 50 ppm + 0.1 % + 180 rpm	24.07	25.93	51.86%

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ โดยใช้การออกแบบการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักนิกเกิล

Condition	$C_e$	$q_e$	%ad
(1) 10 ppm + 0.025 % + 140 rpm	3.33	6.67	66.73%
(2) 10 ppm + 0.025 % + 180 rpm	2.17	7.83	78.31%
(3) 10 ppm + 0.1 % + 140 rpm	2.57	7.43	74.29%
(4) 10 ppm + 0.1 % + 180 rpm	1.33	8.67	86.74%
(5) 50 ppm + 0.025 % + 140 rpm	28.11	21.89	43.78%
(6) 50 ppm + 0.025 % + 180 rpm	26.70	23.31	46.61%
(7) 50 ppm + 0.1 % + 140 rpm	25.84	24.16	48.32%
(8) 50 ppm + 0.1 % + 180 rpm	23.91	26.09	52.18%

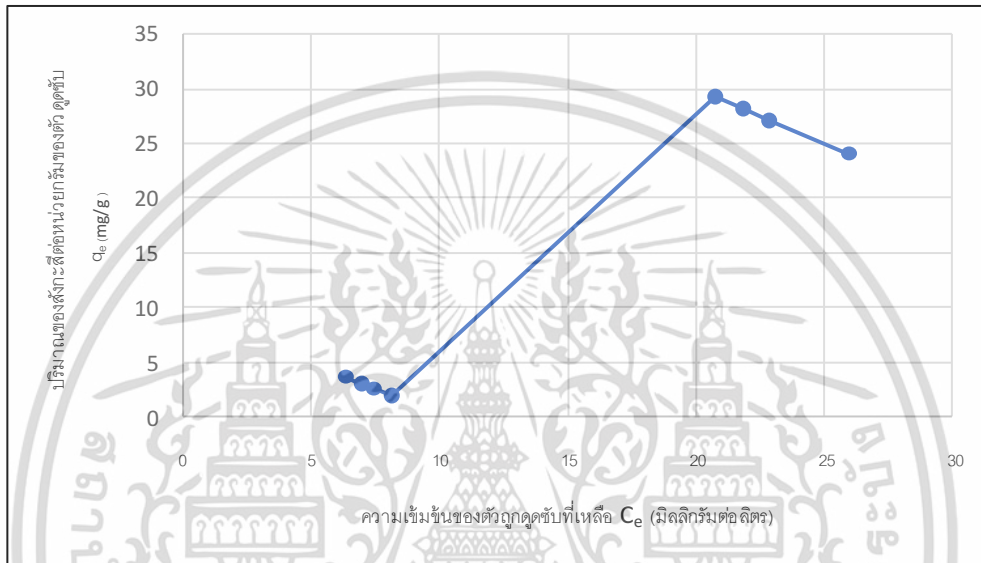
ตารางที่ 4.8 ข้อมูลการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ โดยใช้ การออกแบบการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่ว

Condition	$C_e$	$q_e$	%ad
(1) 10 ppm + 0.025 % + 140 rpm	2.96	7.04	70.36%
(2) 10 ppm + 0.025 % + 180 rpm	1.75	8.25	82.48%
(3) 10 ppm + 0.1 % + 140 rpm	2.19	7.81	78.14%
(4) 10 ppm + 0.1 % + 180 rpm	1.07	8.93	89.30%
(5) 50 ppm + 0.025 % + 140 rpm	27.01	22.99	45.99%
(6) 50 ppm + 0.025 % + 180 rpm	25.63	24.38	48.75%
(7) 50 ppm + 0.1 % + 140 rpm	25.24	24.76	49.52%
(8) 50 ppm + 0.1 % + 180 rpm	23.45	26.55	53.10%

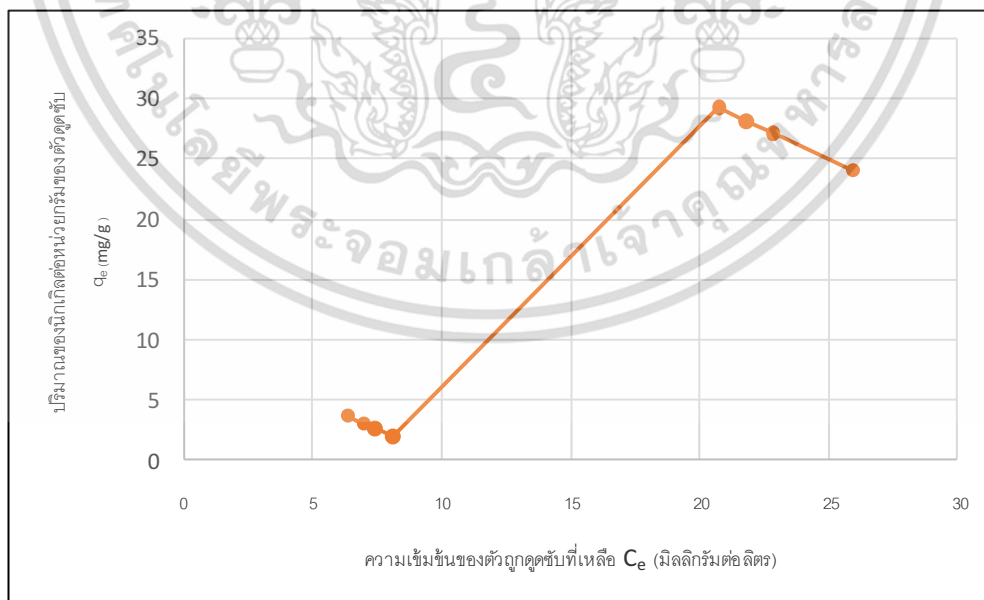
เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.1 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับจากปัจจัยทั้ง 3 คือ ความเข้มข้นโลหะหนัก ปริมาณอลูมิเนียมฟอสเฟต และ ความเร็วรอบการเขย่า จากการใช้การออกแบบประสิทธิภาพโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์แบบ 2K แฟกทอเรียล (2K Factorial) โดยในการศึกษานี้จะดูจากค่าสูงต่ำตามการทดลองแบบแฟกทอเรียล จะเห็นว่า เรานำค่าความเข้มข้นโลหะหนักต่ำที่ 10 ppm และสูง 50 ppm นำค่าปริมาณที่ใส่อลูมิเนียมฟอสเฟตค่าที่ต่ำ 0.025% และสูง 0.1% และนำค่าความเร็วรอบในการเขย่าที่ต่ำคือ 140 rpm และสูง 180 rpm มาคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล  $q_e$  (มิลลิกรัมต่อกรัมตัดดูดซับ) ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือที่สภาวะสมดุล  $C_e$  และหาประสิทธิภาพการดูดซับของอลูมิเนียมฟอสเฟต โดยผลการทดลองที่ได้จะได้ดังภาพที่ 4.6 4.7 และ 4.8

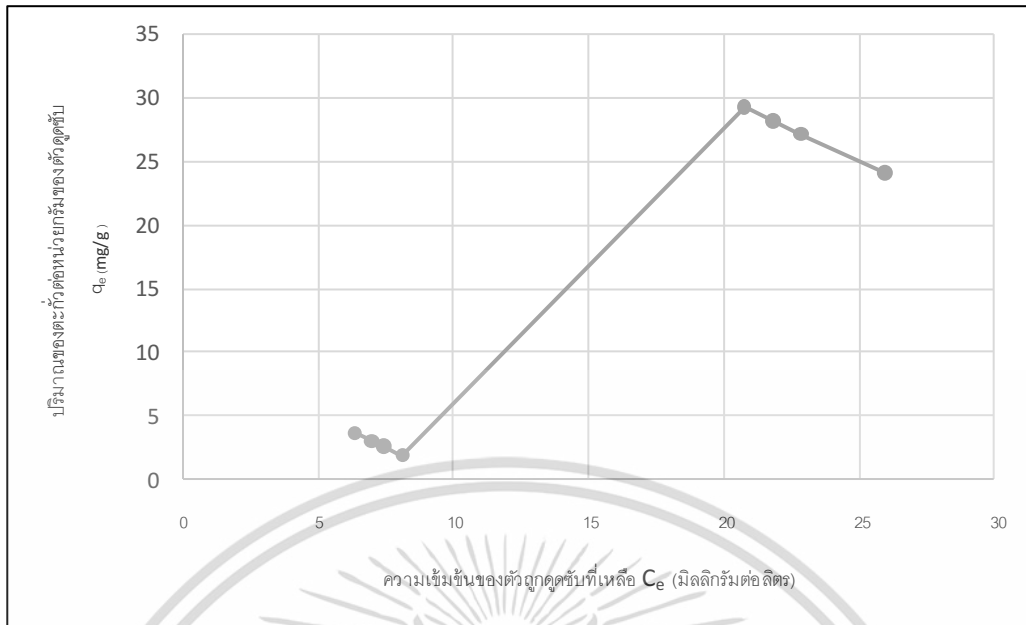


ภาพที่ 4.6 ไอโซเทอมการดูดซับสังกะสีจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ตามการออกแบบประสิทธิภาพแบบ 2K Factorial



ภาพที่ 4.7 ไอโซเทอมการดูดซับนิกเกิลจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ตามการออกแบบประสิทธิภาพแบบ 2K Factorial

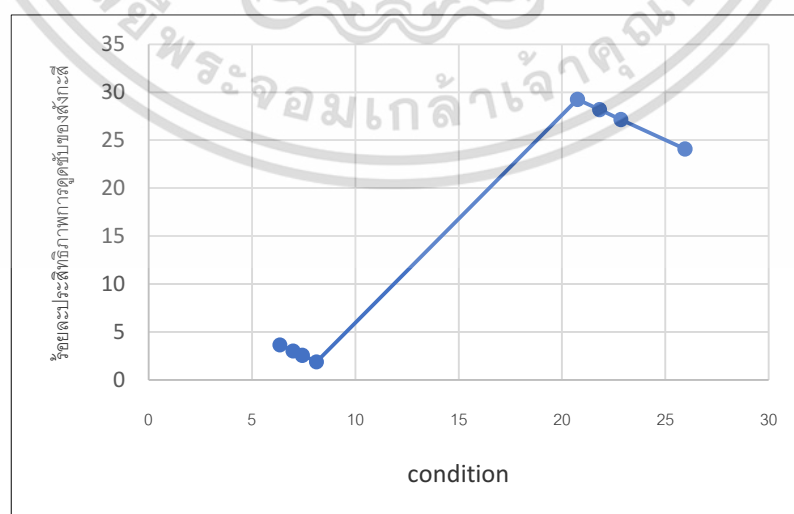
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.8 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ตามการออกแบบประสิทธิภาพแบบ 2K Factorial

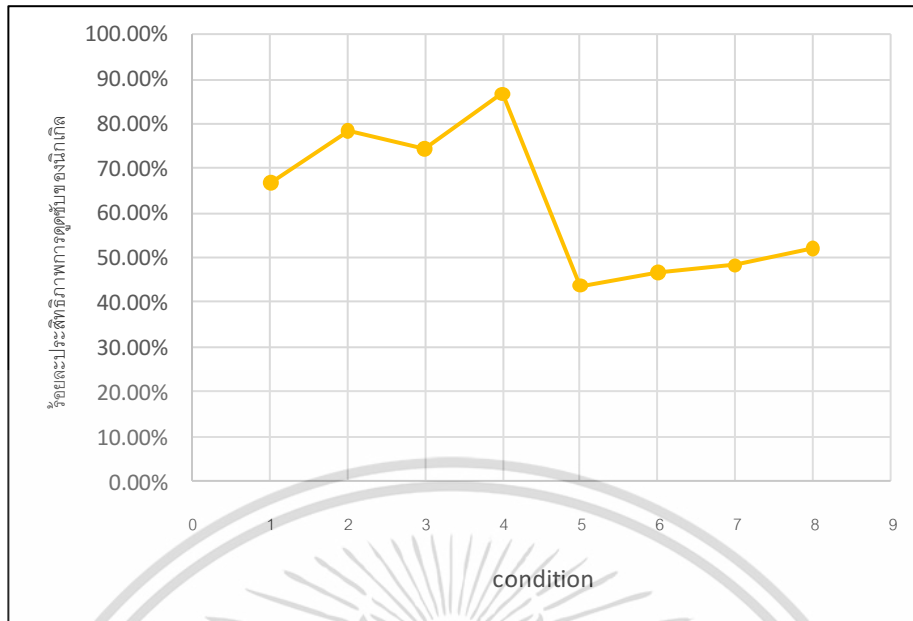
จากข้อมูลการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับของสังกะสี ตะกั่ว และนิกเกิล จากปัจจัยทั้ง 3 คือ ความเข้มข้นของโลหะหนัก ปริมาณของอลูมิเนียมฟอสเฟต และความเร็วรอบในการดูดซับโลหะหนัก ดังภาพที่ 4.6 4.7 และ 4.8 ได้ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับโลหะหนักมีแนวโน้มด้านปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับไปในทิศทางเดียวกัน

จากข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับจากการศึกษาปัจจัยทั้ง 3 พร้อมกัน ของโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และนิกเกิล ได้มีการคำนวณร้อยละประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยอลูมิเนียมฟอสเฟตจากสภาวะปัจจัยที่แตกต่างกัน สร้างกราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง ประสิทธิภาพการดูดซับกับสภาวะต่าง ๆ ของปัจจัย คือ ความเข้มข้นของโลหะหนัก ปริมาณอลูมิเนียมฟอสเฟต และ ความเร็วรอบการเขย่า ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับจะแสดงดังภาพ 4.9 4.10 และ 4.11

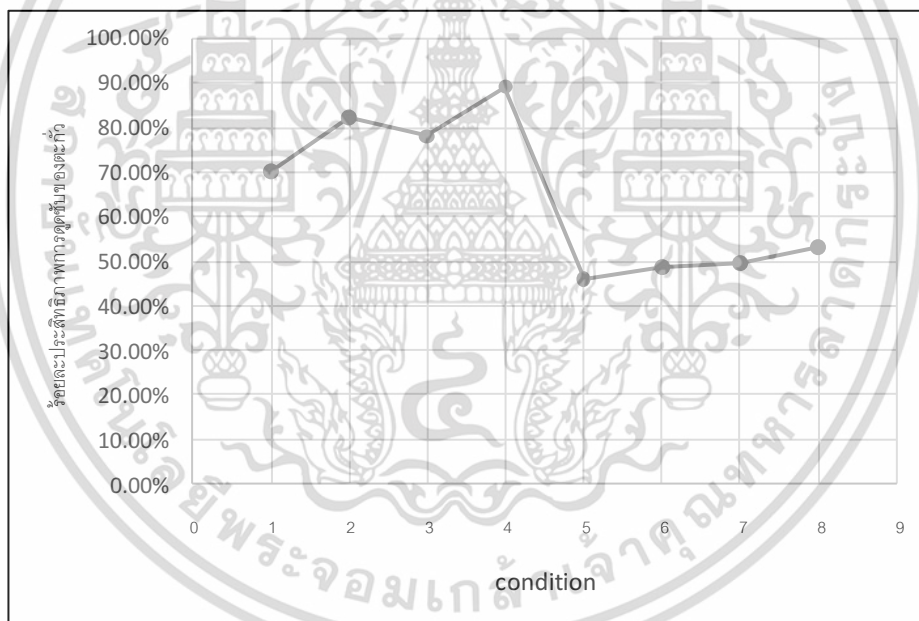


ภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ตามการออกแบบประสิทธิภาพแบบ 2K Factorial

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ตามการออกแบบประสิทธิภาพแบบ 2K Factorial



ภาพที่ 4.11 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ตามการออกแบบประสิทธิภาพแบบ 2K Factorial

พบว่าสถานะของสารขวดที่ 4 ที่มีการใส่ความเข้มข้นโลหะหนัก 10 ppm ปริมาณอลูมิเนียมฟอสเฟต 0.1 % และมีการเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 rpm มีการดูดซับโลหะหนักทั้งสังกะสี นิกเกิลตะกั่ว ได้มากที่สุด ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักที่ดีที่สุดของ สังกะสี นิกเกิล และ ตะกั่ว คือ 81.21% 86.74% และ 89.30% ตามลำดับ โดยจะพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการเขย่ามากยิ่งขึ้น ปริมาณการดูดซับโลหะหนักต่อกรัมตัวดูดซับจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเขย่าจะขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film Diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore Diffusion) หากมีความปั่นกววนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับ จะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านชั้นไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มนั้นส่งผลให้ตัวดูดซับสามารถดูดซับโลหะหนักได้น้อย จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับนั้นลดลงด้วย ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ยังส่งผลให้มีประสิทธิภาพการดูดซับมากที่สุดในค่าความเข้มข้นที่น้อยและค่อย ๆ ลดลงเมื่อความเข้มข้นมาก พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียมฟอสเฟตที่ใช้ในการดูดซับมากยิ่งขึ้น และปริมาณการดูดซับโลหะหนักต่อกรัมตัวดูดซับจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีพื้นผิวและรูพรุนในการดูดซับโลหะหนักมากขึ้น

จากข้อมูลการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ โดยใช้การออกแบบการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก ของแต่ละชนิดแบบ 2K แฟกทอเรียล ได้ผลสรุปการทำนายหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับของสังกะสี นิกเกิล และตะกั่ว ดังนี้

จากตารางที่ 4.6 การทำนายหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับของโลหะหนักสังกะสี

%ad	=	$20.95 + 0.3282(A) + 108.1(B) + 0.3271(C) - 4.815(A*B) - 0.006150(A*C) - 0.1158(B*C) + 0.02925(A*B*C)$
%ad	=	$22.48 + 0.2217(A) + 72.13(B) + 0.3373(C) - 1.193(A*B) - 0.005502(A*C) + 0.2767(B*C) + 0.001333(A*B*C)$
%ad	=	$21.26 + 0.2971(A) + 183.5(B) + 0.3732(C) - 3.493(A*B) - 0.006221(A*C) - 0.4683(B*C) + 0.01483(A*B*C)$

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักผสมของสังกะสี ตะกั่ว และนิกเกิล โดยผสมในอัตราส่วนความเข้มข้น 1:1 ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักแต่ละ ชนิดเท่ากับ 10 ppm โดยใช้ตัวอะลูมิเนียมฟอสเฟต 0.1 (%wt/v) เขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45 นาที ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสี ตะกั่ว และนิกเกิล แบบผสมตามข้อมูลดังตาราง

ตาราง 4.9 ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสี ตะกั่ว และนิกเกิลแบบน้ำเสียผสม

ชนิดโลหะหนัก	$C_e$	$q_e$	%adsorption
สังกะสี	2.892	7.108	71.08
นิกเกิล	2.223	7.777	77.77
ตะกั่ว	1.598	8.402	84.02

พบว่าโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และนิกเกิลในน้ำเสียผสม ที่อุณหภูมิห้อง มีประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลได้ดีที่สุด ตามด้วยตะกั่ว และสังกะสี ที่ร้อยละ 84.02 77.77 และ 71.08 ตามลำดับ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการดูดซับตะกั่วในสารละลายเลด (II)ไนเตรท การดูดซับ นิกเกิล ในสารละลาย นิกเกิล (II)ไนเตรท และการดูดซับสังกะสีในสารละลายซิงค์ (II)ไนเตรท โดยใช้ตัวดูดซับคือ อะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $AlPO_4$ ) ที่สังเคราะห์จาก  $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$  เป็นสารตั้งต้นและ  $Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$  เป็นแหล่งฟอสเฟต จากการทดลองพบว่า อะลูมิเนียมฟอสเฟต สามารถดูดซับตะกั่ว นิกเกิล และสังกะสีได้ดีที่สุดที่ความเร็วในการเขย่า 180 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 45 นาที ความเข้มข้น 10 ppm และปริมาณของตัวดูดซับคือ 0.10 กรัมต่อปริมาตรและ ในน้ำเสียผสมนิกเกิลจะถูกดูดซับได้ดีกว่าตัวอื่นๆ จากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) พบว่า อะลูมิเนียมฟอสเฟต มีโครงสร้างเป็นแบบผลึก และจากการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวดูดซับด้วยวิธี BET พบว่า อะลูมิเนียมฟอสเฟต มีขนาดรูพรุน 20.64 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิว 166.40 ตารางเมตรต่อกรัม จะเห็นว่าอะลูมิเนียมฟอสเฟตมีขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวมาก ทำให้ความสามารถในการดูดซับตะกั่ว นิกเกิลและสังกะสีได้มาก เนื่องจากอนุภาคของโลหะหนักเข้าไปยึดเกาะในรูพรุนและบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้ อะลูมิเนียมฟอสเฟต เป็นตัวดูดซับที่ดีคือ โครงสร้างที่เป็นผลึก ดังนั้นจะเห็นว่าขนาดรูพรุน พื้นที่ผิว การกระจายตัวของขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวและความเป็นผลึกของตัวดูดซับ เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล และสังกะสี บนอะลูมิเนียมฟอสเฟต

จากการศึกษาการออกแบบการทดลองแบบ 2k แฟกทอเรียล โดยการนำข้อมูลของไอโซเทอมการดูดซับมาใช้ในการคำนวณ ประสิทธิภาพการดูดซับของโลหะหนัก ได้ผลสรุปของการทำนายสมการการออกแบบ 2k แฟกทอเรียลของโลหะหนักของ ตะกั่ว สังกะสี และนิกเกิลดังนี้

การทำนายหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับของโลหะหนักสังกะสี

$$\%ad = 20.95 + 0.3282(A) + 108.1(B) + 0.3271(C) - 4.815(A*B) - 0.006150(A*C) - 0.1158(B*C) + 0.02925(A*B*C)$$

การทำนายหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับของโลหะหนักนิกเกิล

$$\%ad = 22.48 + 0.2217(A) + 72.13(B) + 0.3373(C) - 1.193(A*B) - 0.005502(A*C) + 0.2767(B*C) + 0.001333(A*B*C)$$

การทำนายหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับของโลหะหนักตะกั่ว

$$\%ad = 21.26 + 0.2971(A) + 183.5(B) + 0.3732(C) - 3.493(A*B) - 0.006221(A*C) - 0.4683(B*C) + 0.01483(A*B*C)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่าการทำนายสมการการหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับของโลหะหนักของตะกั่ว นิกเกิล และสังกะสีด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการคำนวณจากการทดลองด้วยตนเอง ผลของการคำนวณทั้งสองให้ข้อมูลสอดคล้องกันคือ ความเร็วในการเขย่า 180 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 45 นาที ความเข้มข้น 10 ppm และปริมาณของตัวดูดซับคือ 0.10 กรัมต่อปริมาตร ส่งผลให้อะลูมิเนียมฟอสเฟตสามารถดูดซับตะกั่ว นิกเกิล และสังกะสีได้ดีที่สุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นไม่ได้มีแค่การปนเปื้อนของตะกั่ว สังกะสี และนิกเกิลเพียงสามชนิดแต่ยังมีการปนเปื้อนโลหะหนักอื่นๆ อีกด้วย ดังนั้นจึงควรทดสอบตัวดูดซับ  $AlPO_4$  ให้ดูดซับโลหะหนักตัวอื่นๆด้วย

5.2.2 นอกจากความเข้มข้น เวลา ความเร็วในการเขย่าและปริมาณของตัวดูดซับที่เป็นปัจจัยต่อการดูดซับแล้ว อาจยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ เช่น pH อุณหภูมิ เป็นต้น ดังนั้นจึงควรศึกษาปัจจัยอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักที่ดีที่สุด

5.2.3 การอบตัวดูดซับเพื่อไล่ความชื้นที่อยู่ในรูพรุนออกนั้นจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพตัวดูดซับให้สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีมากยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] พรพรรณ พนาปวุฒิกุล. 2549. โลหะหนักตัวการปัญหาสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- [2] ชาริณี โทหนอง และสุนิสา ทรัพย์ธีระโชติ. 2557. “การดูดซับโลหะหนักด้วยอะลูมิเนียมฟอสเฟต.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] **ปุ๋ยฟอสเฟต.** [online]. Available : <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/1198->
- [4] วรชาติ วิศวะพิพนธ์. 2555. “เทคโนโลยีการบำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวัสดุฟอสเฟต.” แก่นเกษตร. 40 : 337-378.
- [5] วิทยา มะเสนา. 2531. “การใช้หินฟอสเฟตแทนปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัส.” เคหการเกษตร. 12 : 88-92.
- [6] **การดูดซึมสารตะกั่ว.** [online]. Available : [http://siamhealth.net/public\\_html/environment/lead.htm#.WJlytDuLTIV](http://siamhealth.net/public_html/environment/lead.htm#.WJlytDuLTIV)
- [7] ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2543. การค้นพบตะกั่ว. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [8] **ประโยชน์และโทษของนิกเกิล.** [online]. Available : <http://www.siamchemi.com/Nickle>
- [9] **คลังความรู้ Scimathสังกะสีและแคดเมียม.** [Online]. Available : <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/1897-?groupid=295>
- [10] เกรียงศักดิ์ อุดมศิลป์โรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : มิตรนราการพิมพ์
- [11] เดชา ฉัตรศิริเวช. 2552. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [12] **กลไกกระบวนการดูดซับ** [online]. Available : <https://pradthana.wordpress.com/tag/การดูดซับ>
- [13] กระบวนการดูดซับ [online] Available : [www.carit.rmutk.ac.th/Ebook2017/Book/eb590577/eb590577/assets/](http://www.carit.rmutk.ac.th/Ebook2017/Book/eb590577/eb590577/assets/)
- [14] บุญชัย โชติวิริยาณิชย์. 2533. “การปรับปรุงสมการความสัมพันธ์ของการดูดซับก๊าซผสมโดยวิธีทางเทอร์โมไดนามิกส์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [15] ศิริโรจน์ ศรีเกษเพ็ชร. 2543. “การดูดซับสารละลายโลหะหนักด้วยดินเหนียวและดินเหนียวปรับปรุง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [16] ภัทรพรรณ รักษาวิณ. 2550. “การบำบัดแอมโมเนียมอออนด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้า แกลบและตะกอนอนลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ .” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [17] อุไรพร ปุณณนิธิ. 2545. “การพัฒนาตัวดูดซับชีวภาพ โดยการตรึงซีวมวลสาหร่ายทะเลสีน้ำตาลด้วยไคโตแซนเพื่อการกำจัดแคดเมียม .” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [18] Lertijamrant, K. Prasertdam, P. Arai, M. and Panpranot, J. 2010. “Modification of Acid Properties and Catalytic Properties of  $AlPO_4$  by Hydrothermal Pretreatment for Methanol Dehydration to Dimethyl ether.” Applied Catalysis. 379 : 119-123.
- [19] Murayama, E. Arimura, K. Okajima, K. and Shibata, J. 2009. “Effect of Structure Directing Agent on  $AlPO_4$ -n Synthesis from Aluminium Doss.” Int.J. Miner. Process. 93 : 110-114.
- [20] Brinker, C.J. and Schrer, G.W. 1990. “Sol-Gel : The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing.” California : Academic Press.
- [21] El-Hakam, S.A. El-Khouly, A.A. and Khder, A.S. 1999. “Effect of Thermal Treatment on Varios Characteristics of Nikel/aluminium phosphate Catalysts.” Applied Catalysis A : General. 185 : 247-257.
- [22] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2551. พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [23] เครื่องตรวจวัดสเปกโตรสโกปีการสั่นแบบอินฟราเรด. [Online]. Available : <http://www.sec.psu.ac.th/home/ebook/sec-magazine-2557-04-ftir/sec-magazine-2557-04-ftir.pdf>
- [24] เครื่องมือวิเคราะห์ความเป็นผลึกโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์. [Online]. Available : <http://www.sec.psu.ac.th/home/ebook/sec-magazine-2557-04-ftir/sec-magazine-2557-04-ftir.pdf>
- [25] กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด(Scanning Electron Microscopy,SEM). [Online]. Available : <http://wwwmutphysicscom/charud/oldnews/SEM.pdf>
- [26] เครื่องวัดพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาครูพรุนโดยวิธีบีอีที(BET). [Online]. Available : [http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2550/ichem0850nt\\_ch2.pdf](http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2550/ichem0850nt_ch2.pdf)
- [27] สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. “การวิเคราะห์โดยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์.” [Online]. Available : <http://www.nst.or.th/article/article494/article49418.htm>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [28] เทคนิคการตรวจสอบเอกลักษณ์อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี [AAS].  
[Online]. Availabl :  
[http://archive.lib.cmu.c.th/full/T/2551/chem0451sk\\_ch1.pdf](http://archive.lib.cmu.c.th/full/T/2551/chem0451sk_ch1.pdf)
- [29] เทคนิคการตรวจสอบเอกลักษณ์อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี [AAS].  
[Online]. Available:  
[http://eresearch.library.ssu.ac.th/bitstream/123456789/329/10/ird\\_286\\_562\(9\).pdf](http://eresearch.library.ssu.ac.th/bitstream/123456789/329/10/ird_286_562(9).pdf)
- [30] การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำเสียการใช้เครื่อง AAS. [Online]. Available :  
<http://www2.diw.go.th/Research/เอกสารเผยแพร่/เครื่อง/AAS.pdf>
- [31] สาขาวิชาเคมี. 2554. เอกสารประกอบการเรียนเคมีอนินทรีย์ [Online]. Availabl :  
<http://www.mwit.ac.th/t2040113/InorganicChemistry.pdf>
- [32] Lin, L.C. Thirumavalavan, M. Wang, Y.T. and Lee, J.F. 2010. “Effect of preparation Conditions on the Adsorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solution by Mesoporous Silica Material Prepared Using Organic Template(CTAB).” *Journal of Chemical&Engineering Data*. 55 : 3667-3673
- [33] Jia, K. Pan, B. Zhang, Q. Zhang, W. Jiang, P. Hong, C. Pan, B. and Zhang, Q. 2008. “Adsorption of  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ , and  $Cd^{2+}$  from waters by amorphous titanium phosphate.” *Colloid and Interface Science*. 318 : 160-166.
- [34] ชไมพร คัมภีร์ชยา, ภัทรพร สุขสมกิจ และ สุธิชา หมุนมิตร. 2553. “การสังเคราะห์และการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารทวิโลหะแมกนีเซียม(II)โคบอลต์(II)ไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรต.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [35] Kanan, C. Muthuraja, K. and Devi, M.R. 2013. “hazardous dye removal from aqueous solution over mesoporousalumiophosphate with textural porosity by adsorption.” *Hazardous Meterial*. 244-245.
- [36] Suochang Xu 2016 “Investigation of water assisted phase transformation process from  $AlPO_4-5$  to  $AlPO_4$ -tridymite” [Online]. Available :  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387181115005922#fig1>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การสร้างกราฟมาตรฐาน (Standard Calibration Curve)

1) เตรียมสารละลายมาตรฐานเลข (II) ในเตรทที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ppm ปริมาตร 10 ml โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเลข (II) ในเตรท เข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 10 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐาน เลข (II) ในเตรท เข้มข้น 100 ppm จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเลข (II) ในเตรท

เข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 10 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานเลข (II) ในเตรทเข้มข้น 10 ppm จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเลข (II) ในเตรทเข้มข้น 10 ppm ปริมาตร 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

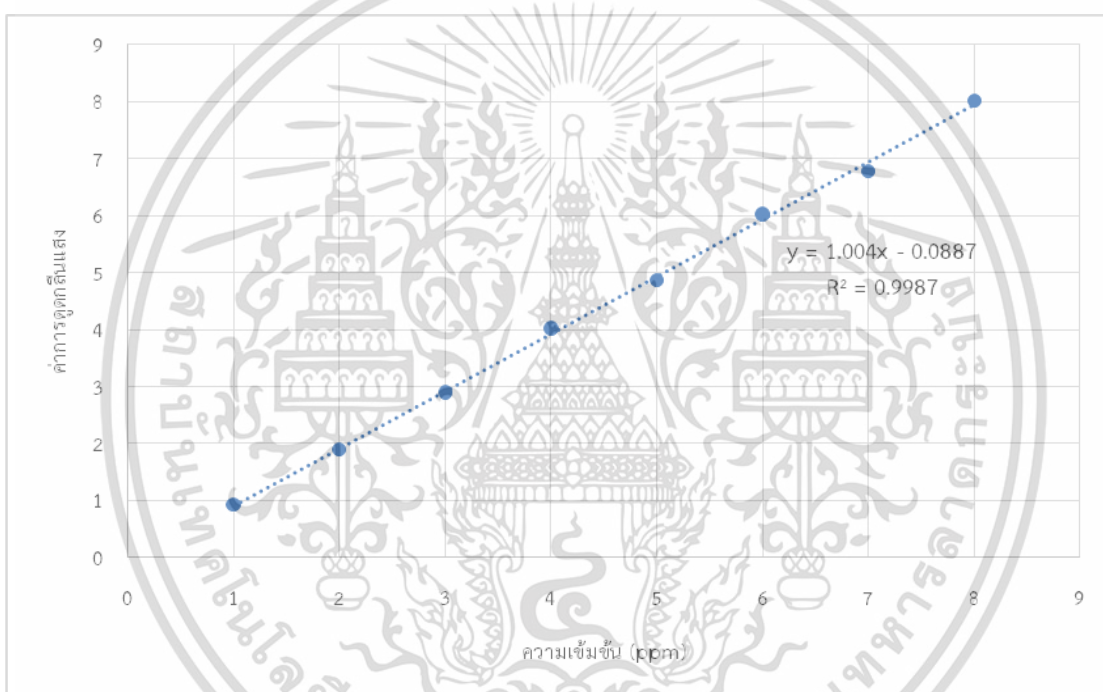
2) เตรียมสารละลายมาตรฐานนิกเกิล (II) ในเตรทที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ppm ปริมาตร 10 ml โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานนิกเกิล (II) ในเตรทเข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 10 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานนิกเกิล (II) ในเตรทเข้มข้น 100 ppm จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานนิกเกิล (II) ในเตรทเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 10 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานนิกเกิล (II) ในเตรทเข้มข้น 10 ppm จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานนิกเกิล (II) ในเตรทเข้มข้น 10 ppm ปริมาตร 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3) เตรียมสารละลายมาตรฐานซิงค์ (II) ในเตรทที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4 และ 1.6 ppm ปริมาตร 10 ml โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานซิงค์ (II) ในเตรทเข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 10 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานซิงค์ (II) ในเตรทเข้มข้น 100 ppm จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานซิงค์ (II) ในเตรทเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 10 ml ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานซิงค์ (II) ในเตรทเข้มข้น 10 ppm จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานซิงค์ (II) ในเตรทเข้มข้น 10 ppm ปริมาตร 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

4) นำสารละลายที่เตรียมได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ซึ่งทำการวัดตะกั่วที่ความยาวคลื่น 217 นาโนเมตร วัดนิกเกิลที่ความยาวคลื่น 232 นาโนเมตร และ วัดสังกะสีที่ความยาวคลื่น 213.86 นาโนเมตร

ตารางที่ ก1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายเลด(II)ไนเตรท

ความเข้มข้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)
1	0.925
2	1.895
3	2.896
4	4.025
5	4.864
6	6.025
7	6.782
8	8.021

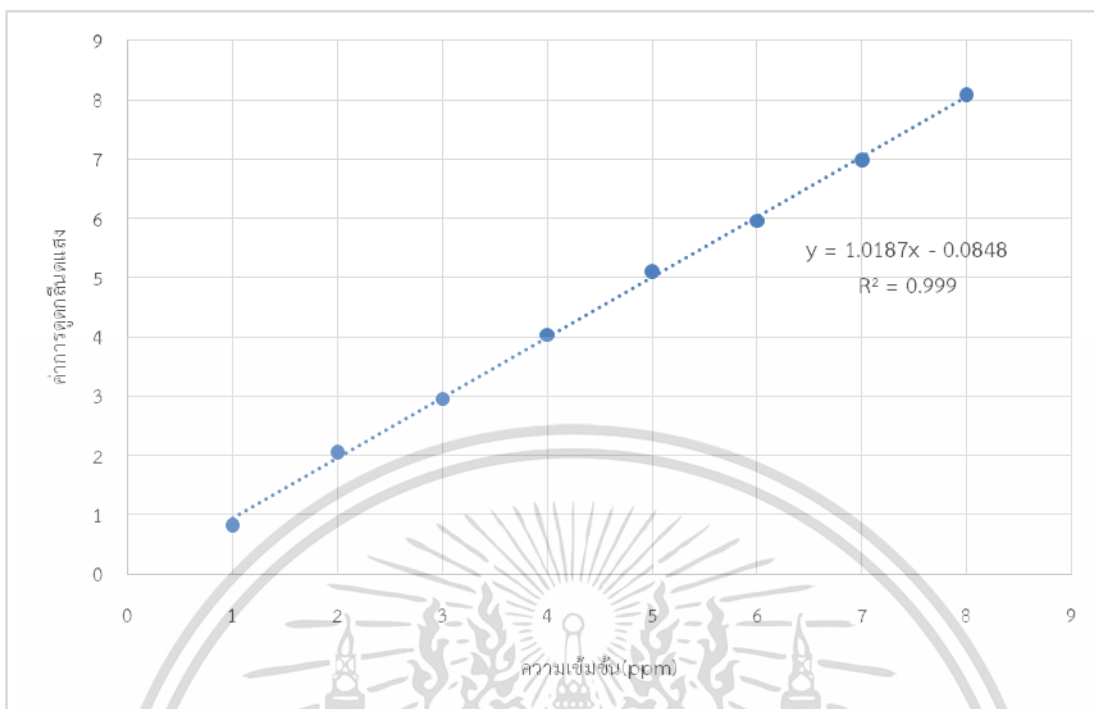


ภาพที่ ก1 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายเลด(II)ไนเตรท

ตารางที่ ก2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายนิกเกิล(II)ไนเตรท

ความเข้มข้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)
1	0.825
2	2.055
3	2.954
4	4.028
5	5.103
6	5.954
7	6.988
8	8.086

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

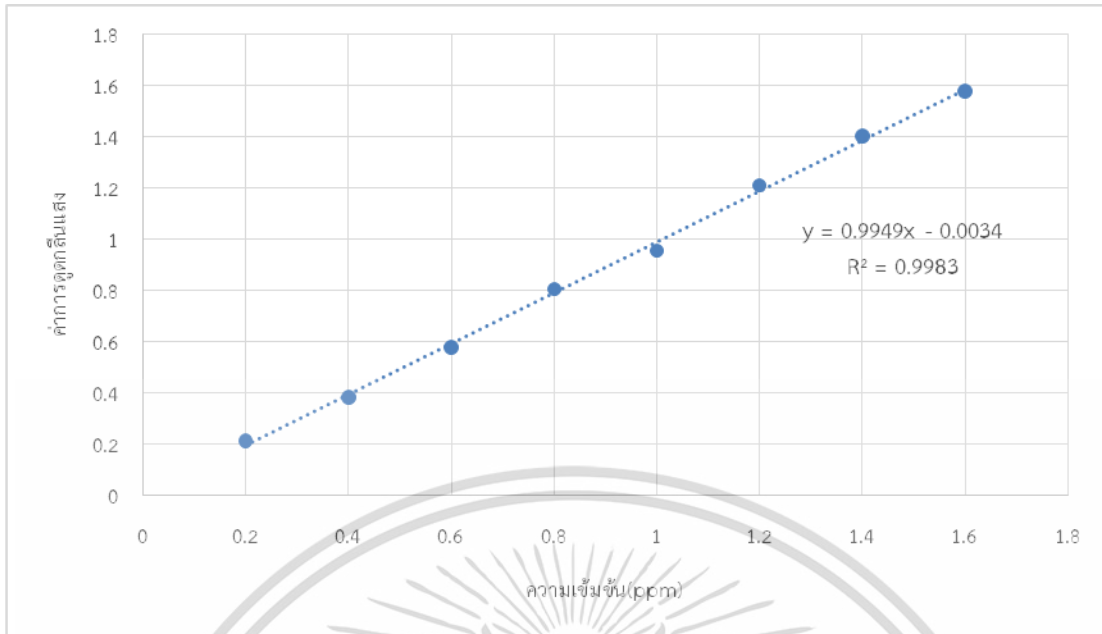


ภาพที่ ก2 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลาย  
นิกเกิล(II)ไนเตรท

ตารางที่ ก3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายซิงค์(II)ไนเตรท

ความเข้มข้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)
0.2	0.213
0.4	0.385
0.6	0.579
0.8	0.806
1	0.956
1.2	1.213
1.4	1.405
1.6	1.579

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก3 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายซิงค์ (II) ในเตรท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### การคำนวณ

1. การคำนวณหาน้ำหนักสารของ  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$   
 น้ำหนักสาร  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$

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

เมื่อ  $g$  = จำนวนกรัมของสาร (g)  
 $C$  = ความเข้มข้นของสาร (M)  
 $V$  = ปริมาตรของสาร (ml)  
 $MW$  = น้ำหนักของสาร (g/mol)

2. การคำนวณหาร้อยละผลผลิตของสาร  $\text{AlPO}_4$

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

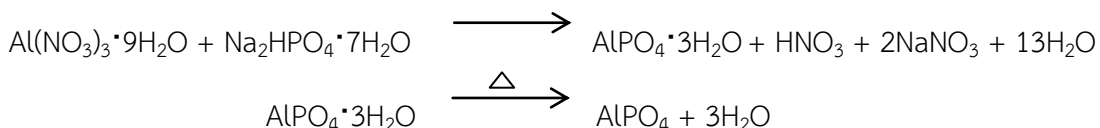
3. การคำนวณหาจำนวนโมลของน้ำด้วยเทคนิค TGA

การคำนวณ  $\text{AlPO}_4$  ที่ได้จากแหล่งฟอสเฟต  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$



%Mass loss	100	70	30
M.W.	$121.98 + 18x$	121.98	$18x$
หา x โดย	$\frac{100}{121.98 + 18x}$	$\frac{70}{121.98}$	=
จะได้ X			= 2.90

ดังนั้นจะได้จำนวนโมลของน้ำ เท่ากับ 3 โมล



4. การคำนวณหาความสามารถในการดูดซับ

$$\text{ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)} = \frac{(C_e - C_0)}{M} \times V$$

เมื่อ  $C_0$  = ความเข้มข้นของสารละลายเลด (II) ในเตรทก่อนการดูดซับ (mg/l)  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$C_e$  = ความเข้มข้นของสารละลายเลด (II) ในเตรทหลังการดูดซับ (mg/L)

$V$  = ปริมาตรของสารละลาย (L)

$M$  = น้ำหนักของสาร (g)

#### 5. การคำนวณค่าประสิทธิภาพการดูดซับ

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

เมื่อ  $C_0$  = ความเข้มข้นของสารละลายเลด (II) ในเตรทก่อนการดูดซับ (mg/L)

$C_e$  = ความเข้มข้นของสารละลายเลด (II) ในเตรทหลังการดูดซับ (mg/L)

#### 6. การคำนวณค่า Effective nuclear charge

$$Z^* = Z - S$$

เมื่อ  $Z^*$  คือ Effective nuclear charge

$Z$  คือ เลขอะตอมของอะตอม

$S$  (screening หรือ shielding constant) คือ ค่าการบดบังของแต่ละออร์บิทัล

6.1 เมื่อวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่ถูกบดบังอยู่ใน s-orbital หรือ p-orbital สามารถคำนวณได้ดังนี้

6.1.1 ถ้าอิเล็กตรอน ที่บังและวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่ถูกบัง อยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานเดียวกัน (ค่า  $n$  เท่ากัน) ค่า  $s=0.35$  (นอกจากอยู่ใน 1s ด้วยกัน  $s=0.30$ )

6.1.2 ถ้าอิเล็กตรอนที่บังและวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่ถูกบดบังอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานต่างกัน

ก. ถ้าต่างกันหนึ่งระดับพลังงาน ( $n_2 - n_1 = 1$ ) ค่า  $s=0.85$

ข. ถ้าต่างมากกว่าหนึ่งระดับพลังงาน ( $n_2 - n_1 > 1$ ) ค่า  $s=1.00$

6.2 เมื่อวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่ถูกบดบังอยู่ใน d-orbital หรือ f-orbital สามารถคำนวณได้ดังนี้

ก. ถ้าอิเล็กตรอนที่บังและวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่ถูกบังอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานและออร์บิทัลเดียวกัน (ค่า  $n$  และ  $l$ ) ค่า  $s=0.35$

ข. ถ้าอิเล็กตรอนที่บังและวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่ถูกบังอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานหรือออร์บิทัลต่างกันไม่ว่าจะเท่าใดก็ตามค่า  $s=1$  (เนื่องจากอิเล็กตรอนในชั้น 3d และ 3f จะถูกบังโดยอิเล็กตรอนในชั้น 3s และ 3p 100%)

การคำนวณค่า Effective nuclear charge ของ  $Pb^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$

$Pb^{2+}$  มี  $Z=80$  การจัดเรียงอิเล็กตรอน  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 5d^{10} 4f^{14}$

$$Z_{\text{eff}} = 80 - [(0.3 \times 1) + (0.85 \times 18) + (1 \times 26) + (1 \times 34)]$$

=

4.40

$Ni^{2+}$  มี  $Z=26$  การจัดเรียงอิเล็กตรอน  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{\text{eff}} = 26 - [(0.35 \times 9) + (1 \times 16)]$$

$$=$$

6.85

$\text{Zn}^{2+}$  มี  $Z=28$  การจัดเรียงอิเล็กตรอน  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10}$

$$Z_{\text{eff}} = 28 - [(0.35 \times 9) + (1 \times 18)]$$

$$= 6.85$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### ข้อมูลผลการทดลอง

#### BJH DESORPTION PORE SIZE DISTRIBUTION

ตารางที่ ค ค่าการกระจายของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ  $AlPO_4$

ขนาดรูพรุน (nm)	ปริมาตรรูพรุน ( $cm^3/g$ )
1.389	0.082
1.673	0.122
1.915	0.161
2.145	0.164
2.429	0.192
2.705	0.186
2.99	0.182
3.347	0.195
3.751	0.392
4.235	0.220
4.823	0.180
5.551	0.195
6.478	0.212
7.717	0.202
9.323	0.215
12.053	0.330
17.505	0.498
31.577	0.946
167.223	0.348

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### Material Name

ALPO-5

### Chemical Formula

[Al<sub>12</sub>P<sub>12</sub>O<sub>48</sub>]-AFI

### Unit Cell

hexagonal

$a = 13.7260\text{\AA}$   $b = 13.7260\text{\AA}$   $c = 8.4840\text{\AA}$

$\alpha = 90.000^\circ$   $\beta = 90.000^\circ$   $\gamma = 120.000^\circ$

### Framework density

17.3 T/1000  $\text{\AA}^3$

### Channels

[001] 12 7.3 x 7.3\*

Dimensionality:

Sorption (molecular cross section > 3.4 $\text{\AA}$ ): 1-dimensional

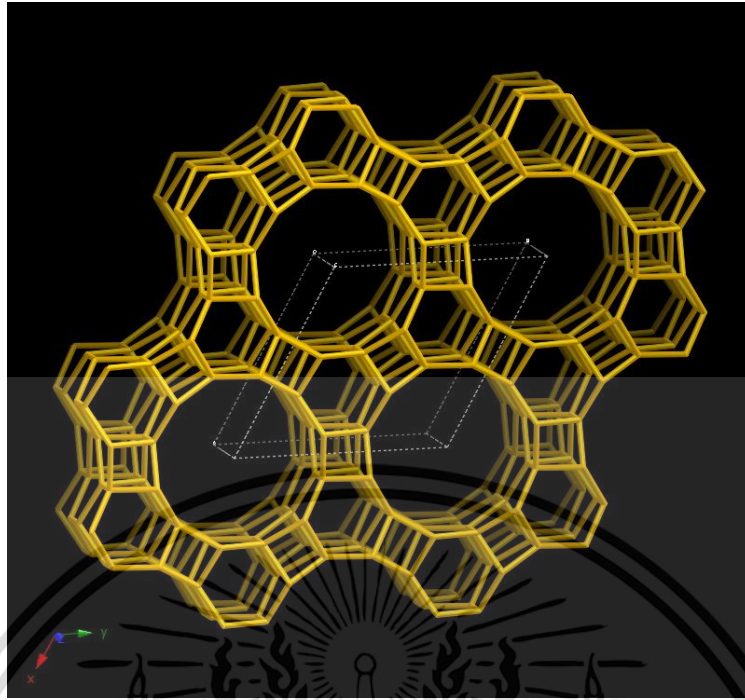
Topological (pore opening > 6-ring): 1-dimensional

### References

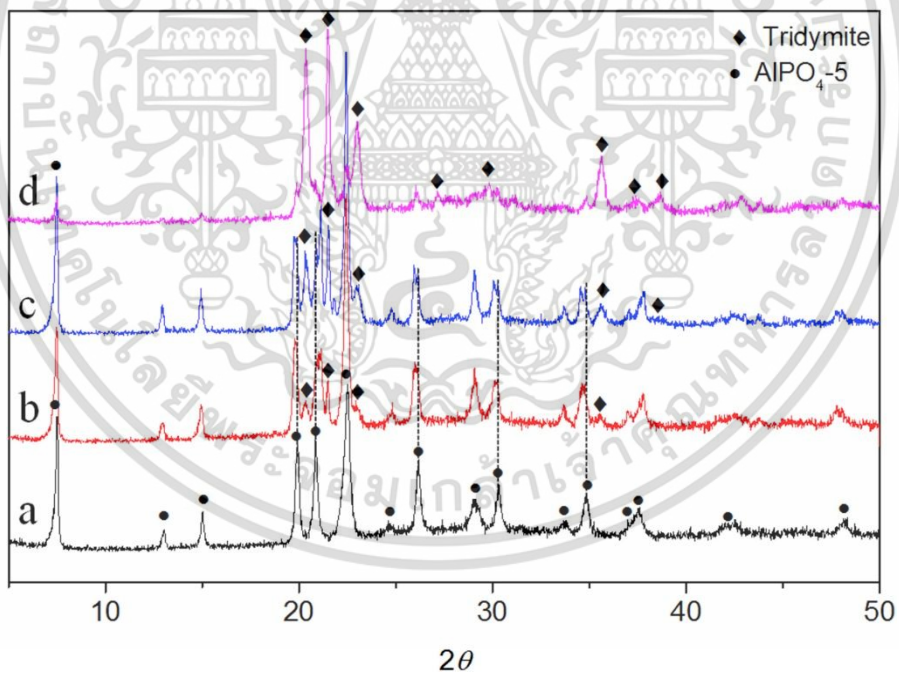
Bennett, J.M., Cohen, J.P., Flanigen, E.M., Pluth, J.J. and Smith, J.V. 1983. "Crystal Structure of Tetrapropylammonium Hydroxide-Aluminum Phosphate Number 5." ACS Sym. Ser. 218 : 109-118

### Framework image

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Peak



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

ทดสอบสมรรถภาพการทำนายที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในสภาวะอื่นๆ

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (ppm)	น้ำหนัก ALPO <sub>4</sub> (%wt/v)	ความเร็วรอบการเขย่า (rpm)	ค่าการดูดซับที่ได้จากการทดลอง (%)	ค่าการดูดซับที่ได้จากสมรรถภาพการทำนาย (%)	ความคลาดเคลื่อน (%)
Zn	20	0.1%	180	69.23	73.88	4.65
Zn	30	0.1%	180	64.13	66.54	2.41
Pb	20	0.1%	180	77.04	80.26	3.22
Pb	30	0.1%	180	71.97	71.21	-0.76
Pb	40	0.1%	180	60.59	62.16	1.57
Ni	20	0.1%	180	74.33	78.11	3.78
Ni	30	0.1%	180	67.2	69.47	2.27
					<b>เฉลี่ย</b>	<b>2.45</b>

จากการทดสอบสมรรถภาพการทำนายผลการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นอื่นในการทดลอง ได้ผลการทดลองออกมามีความคลาดเคลื่อน 2.45% ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

## ภาคผนวก ฉ



## แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

## สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่.....2.....รอบ.....12.....เดือน ประจำปีงบประมาณ.....2561.....

แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ)  แหล่งเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์

๑ ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การดูดซับสารตะกั่ว สังกะสี และนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยอลูมิเนียมฟอสเฟต

(ภาษาอังกฤษ) Adsorption of Lead, Zinc and Nickel from synthetic waste water by Aluminium phosphate.

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2560 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2561

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2560 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2561

## ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

## 1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดที่ 1 42,500 บาท 85 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว) 1 ต.ค. 60

งวดที่ 2 7,500 บาท 15 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว) 1 ส.ค. 61

## 2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน

## สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่ายจากรายงานครั้งก่อน	ค่าใช้จ่ายงวดปัจจุบัน	รวมค่าใช้จ่ายสะสมถึงปัจจุบัน	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร :ค่าจ้างชั่วคราว	-	-	-	-	-
งบดำเนินงาน					
ค่าตอบแทน	-	-	-	-	-
ค่าใช้สอย	26,000.00	-	-	46,146.75	-
ค่าวัสดุและสารเคมี	24,000.00	-	-	4,000.00	-
ค่าสาธารณูปโภค	-	-	-	-	-
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	-	-	-	-	-
รวม	50,000	-	-	50,146.75	0

## จำนวนเงินที่ได้รับและจำนวนเงินที่ใช้จ่าย

งวดเงินที่ได้รับ	จำนวนเงินที่ได้รับ(บาท)	เมื่อ (ระบุวัน เดือน ปี)
งวดที่ 1	42,500.00	1 ต.ค. 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งวดที่ 2	7,500.00	1 ส.ค. 61
ดอกเบี้ย ครั้งที่ 1	-	-
ฯลฯ		
<b>รวม</b>	50,000.00	<b>①</b>

งวดที่	จำนวนเงินที่ใช้จ่าย (บาท)	
งวดที่ 1	46,146.75	1 ต.ค. 60
งวดที่ 2	4,000.00	1 ส.ค. 61
ค่าจ้างผู้ช่วยวิจัย	-	-
<b>รวม</b>	50,146.75	<b>②</b>

จำนวนเงินคงเหลือ ① - ② ..... 0 ..... บาท

.....  
 ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

.....  
 ลงนามเจ้าหน้าที่การเงินโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### 1.1 ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ-สกุล นาย มนตรี ทองคำ  
ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.

### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วทศ.	เคมีเทคนิค	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2009
วทม.	เคมีเทคนิค	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	1999
วทบ.	เคมีอุตสาหกรรม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล กรุงเทพ	1997

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ(แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

Methanol synthesis, Dimethyl Ether synthesis, Reaction and catalytic engineering

### ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

#### ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1. Reviewer (2011), "การผลิตไปโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาผสมโพแทสเซียม ซิงค์ บนตัวรองรับเมโซพอร์ซิลิกา", วารสารวิจัยพลังงาน, ปีที่ 9 เล่มที่ 2(2555), สถาบันวิจัยพลังงาน, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
2. Reviewer (2009), "การออกแบบโครงสร้างการควบคุมแบบแพลนท์ไวด์สำหรับกระบวนการอัลคิลเลชัน", โครงการบัณฑิตศึกษา, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร.
3. Reviewer (2009), "การออกแบบโครงสร้างการควบคุมสำหรับกระบวนการฟินอลไฮโดรจีเนชันเป็นไซโคลเฮกซานอน", โครงการบัณฑิตศึกษา, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร.
4. Researcher (2007-2008) Department of Applied Chemistry, *University of Toyama* Toyama, Japan
5. Teaching Assistance (2006-2007) Chulalongkorn University
6. Assistant Researcher (1999-2001) Chulalongkorn University

### ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

#### งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

การสังเคราะห์พลังงานเชื้อเพลิงทางเลือกโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์บนตัวเร่งปฏิกิริยาโคโรเมียม(II) ซิงค์(II) ไพโรฟอสเฟต (ทุนวิจัยเงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์ ปีงบประมาณ 2556 : หัวหน้าโครงการวิจัย)

การสังเคราะห์พลังงานเชื้อเพลิงทางเลือกบนตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์(II) Ni(II)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไพโรฟอสเฟต ( $\text{Cu(II)Ni(II)P}_2\text{O}_7$ ) (ทุนวิจัยเงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์ ปีงบประมาณ 2556 : หัวหน้าโครงการวิจัย)

### งานวิจัยที่กำลังดำเนินการ

เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ (ทุนพัฒนางานวิจัยประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ปีงบประมาณ 2556 : หัวหน้าโครงการวิจัย)

### ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

- 1 M. Thongkam, G. Yang, T. Vitidsant and N. Tsubaki. "Novel three-component zeolite capsule catalyst for direct synthesis of isoparaffin", *Journal of the Japan Petroleum Institute* **52(4)**: 216-219 (2009).
- 2 B. Boonchom, M. Thongkam, S. Kongtaweelert, N. Vittayakorn. "A simple route to synthesize new binary cobalt iron cyclotetraphosphate  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  using aqueous and acetone media", *Journal of Alloys and Compound*, **486**:689-692(2009).
- 3 B. Boonchom, M. Thongkam, S. Kongtaweelert, N. Vittayakorn. "Flower-like microparticles and novel superparamagnetic properties of new binary  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  obtained by a rapid solid state route at ambient temperature", *Materials Research Bulletin*, **44**:2206-2210(2009).
- 4 Banjong Boonchom, Chanaiporn Danvirutai and Montree Thongkam. "Non-isothermal decomposition kinetics of synthetic serrabrancaite ( $\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) precursor in  $\text{N}_2$  atmosphere", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **99**:357-362(2010).
- 5 Banjong Boonchom and Montree Thongkam. "Kinetics and thermodynamics of the formation of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ ", *Journal of Chemical & Engineering Data.*, **55**: 211-216(2010).
- 6 Chesta Ruttanapun, Banjong Boonchom, Montree Thongkam, Samart Kongtaweelert, Chanchana Thanachayanont and Aree Wichainchai, "Electrical and optical properties of p-type  $\text{CuFe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $x = 0.03, 0.05$ ) delafossite-oxide ", *Journal of Applied Physics*, **113(2)**:2013.
- 7 Guohui Yang, Montree Thongkam, Tharapong Vitidsant, Yoshiharu Yoneyama, Yisheng Tan, Noritatsu Tsubaki. "A double-shell capsule catalysts with core-shell-like structure for one-step exactly controlled synthesis of dimethyl ether from  $\text{CO}_2$  containing syngas", *Catalysis Today*, **171**: 229-235 (2011).

### บทความทางวิชาการ

1. บทความเรื่อง "พลังงานทางเลือกแห่งอนาคต : ไดเมทิลอีเทอร์ (ดีเอ็มอี)" วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 18 ฉบับที่ 38 กรกฎาคม-ธันวาคม 2552 หน้า 64-70.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ผลงานที่นำเสนอในการประชุมนานาชาติ

1. M. Thongkam, B. Boonchom, T. Vitidsant, N. Tsubaki. “Catalytic Dehydration of Methanol to Dimethyl Ether from Synthesis Gas overCr/ZnO Capsules Catalysts” The 2<sup>nd</sup> Asian Conference on Innovative Energy & Environmental Chemical Engineering, Phuket, Thailand (2010).
2. M. Thongkam, B. Boonchom, T. Vitidsant. “Synthesis and characterization of binary copper (II) cobalt(II) hydrogen phosphate hydrate” The 24<sup>th</sup> International Symposium on Chemical Engineering December 2-4, 2011, Hyundai Hotel, Gyeong-ju, Korea.
3. M.Thongkam, P. Suksomkit, S. Thongkam, B. Boonchom. “Synthesis and characterization of magnesium (II) cobalt(II) hydrogen phosphate” The 25<sup>th</sup> International Symposium on Chemical Engineering December 14-15, 2012, Okinawa Convention Hall, Okinawa, Japan.
4. S.Thongkam, P. Suksomkit, M. Thongkam, B. Boonchom. “Preparation and characterization of copper (II) cobalt(II) hydrogen phosphate hydrate” The 25<sup>th</sup> International Symposium on Chemical Engineering December 14-15, 2012, Okinawa Convention Hall, Okinawa, Japan.
5. S. Thongkam, Y. Yoneyama, N. Tsubaki, M. Thongkam. “Low-temperature Fischer-Tropsch synthesis in slurry-phase reactors on the catalytic performance of Ru-Co/SiO<sub>2</sub> catalysts” The 4<sup>th</sup> Asian Conference on Innovative Energy & Environmental Chemical Engineering(ASCON-IEEChE) , November 9-12, 2014, The Ocean Resort, Yeosu, Korea(Rep.)
6. A. Konjareon, S. Thongkam, B. Boonchom, M. Thongkam.” Low-temperature synthesis of DME as a clean fuel over CuZnO/AlPO<sub>4</sub> nanocatalysts” The 4<sup>th</sup> Asian Conference on Innovative Energy & Environmental Chemical Engineering(ASCON-IEEChE) , November 9-12, 2014, The Ocean Resort, Yeosu, Korea(Rep.)