



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การกำจัดแอนไอออนที่เป็นพิษในน้ำเสียด้วยการตกตะกอนร่วมกับเลเยอร์
 ดับเบิลไฮดรอกไซด์
 Removal of Toxic Anions from Wastewater by Co-precipitation with
 Layered Double Hydroxides (LDH)

ชื่อนิสิต นางสาวรัญญาภรณ์ โยริยะ เลขประจำตัว 5933090123
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2562

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกำจัดแอนไอออนที่เป็นพิษในน้ำเสียด้วยการตกตะกอนร่วมกับ
เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

Removal of Toxic Anions from Wastewater by Co-precipitation with
Layered Double Hydroxides (LDH)

โดย

นางสาววรรณฎาภรณ์ โยริยะ

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

โครงการ การจัดทำต้นแบบโฮมโฮนที่เป็นพืชในน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมกับเลเซอร์ดับเบิล
ไฮดรอกไซด์

โดย นางสาวรัฐัญญากรณ์ ไชรัมย์

ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของภาควิชาค่านอกหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ

- | | |
|--|------------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม | ประธานกรรมการ |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทา อื่นสั้น | กรรมการ |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิปภา สุขภิรมย์ | อาจารย์ที่ปรึกษา |

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

Nipalea S.

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิปภา สุขภิรมย์)
อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิตต์ พาราสุข)
หัวหน้าภาควิชาเคมี

วันที่ 17 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2565

ชื่อโครงการ การกำจัดแอนไอออนที่เป็นพิษในน้ำเสียด้วยการตกตะกอนร่วมกับเลเยอร์
ดับเบิลไฮดรอกไซด์

ชื่อนิสิตในโครงการ นางสาววิญญูภรณ์ โยริยะ เลขประจำตัว 5933090123

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิปกา สุขภิรมย์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดแอนไอออนที่เป็นพิษในน้ำด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมกับสารประกอบเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (layered double hydroxides, LDH) โดยใช้หลักการของแรงระหว่างประจุระหว่างโครงสร้างที่เป็นชั้นประจุบวกของสารประกอบ LDH ที่สามารถจับกับแอนไอออนชนิดต่าง ๆ ได้ ในการทดลองทำการตกตะกอนโครเมตแอนไอออนและอาร์ซิเนตแอนไอออนร่วมกับสารประกอบ LDH โดยศึกษาตัวแปร 3 ชนิด ได้แก่ ค่าความเป็นกรดเบส ความเข้มข้นของแอนไอออนที่เป็นพิษ และชนิดโลหะของสารประกอบ LDH การหาปริมาณโครเมตแอนไอออนและอาร์ซิเนตแอนไอออนทำได้โดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิธีเบิลสเปกโทรสโคปีและเทคนิคการคายแสงของธาตุด้วยการกระตุ้นจากพลาสมา ตามลำดับ และยืนยันการเกิดสารประกอบ LDH ของตะกอนที่ได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าระบบ Mg/Al สามารถตกตะกอน LDH ร่วมกันกับโครเมตแอนไอออนและอาร์ซิเนตแอนไอออนได้ที่ค่าความเป็นกรดเบสตั้งแต่ 9 ขึ้นไป เนื่องจากมีปริมาณไฮดรอกไซด์มากพอสำหรับเกิดเป็นสารประกอบ LDH ส่วนระบบ Mg/Fe เกิดเป็นสารประกอบ LDH ได้ที่ค่าความเป็นกรดเบสที่ 11 แต่ไม่เกิดสารประกอบ LDH ที่ค่าความเป็นกรดเบสที่ 9 เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 ไอออนของเหล็กอาจตกตะกอนเป็นสารประกอบ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ส่งผลให้มีปริมาณเหล็กไม่เพียงพอที่จะเกิดเป็นสารประกอบ LDH ร่วมกับ Mg ได้ นอกจากนี้เมื่อเปลี่ยนชนิดของโลหะไดวาเลนต์ Zn/Al, Ni/Al และ Ni/Fe สามารถตกตะกอนร่วมกันกับโครเมตแอนไอออนและเกิดเป็นสารประกอบ LDH ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 เช่นเดียวกัน

คำสำคัญ: การตกตะกอนร่วม, สารประกอบเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์, โครเมียม, อาร์เซนิก

Project Title Removal of Toxic Anions from Wastewater by Co-precipitation with Layered Double Hydroxides (LDH)

Student Name Miss Warunyaporn Yoriya Student ID 5933090123

Advisor Name Assistant Professor Dr. Nipaka Sukpirom

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2019

Abstract

This research studied the removal of toxic anions from wastewater by co-precipitation with layered double hydroxides (LDH), based on the coulombic interaction between positive layers of LDH structure and anions in water. In the experiments, the chromate anions or arsenate anions were coprecipitated with LDH, by varying these factors, pH, the concentration of toxic anions and types of metal in LDH compounds. The amounts of chromate anions and arsenate anions were determined using UV-Visible spectroscopy and ICP-OES respectively. The formation of LDH was confirmed using XRD. The result found that Mg/Al can co-precipitate with chromate anions and arsenate anions starting from pH 9 because the amount of hydroxide ions was high enough to form the LDH compound. Mg/Fe can form LDH compound at pH 11 but cannot form LDH compound at pH 9 since iron ions might precipitates as $\text{Fe}(\text{OH})_3$; therefore, the LDH compound cannot be formed as a consequence of deficient Fe(III) ions. Besides, the study of divalent ions revealed that Zn/Al, Ni/Al, and Ni/Fe can co-precipitate with chromate anions to form LDH compounds at pH 9 and 11 as well.

Keyword: Co-precipitation, Layered double hydroxides (LDH), Chromium, Arsenic

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยและรายงานฉบับนี้จะไม่สำเร็จล่วงไปได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความกรุณาอย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิปกา สุขภิรมย์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และแนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนแนวคิดในการแก้ไขปัญหาตลอดช่วงระยะเวลาการทำวิจัย อีกทั้งการช่วยตรวจทานแก้ไข ให้คำปรึกษา และปรับปรุงรายงานด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี และขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้มและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นำพล อินสินที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าให้เกียรติในการเป็นประธานกรรมการและกรรมการในการสอบงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับสถานที่ในการทำงานวิจัย เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณนิสิตปริญญาเอกและนิสิตปริญญาโททุกคนที่ให้ความรู้เกี่ยวกับเทคนิคต่าง ๆ การใช้และการดูแลเครื่องมือ อีกทั้งยังเอื้อเพื่ออุปกรณ์และสารเคมีที่จำเป็นในงานวิจัย รวมถึงขอขอบคุณกำลังใจจากเพื่อน ๆ ในภาคเคมีทุกคนและขอขอบคุณครอบครัวทุกคนที่สนับสนุนในทุก ๆ เรื่องที่คอยให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมา จนสำเร็จล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัย

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3. ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
1.5.1 สารประกอบเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Layered double hydroxide, LDH).....	3
1.5.2 โครเมียม	6
1.5.3 อาร์เซนิก	7
1.5.4 การวิเคราะห์โดยเทคนิค UV-Visible spectroscopy	8
1.5.5 การวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ X-Ray powder diffraction (XRD).....	9
1.5.6 การวิเคราะห์หาธาตุในสารละลายโดยเทคนิค ICP-OES.....	11
1.6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 2 การทดลอง	14
2.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี	14
2.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	14
2.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	14

2.1.3 สารเคมี.....	14
2.2 การทดลอง.....	15
2.2.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมที่เป็นพิษในน้ำ	15
2.2.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดอาร์เซนิกที่เป็นพิษในน้ำ.....	15
2.2.3 ศึกษาชนิดของโลหะไดวาเลนต์ที่มีผลต่อการตกตะกอน LDH.....	16
2.2.4 การหาปริมาณแอนไอออนที่เป็นพิษในน้ำ	16
บทที่ 3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	17
3.1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมที่เป็นพิษในน้ำ.....	17
3.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดอาร์เซนิกที่เป็นพิษในน้ำ	22
3.3 ศึกษาชนิดของโลหะไดวาเลนต์ที่มีผลต่อการตกตะกอน LDH.....	25
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง	29
4.1. สรุปผลการทดลอง	29
4.2. ข้อเสนอแนะสำหรับการทดลองในอนาคต.....	30
เอกสารอ้างอิง.....	31
ภาคผนวก	34
ประวัติ	39

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr(VI) ออกจากสารละลายด้วยการตกตะกอนร่วมกับ Mg/Al LDH ที่ค่าความเป็นกรดเบสและที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	19
ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr(VI) ออกจากสารละลายด้วยการตกตะกอนร่วมกับ Mg/Fe LDH ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11	22
ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัด As(III) ออกจากสารละลายที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 โดยใช้ Mg/Al LDH และ Mg/Fe LDH.....	24
ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr(VI) ออกจากสารละลายที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 โดยใช้ Zn/Al LDH, Zn/Fe LDH, Ni/Al LDH และ Ni/Fe LDH.....	28

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 ค่าสัญญาณ UV-Visible spectroscopy ของสารละลายโครเมียมในการทดลองการตกตะกอนร่วมกับสารประกอบ Mg/Al LDH	36
ตารางที่ 2 ค่าสัญญาณ UV-Visible spectroscopy ของสารละลายโครเมียมในการทดลองการตกตะกอนร่วมกับสารประกอบ Mg/Fe LDH	37
ตารางที่ 3 ค่าสัญญาณ UV-Visible spectroscopy ของสารละลายโครเมียมในการทดลองการศึกษาชนิดของโลหะไดวาเลนต์ที่มีผลต่อการตกตะกอน LDH.....	37
ตารางที่ 4 ค่าสัญญาณ ICP-OES ของสารละลายอาร์เซนิกของการทดลองการตกตะกอนร่วมกับสารประกอบ Mg/Al LDH.....	37
ตารางที่ 5 ค่าสัญญาณ ICP-OES ของสารละลายอาร์เซนิกของการทดลองการตกตะกอนร่วมกับสารประกอบ Mg/Fe LDH	38

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1 โครงสร้างทั่วไปสารประกอบเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH).....	4
รูปที่ 2 โครงสร้างของแร่รูไซต์	4
รูปที่ 3 โครงสร้างทั่วไปของสารประกอบ LDH ที่เรียงตัวกันแบบ	6
รูปที่ 4 รูปแบบของ Cr(VI) ที่ค่าความเป็นกรดเบสต่าง ๆ	7
รูปที่ 5 รูปแบบของ As(III) และ As(V) ที่ค่าความเป็นกรดเบสต่าง ๆ	7
รูปที่ 6 เมื่อได้รับพลังงานเพียงพอ อิเล็กตรอนภายในโมเลกุลมีการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน.....	8
รูปที่ 7 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer	9
รูปที่ 8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	9
รูปที่ 9 เครื่องมือ XRD	10
รูปที่ 10 เครื่องมือ ICP-OES	11
รูปที่ 11 แผนผังกระบวนการกำจัดโครเมียม 6 ด้วย Fe ²⁺ บน Mg-Al LDH	13
รูปที่ 12 XRD pattern ของสารประกอบ Mg/Al LDH-Cr(VI) ที่ 0 ppm.....	17
รูปที่ 13 XRD pattern ของสารประกอบ Mg/Al LDH-Cr(VI) ที่ (a)10 ppm, (b)50 ppm, (c)100 ppm และ (d)300 ppm	18
รูปที่ 14 แบบจำลองโครงสร้างสารประกอบ Mg/Al LDH-Cr(VI)	18
รูปที่ 15 แบบจำลองโครเมตแอนไอออนที่ถูกดูดซับบนผิวของสารประกอบโลหะออกไซด์ที่ค่าความเป็นกรดเบส 7.....	19
รูปที่ 16 XRD pattern ของสารประกอบ Mg/Fe LDH-Cr(VI)	20
รูปที่ 17 ชนิดของ Fe(III) ที่ค่าความเป็นกรดเบสต่าง ๆ.....	21
รูปที่ 18 การเกิดตะกอนในสารละลาย Mg/Fe-Cr(VI) ที่ความเข้มข้น 100 ppm และ 300 ppm ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9.....	21
รูปที่ 19 XRD pattern ของสารประกอบ Mg/Al LDH-As(III) ที่ (a)100 ppm (b)300 ppm และ Mg/Fe LDH-As(III) ที่ (c)100 ppm (d)300 ppm	23
รูปที่ 20 แบบจำลองโครงสร้างสารประกอบ Mg/Al LDH-As(III)	23
รูปที่ 21 การเกิดตะกอนในสารละลาย Mg/Fe-As(III) ที่ความเข้มข้น 100 ppm.....	24
รูปที่ 22 XRD pattern ของสารประกอบ (a)Zn/Al และ (b)Zn/Fe	26
รูปที่ 23 XRD pattern ของสารประกอบ Zn/Al-Cr(VI) และ Zn/Fe-Cr(VI) ที่ 100 ppm	26
รูปที่ 24 แบบจำลองโครงสร้างสารประกอบ Zn/Al LDH-Cr(VI) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11	26

รูปที่ 25 แบบจำลองโครเมตแอนไอออนที่ถูกดูดซับบนผิวของสารประกอบ ZnO ที่ค่าความเป็นกรดเบส 11 27

รูปที่ 26 XRD pattern ของสารประกอบ (a)Ni/Al LDH และ (b)Ni/Fe LDH 27

รูปที่ 27 XRD pattern ของสารประกอบ (a)Ni/Al LDH-Cr(VI) และ (b)Ni/Fe LDH-Cr(VI) ที่ 100 ppm . 28

รูปที่ 28 แบบจำลองโครงสร้างสารประกอบ Ni/Al LDH-Cr(VI) และ Ni/Fe LDH-Cr(VI) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 28

ภาคผนวก

รูปที่ 1 กราฟมาตรฐานสารละลายโครเมียมที่ความยาวคลื่น 273 nm และ 373 nm ของการทดลองการตกตะกอนร่วมกับสารประกอบ Mg/Al LDH..... 35

รูปที่ 2 กราฟมาตรฐานสารละลายโครเมียมที่ความยาวคลื่น 273 nm และ 373 nm ของการทดลองการตกตะกอนร่วมกับสารประกอบ Mg/Fe LDH..... 35

รูปที่ 3 กราฟมาตรฐานสารละลายโครเมียมที่ความยาวคลื่น 273 nm และ 373 nm ของการศึกษาชนิดของโลหะไดวาเลนต์ที่มีผลต่อการตกตะกอน LDH..... 36

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

ปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นมากมายทำให้เกิดปัญหาทางมลพิษเพิ่มมากขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีการปนเปื้อนของสารพิษ เช่น โครเมียม อาร์เซนิก ฟอสเฟส และโลหะหนักอื่น ๆ ซึ่งมีความเสี่ยงที่อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชาชนและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะโครเมียมและอาร์เซนิกเป็นสารพิษซึ่งปนเปื้อนอยู่ในระบบน้ำและสามารถเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารที่จะก่อให้เกิดโรคร้ายแรงในมนุษย์ได้¹

มลพิษทางน้ำจากโครเมียมเป็นสิ่งที่น่ากังวลอย่างมากเนื่องจากโลหะชนิดนี้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการตกแต่งผิวโลหะ การฟอกหนัง การชุบ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์และอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น ในสถานะของเหลว โครเมียมมีสถานะออกซิเดชันสองสถานะที่คงตัวนั่นคือ ไตรวาเลนต์โครเมียม (Cr(III)) และเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr(VI)) จากการเปรียบเทียบพบว่า Cr(III) เป็นอันตรายน้อยกว่า Cr(VI) ที่เป็นพิษต่อระบบชีวภาพเนื่องจากเป็นสารก่อมะเร็งและสารก่อมะเร็ง ทางองค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) จึงได้มีการกำหนดปริมาณโครเมียมที่สามารถปนเปื้อนในน้ำดื่มได้ไม่เกิน 50 µg/L^{2, 3} ในส่วนอาร์เซนิกเป็นองค์ประกอบโลหะที่พบได้ทั่วไปในโลก มนุษย์จะได้รับเข้าสู่ร่างกายผ่านทางสูดดมจากฝุ่นละอองที่มีการปนเปื้อนในการประกอบอาชีพหรือจากการบริโภคน้ำดื่มที่ปนเปื้อนอาร์เซนิกจากธรรมชาติ มีหลักฐานการระบาดทางวิทยาของมนุษย์อย่างกว้างขวางว่าอาร์เซนิกที่เข้าสู่ร่างกายทำให้เกิดเป็นมะเร็งปอดและมะเร็งผิวหนังได้ซึ่งจากหลักฐานนี้องค์การระหว่างประเทศเพื่อการวิจัยโรคมะเร็งจึงได้จำแนกอาร์เซนิกเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์⁴ อาร์เซนิกที่พบในธรรมชาติอยู่ในรูปไตรวาเลนต์ (As(III)) และเพนตะวาเลนต์ (As(V)) เป็นที่ทราบกันว่าอาร์เซนิกเป็นธาตุที่มีพิษและส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของสิ่งมีชีวิตโดยองค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) ได้กำหนดให้ปริมาณอาร์เซนิกสามารถปนเปื้อนในน้ำดื่มได้ไม่เกิน 10 µg/L^{3, 5}

สารประกอบเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Layered Double Hydroxides, LDH) ได้เข้ามามีบทบาทมากในการเป็นตัวดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออน ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวขนส่งยา หรือวัสดุใช้ทำอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสารประกอบ LDH ได้รับการตรวจสอบแล้วว่าสามารถกำจัดออกซิแอนไอออน (oxyanion) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง และมีความเสถียรเมื่อได้รับความร้อน โดยมีโครงสร้างทั่วไปประกอบด้วยชั้นของโลหะไฮดรอกไซด์ที่ประจุเป็นบวกและมีไอออนประจุลบและโมเลกุลน้ำที่อยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นและมีสูตรโครงสร้างทั่วไปคือ $[M_{1-x}^{II} M_x^{III} (OH)_2]_{x+} A_{x/y}^{y-}, nH_2O]^{6, 7}$

ปัจจุบันการแยกโครเมียมและอาร์เซนิกออกจากสารละลายมีหลายวิธี เช่น การใช้เทคนิคอิเล็กโทรลิซิส การดูดซับด้วยตัวดูดซับของแข็ง การตกตะกอนร่วม เป็นต้น เทคนิคการตกตะกอนร่วมเพื่อแยกอาร์เซนิกออกจากสารละลายเป็นเทคนิคที่สามารถแยกอาร์เซนิกและโครเมียมออกจากสารละลายโดยใช้สมบัติความเป็นประจุลบของอาร์ซิเนตและโครเมตแอนไอออนที่สามารถตกตะกอนร่วมกับโลหะไดวาเลนต์และโลหะไตรวาเลนต์บางชนิดเกิดเป็นสารประกอบ LDH ได้ วิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงและทำได้สะดวก⁸

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการแยกแอนไอออนออกจากสารละลายโดยใช้สารประกอบ LDH แบ่งเป็น 2 วิธีได้แก่

1. การแลกเปลี่ยนประจุลบ (anion exchange) เป็นการใส่สารประกอบ LDH เป็นตัวดูดซับ ซึ่งมีกลไกการดูดซับเป็นการแลกเปลี่ยนประจุลบ โดยประจุลบในสารประกอบ LDH ที่สังเคราะห์เกิดการแลกเปลี่ยนกับประจุลบในสารละลายที่ต้องการกำจัดความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบจะขึ้นกับความแข็งแรงของแรงทางไฟฟ้าระหว่างประจุบวกบนชั้นของสารประกอบ LDH และประจุลบที่เข้ามาแลกเปลี่ยน โดยสามารถเรียงความแข็งแรงของการเข้าจับของแอนไอออนในสารประกอบ LDH ได้ดังนี้ $\text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{OH}^- > \text{F}^- > \text{Cl}^- > \text{Br}^- > \text{NO}_3^- > \text{I}^-$ ⁹

2. การตกตะกอนร่วม (coprecipitation) เป็นการตกตะกอนร่วมเพื่อเกิดเป็นสารประกอบ LDH โดยให้แอนไอออนในสารละลายน้ำเสียเข้าไปแทนที่ประจุลบในสารประกอบ LDH เป็นการกำจัดแอนไอออนที่ตีวิธีหนึ่ง เนื่องจากอนุภาคที่เกิดการตกตะกอนร่วมมีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตร ทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับที่มากขึ้น¹⁰

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำการหาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและอาร์เซนิกโดยการตกตะกอนร่วมกันระหว่างสารประกอบ layered double hydroxide (LDH) กับโครเมตแอนไอออนและอาร์ซิเนตแอนไอออนและสุดท้ายศึกษาผลของโลหะ LDH ที่มีผลต่อการตกตะกอนร่วมระหว่าง LDH กับแอนไอออน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนร่วมระหว่าง layered double hydroxide (LDH) กับสารละลายโครเมตแอนไอออน
- 1.2.2 เพื่อกำจัดอาร์เซนิก As(V) โดยการตกตะกอนร่วมกับ LDH ในสภาวะที่เหมาะสม
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของโลหะ LDH ที่มีผลต่อการตกตะกอนร่วมระหว่าง LDH กับแอนไอออน

1.3. ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้แบ่งขอบเขตการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1.3.1 การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียม Cr(VI) ที่เป็นพิษในน้ำ โดยการตกตะกอนร่วมกับแมกนีเซียมอะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Mg/Al LDH) และแมกนีเซียมเหล็กเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Mg/Fe LDH) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 7, 9 และ 11 และที่ความเข้มข้น 0 ppm, 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm และ 300 ppm จากนั้นนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปพิสูจน์โครงสร้างของสารด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) และนำสารละลายส่วนน้ำจากการตกตะกอนร่วมมาตรวจวัดปริมาณโครเมตแอนไอออนด้วยเทคนิค UV-Visible

1.3.2 การศึกษาการกำจัดอาร์เซนิก As(III) ด้วยการตกตะกอนร่วมกับแมกนีเซียมอะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Mg/Al LDH) และแมกนีเซียมเหล็กเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Mg/Fe LDH) ในภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 1.3.1 จากนั้นนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปพิสูจน์โครงสร้างของสารด้วยเทคนิค XRD และนำสารละลายส่วนน้ำจากการตกตะกอนร่วมมาตรวจวัดปริมาณอาร์ซิเนตแอนไอออนด้วยเทคนิค inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES)

1.3.3 การศึกษาชนิดของโลหะไดวาเลนต์ที่มีผลต่อการตกตะกอน LDH โดยตกตะกอนโครเมียม Cr(VI) ร่วมกับซิงค์อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Zn/Al LDH) ซิงค์เหล็กเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Zn/Fe LDH) นิกเกิลอะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Ni/Al LDH) และนิกเกิลเหล็กเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Ni/Fe LDH) ในภาวะที่เหมาะสม จากนั้นนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปพิสูจน์โครงสร้างของสารด้วยเทคนิค XRD และนำสารละลายส่วนน้ำจากการตกตะกอนร่วมมาตรวจวัดปริมาณโครเมตแอนไอออนด้วยเทคนิค UV-Visible

1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนร่วมระหว่างสารประกอบ Layer Double Hydroxide (LDH) กับโครเมียม Cr(VI) ในน้ำเสีย

1.4.2 ได้เรียนรู้การกำจัดอาร์เซนิก As(III) โดยการตกตะกอนร่วมกับสารประกอบ Layer Double Hydroxide (LDH) ในสภาวะที่เหมาะสม

1.4.3 ได้ทราบถึงผลของชนิดโลหะของสารประกอบ Layer Double Hydroxide (LDH) ที่มีผลต่อการกำจัดแอนไอออนในน้ำเสีย

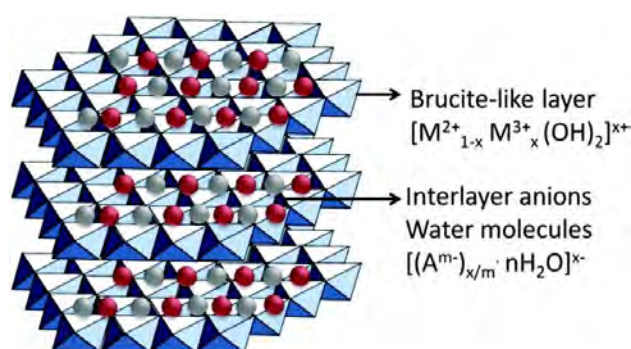
1.5. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.5.1 สารประกอบเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Layered double hydroxide, LDH)

สารประกอบเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Layered double hydroxide) ถูกค้นพบครั้งแรกกลางศตวรรษที่ 19 ค้นพบครั้งแรกเป็นไฮโดรทัลไซต์ (hydrotalcite) โดยตั้งชื่อตามกลุ่มแร่ธาตุขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งต่อมาในปี 1915 Manasse ได้มีการค้นพบสูตรโครงสร้างของไฮโดรทัลไซต์ คือ $Mg_6Al_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O$ หลังจากนั้นในปี 1942 Feitknecht ได้มีการนำมาศึกษาและสังเคราะห์

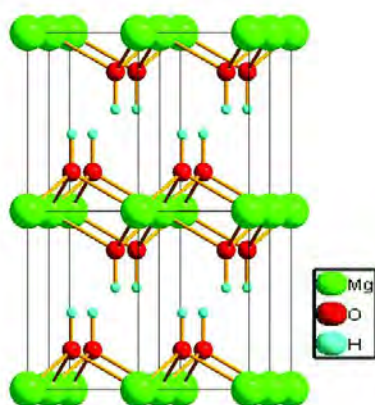
สารประกอบ LDH ในห้องปฏิบัติการเป็นครั้งแรก แต่ยังไม่สามารถหาโครงสร้างที่แน่ชัดได้ จนกระทั่ง Allmann และ Taylor ศึกษาโครงสร้างของสารประกอบนี้พบว่า สารประกอบ LDH ประกอบด้วยชั้นของประจุบวกซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนไฮดรอกไซด์ของโลหะ (metal hydroxide layers) ที่แยกออกจากกัน โดยมีประจุลบและโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ระหว่างชั้น โดยประจุบวกและประจุลบยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงทางไฟฟ้า¹¹

สูตรทั่วไปของสารประกอบ LDH คือคือ $[M_{1-x}^{II}M_x^{III}(OH)_2]^{x+} A_{x/y}^{y-} \cdot nH_2O$ เมื่อ M^{2+} และ M^{3+} คือโลหะไดวาเลนต์และโลหะไตรวาเลนต์ ตามลำดับ A^{n-} คือ แอนไอออนประจุ $n-$ ที่เข้ามาสอดแทรก และ x มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.33 มีโครงสร้างทั่วไปของสารประกอบ LDH แสดงดังรูปที่ 1



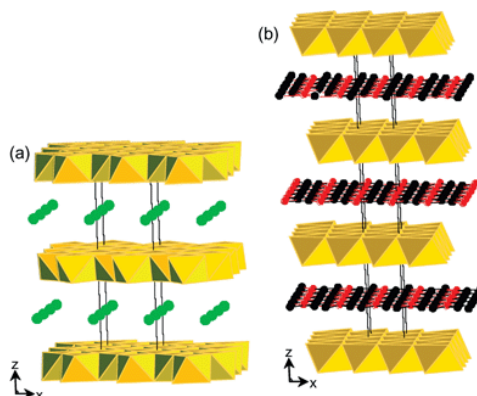
รูปที่ 1 โครงสร้างทั่วไปของสารประกอบเลเยอร์ดีดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH)⁷

โครงสร้างพื้นฐานสารประกอบ LDH ประกอบไปด้วยโครงสร้างของ Brucite ($Mg(OH)_2$) โดยมี Mg^{2+} ถูกล้อมรอบด้วยไฮดรอกไซด์ทั้ง 8 ด้าน โครงสร้างของแร่รูไซต์นี้ประกอบด้วยโครงสร้างแบบออกตะฮีดรัลของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เรียงต่อกันโดย edge sharing โดยใช้อะตอมของออกซิเจนของลิแกนด์ไฮดรอกไซด์ร่วมกัน แต่ในสารประกอบ LDH มีทั้งโลหะไดวาเลนต์และไตรวาเลนต์ทำให้เกิดการแทนที่โลหะไดวาเลนต์ด้วยโลหะไตรวาเลนต์ในชั้นของสารเชิงซ้อนไฮดรอกไซด์ของโลหะของโครงสร้าง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างของแร่รูไซต์¹¹

โดยทั่วไปโครงสร้างของสารประกอบ LDH มี 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบรอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และแบบเฮกซะโกนัล (hexagonal)¹¹ แสดงดังรูปที่ 3



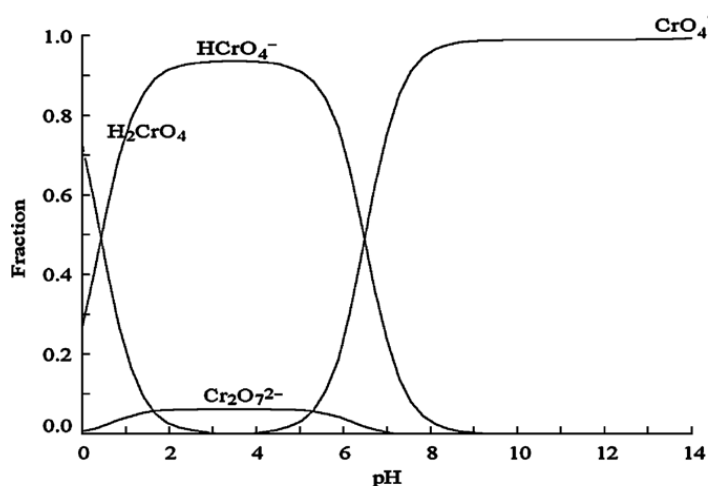
รูปที่ 3 โครงสร้างทั่วไปของสารประกอบ LDH ที่เรียงตัวกันแบบ
(a) เฮกซะโกนัล (b) รอมโบฮีดรัล¹¹

ในปัจจุบันมีการนำสารประกอบเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มาใช้เป็นตัวดูดซับ แลกเปลี่ยนไอออน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นตัวขนส่งยา หรือนำมาเป็นวัสดุใช้ทำอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้รับการตรวจสอบแล้วว่าสามารถกำจัดออกซีแอนไอออน (oxyanion) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง และมีความเสถียรเมื่อได้รับความร้อน⁷ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบจะขึ้นกับความแข็งแรงของแรงทางไฟฟ้าระหว่างชั้นประจุบวกของสารประกอบ LDH และประจุลบที่เข้ามาแลกเปลี่ยน โดยสามารถเรียงความแข็งแรงของการเข้าจับของแอนไอออนในสารประกอบ LDH ได้ดังนี้ $\text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{OH}^- > \text{F}^- > \text{Cl}^- > \text{Br}^- > \text{NO}_3^- > \text{I}^-$ ⁹

1.5.2 โครเมียม

โครเมียมเป็นองค์ประกอบทางเคมีในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์ Cr และมีเลขอะตอม 24 เป็นโลหะหนักที่มีจุดหลอมเหลวสูง มีมวลอะตอม 51.9961 g/mol ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ ค.ศ. 1797 โดยนักเคมีชาวฝรั่งเศสชื่อ L.N. Vauquelin โครเมียมที่พบในธรรมชาติมักอยู่ในรูปกลุ่มประจุ 3 (Cr(III)) และกลุ่มประจุ 6 (Cr(VI)) เนื่องจากมีความคงตัวภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน สำหรับ Cr(VI) มักพบในรูปสารประกอบเชิงซ้อนประจุลบของ CrO_4^{2-} หรือ HCrO_4^- เมื่ออยู่ในสภาวะไม่มีออกซิเจนจะเปลี่ยนรูปเป็น Cr(III) ที่มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำและตกตะกอนในท้องน้ำ โครเมียมที่พบในน้ำเสียและถูกปล่อยลงสู่แม่น้ำลำคลอง ส่วนมากจะอยู่ในรูป Cr(VI) ทั้งในรูปโครเมียมอิสระและเกลือของโครเมียม สำหรับเกลือของโครเมียม Cr(VI) เช่น โครเมียมไตรออกไซด์ (Chromium trioxide, CrO_3) และโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) จะไม่ตกตะกอนหรือรวมตัวกับดินจึงสามารถเคลื่อนย้ายไปตามแหล่งน้ำไหลได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ปนเปื้อนไปกับ

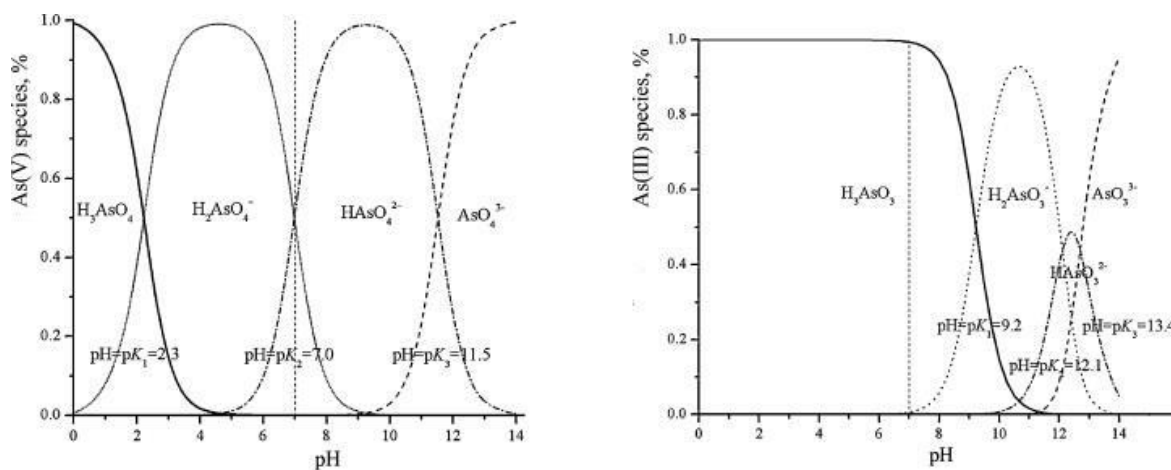
แหล่งน้ำดิบสำหรับนำมาใช้อุปโภคและบริโภคของมนุษย์ได้ง่าย¹² โดยชนิดของโครเมียมจะขึ้นกับค่าความเป็นกรดเบส ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 รูปแบบของ Cr(VI) ที่ค่าความเป็นกรดเบสต่าง ๆ¹³

1.5.3 อาร์เซนิก

อาร์เซนิก (Arsenic) หรือสารหนู เป็นธาตุกึ่งโลหะที่มีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ As จัดอยู่ในอันดับที่ 33 ของตารางธาตุ มีมวลอะตอม 74.92 g/mol ความหนาแน่น 5.727 g/cm³ และจุดระเหิดเท่ากับ 887 เคลวิน สถานะออกซิเดชันที่พบบ่อยสำหรับอาร์เซนิก คือ -3, +3 และ +5¹⁴ อาร์เซนิกมีหลายรูปแบบตามธรรมชาติ โดยมีพันธะโควาเลนต์เชื่อมติดกับโลหะและโลหะ ส่วนใหญ่จะเกิดเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เสถียรอาจอยู่ในรูปไตรเวเลนต์ (As(III)) หรือเพนตะเวเลนต์ (As(V)) รูปแบบทางเคมีของอาร์เซนิกที่มักพบได้แก่ H₃AsO₄, H₂AsO₄⁻, HAsO₄²⁻ และ AsO₄³⁻ สำหรับ As(V) และ H₃AsO₃, H₂AsO₃⁻, HAsO₃²⁻ และ AsO₃³⁻ สำหรับ As(III) โดยปริมาณของแต่ละรูปแบบขึ้นกับค่าความเป็นกรดเบสของสารละลาย⁴ ดังรูปที่ 5

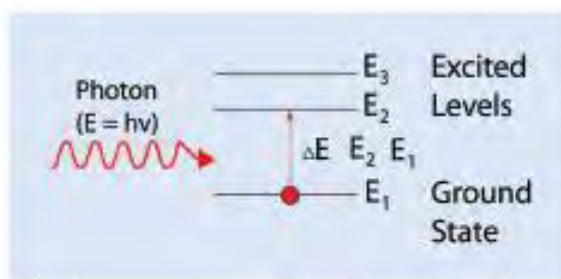


รูปที่ 5 รูปแบบของ As(III) และ As(V) ที่ค่าความเป็นกรดเบสต่าง ๆ⁴

1.5.4 การวิเคราะห์โดยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี (UV-Visible spectroscopy)

เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี (UV-Visible spectroscopy) เป็นเทคนิคที่วัดการดูดกลืนแสงหรือรังสีในช่วงอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิล เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดเรียกว่า เครื่องยูวีวิสิเบิล (UV-Visible spectrophotometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืน โดยตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ใช้ในเครื่องมือ ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้

หลักการของเทคนิค UV-Visible spectroscopy คือ สารแต่ละชนิดจะสามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน และปริมาณการดูดกลืนแสงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสงหรือค่า absorbance ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถระบุชนิดและปริมาณของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างได้



รูปที่ 6 เมื่อได้รับพลังงานเพียงพอ อิเล็กตรอนภายในโมเลกุลมีการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน

ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยหลักการแล้วสเปกตรัมซึ่งเกิดจากการดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวีและแสงขาวของสารตัวอย่าง จะแสดงสมบัติเฉพาะของสารนั้น ๆ ทำให้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์สารชนิดต่าง ๆ ได้ แต่ทั้งนี้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้เท่านั้นจะให้ผลได้เพียงคร่าวๆ เพราะลักษณะของสเปกตรัมของสารแต่ละชนิดที่ได้จะมีความกว้างมากและยังมีรายละเอียดอีกเยอะ จึงต้องใช้เทคนิคอื่น ๆ ร่วมวิเคราะห์ด้วย สำหรับการวิเคราะห์สารในเชิงปริมาณด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy สามารถทำได้โดยใช้วิธีการทำกราฟมาตรฐานระหว่างค่า absorbance และค่าความเข้มแสง ดังนั้นเมื่อสามารถวัดค่า absorbance ของสารได้ก็สามารถหาปริมาณของสารที่จะวิเคราะห์ได้จากกราฟ¹⁵

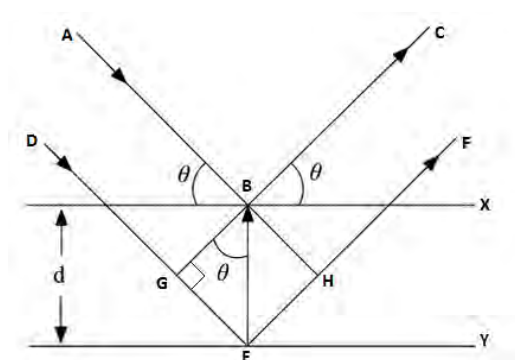


รูปที่ 7 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer

1.5.5 การวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray powder diffraction, XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างและขนาดของผลึกและการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารเคมี โดยเทคนิคนี้ไม่ทำลายสารตัวอย่าง ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์อยู่ในช่วง $0.01 - 10 \text{ \AA}$ เป็นช่วงความยาวคลื่นในช่วงเดียวกับขนาดของระยะห่างระหว่างระนาบของผลึกในสสารแทบทุกชนิด การใช้เทคนิค XRD ศึกษาโครงสร้างผลึกซึ่งมีรูปแบบการเรียงตัวที่ซ้ำ ๆ กันนี้ ผลึกจะทำหน้าที่เสมือนเป็นเกรตติงให้กับรังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไป ผลการตรวจวัดจะปรากฏเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern)

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้ จะอาศัยหลักการของ Bragg หรือ Bragg's law ที่กล่าวไว้ว่าเมื่อรังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบไปบนผลึกหรือโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบอย่างมีระเบียบ จะเกิดการสะท้อนบนระนาบ หากผลต่างของระยะเดินทางของรังสีเอกซ์มีค่าเท่ากับจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ จะเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็น XRD pattern ดังนั้นสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างผลึกได้ หากทราบความยาวคลื่นและมุมที่เกิดการเลี้ยวเบน ซึ่งคือสมการของ Bragg¹⁶



รูปที่ 8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

Bragg's Law

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

เมื่อ

n คือ เลขจำนวนเต็ม

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

 θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์บนระนาบ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

XRD pattern ที่เกิดขึ้นจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์กับความเข้มสัมพัทธ์ (Intensity) ของพีคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดย XRD pattern นี้จะเป็นลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละสารประกอบ เทคนิคนี้ใช้พิสูจน์เอกลักษณ์ของสารโดยระบุว่าสารที่ได้เป็นสารอะไรโดยเปรียบเทียบ XRD pattern ที่ได้กับสารมาตรฐาน อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่จำนวนหนึ่ง เช่น ไม่สามารถจำแนกสารที่ไม่มีรูปร่างเป็นผลึกหรือเป็นสารอสัณฐาน (amorphous) ได้หรือหากองค์ประกอบที่มีอยู่ในของผสมมีในปริมาณที่ต่ำกว่า 5% โดยน้ำหนัก จะทำให้ไม่สามารถตรวจวัดโดยเทคนิคนี้ได้ เป็นต้น



รูปที่ 9 เครื่องมือ XRD

1.5.6 การวิเคราะห์หาธาตุในสารละลายโดยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)

เทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy เป็นหนึ่งในเทคนิค Optical Emission Spectroscopy ที่ใช้วิเคราะห์หาธาตุในสารละลายได้หลายธาตุพร้อมกัน สามารถวิเคราะห์สารละลายได้ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative analysis) และเชิงปริมาณ (quantitative analysis)

หลักการของเทคนิค ICP-OES คือ การทำให้สารละลายที่นำมาวิเคราะห์แตกตัวออกเป็นละอองเล็ก ๆ โดยส่วนประกอบของเครื่อง คือ nebulizer ละอองเหล่านี้จะเคลื่อนที่เข้าไปในพลาสมาซึ่งเป็นแก๊สที่มีอิเล็กตรอนอิสระและไอออนที่มีประจุมากและยังมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 10,000 K เมื่ออะตอมหรือไอออนได้รับการกระตุ้นจากพลาสมา อะตอมหรือไอออนนั้นจะปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะตัวออกมาและถูกตรวจวัด ทำให้เทคนิค ICP-OES สามารถบอกได้ว่าสารละลายที่นำมาวิเคราะห์มีธาตุชนิดใดบ้าง นอกจากนี้ยังสามารถนำไปคำนวณความเข้มข้นของปริมาณธาตุในสารละลายได้อีกด้วยการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเทคนิค ICP-OES จำเป็นต้องใช้สารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน (standard solution) เพื่อนำมาสร้างเส้นเทียบมาตรฐาน (calibration curve) ซึ่งเทคนิค ICP-OES มีช่วงความเข้มข้นในการสร้างเส้นเทียบมาตรฐานนี้กว้างมาก สามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นได้ในช่วงต่ำกว่า ppb จนถึง ppm ได้¹⁷

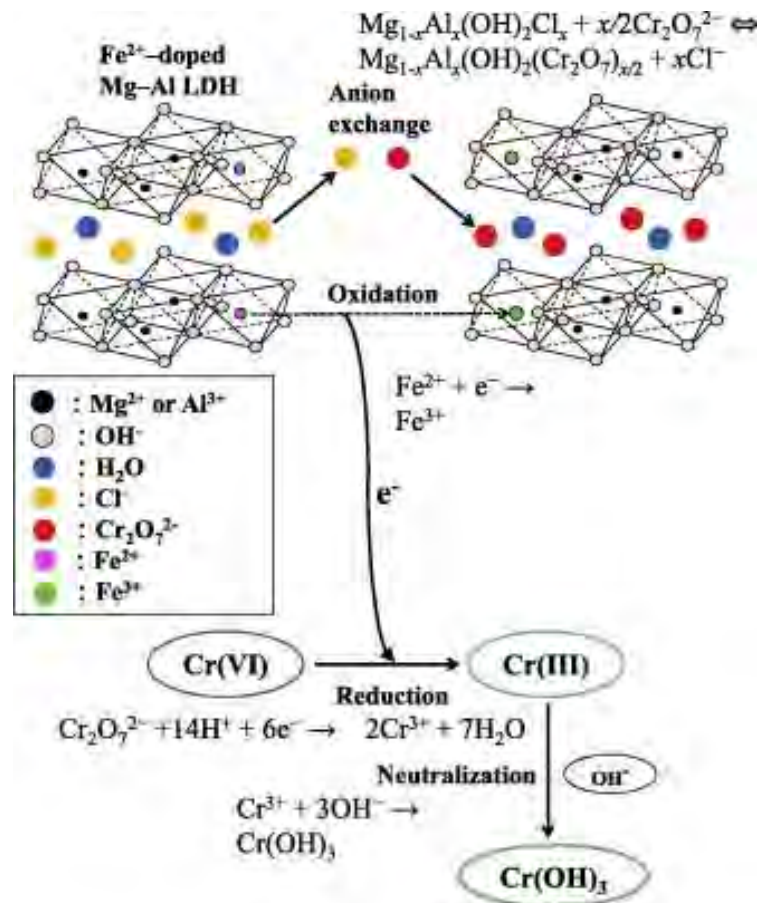


รูปที่ 10 เครื่องมือ ICP-OES¹⁷

1.6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำ เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จึงถูกนำมาศึกษาในการใช้ดูดซับโลหะหนักดังกล่าวจากสมบัติของสารประกอบเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH) ที่สามารถกำจัดออกซีแอนไอออนได้อย่างมีประสิทธิภาพ⁶ การแยกแอนไอออนออกจากสารละลายโดยใช้สารประกอบ LDH แบ่งเป็น 2 วิธี ได้แก่ การแลกเปลี่ยนประจุลบ⁹ และการตกตะกอนร่วม¹⁰ ซึ่งสารประกอบ LDH สามารถแยกและกำจัดแอนไอออนได้หลายชนิด เช่น โบรอน(Br) ไอโอดีน(I) โครเมียม (Cr) และ อาร์เซนิก(As)^{18,20} และโลหะหนัก เช่น ทองแดง(Cu) ตะกั่ว(Pb) ทองคำ(Ag)ปรอท(Hg)^{19, 20} โดยประสิทธิภาพในการกำจัดของสารประกอบ LDH ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดเบสในการทดลองและชนิดของโลหะในสารประกอบ LDH ด้วย²⁰ ในหลายปีที่ผ่านมาจึงมีการศึกษาชนิดของโลหะไดวาเลนต์ (M^{2+}) และโลหะไตรวาเลนต์ (M^{3+}) จากสูตรโครงสร้าง $[M_x M_y(OH)_z]^{x+y} A_{x/y}^{y-}, nH_2O$ ที่มีผลต่อการกำจัดแอนไอออนในสารละลาย โดยโลหะไดวาเลนต์ที่สามารถใช้ได้ เช่น Mg^{2+} Ca^{2+} Zn^{2+} Ni^{2+} และ Cu^{2+} ส่วนโลหะไดวาเลนต์ที่เป็นไปได้ เช่น Al^{3+} Fe^{3+} และ La^{3+} เป็นต้น²¹⁻²⁶

โลหะที่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ในน้ำเสียอีกชนิดหนึ่ง คือ โครเมียม ที่มีการปนเปื้อนในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และการดูดซับก็เป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่มีการพัฒนาขึ้นเพื่อกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียเนื่องจากความเรียบง่ายในการใช้งานและมีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งตัวดูดซับบางชนิดยังสามารถนำมารีไซเคิลและนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก²⁷ ในปี 2013 ทาง Tomohito และคณะได้มีการศึกษา Mg/Al-LDH ที่มี Fe^{2+} ปนอยู่ด้วยจากการตกตะกอนร่วมและใช้ในการกำจัด Cr(VI) ออกจากน้ำ โดย Mg^{2+} บางตัวในช่องว่างของ LDH จะถูกแทนที่ด้วย Fe^{2+} ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 แผนผังกระบวนการกำจัดโครเมียม 6 ด้วย Fe²⁺ บน Mg-Al LDH²⁸

ผลการทดลองที่ได้คือ Fe²⁺ ที่ปนอยู่กับ Mg/Al-LDH สามารถกำจัด Cr(VI) ออกจากสารละลายได้ โดย Cr₂O₇²⁻ จะเข้ามาในชั้นของ LDH ด้วยการแลกเปลี่ยนประจุลบกับคลอไรด์ในระหว่างชั้น จากนั้น Cr(VI) จึงถูกรีดิวซ์ด้วย Fe²⁺ กลายเป็น Cr(III) ซึ่งตกตะกอนกับ OH⁻ ได้ Cr(OH)₃ นอกจากนี้เกิดออกซิเดชันของ Fe²⁺ ส่งผลให้เกิดการผลิต FeO(OH) เพื่อดูดซับ Cr₂O₇²⁻²⁸

อาร์เซนิกหรือสารหนูในน้ำที่มีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์เป็นปัญหาที่มีคนสนใจที่จะกำจัดเป็นอย่างมาก การพัฒนาเทคนิคต่าง ๆ ในการกำจัดอาร์เซนิกออกจากน้ำดื่มเป็นที่ต้องการอย่างเร่งด่วน ซึ่ง LDH หรือสารประกอบไฮดรอกไซด์ ถือว่าเป็นตัวดูดซับที่ดีที่สุดสำหรับการกำจัดสารพิษในน้ำ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้สูง ในปี 2009 Prasanna และ Kamath²⁹ ศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบ LDH เพื่อกำจัดโลหะ As(V) ออกจากสารละลายโดยวิธีการแลกเปลี่ยนแอนไอออน โดยใช้คูโลหะหลายชนิด ได้แก่ Mg/Al Zn/Al Zn/Cr Ni/Al และ Co/Al นอกจากนี้เขายังศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบ LDH เพื่อกำจัด As(V) ออกจากสารละลายโดยวิธีการตกตะกอนร่วมด้วย พบว่าการตกตะกอนร่วมของคูโลหะ Mg/Al เท่านั้นที่สามารถตกตะกอนร่วมกับอาร์เซนิตได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบ LDH เพราะค่าการละลายของอาร์เซนิตจะขึ้นกับชนิดของโลหะที่ใช้ในการตกตะกอนร่วมหากเป็นโลหะ

อัลคาไลน์จะละลายได้ดี แต่หากเป็นโลหะอัลคาไลน์เอิร์ทหรือโลหะทรานสิชันจะละลายได้ไม่ดี ส่งผลให้การสังเคราะห์สารประกอบ LDH ของโลหะอัลคาไลน์เอิร์ทและโลหะทรานสิชันไม่ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบ LDH แต่ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลืออาร์เซเนตของโลหะนั้น ๆ แทน และในปี 2011 ทาง Chetia และคณะ ได้มีการศึกษาการกำจัดอาร์เซนิคในน้ำด้วยวิธีการดูดซับ โดยอาศัยกระบวนการเผาและทดสอบปฏิกิริยาในการเกิดซ้ำ ๆ ที่อุณหภูมิ 30 ± 1 °C ผลการทดลองพบว่า สามารถกำจัดอาร์เซนิคได้ 99.99% และยังมีปัจจัยต่าง ๆ เช่น pH ปริมาณตัวดูดซับ และเวลาในการเขย่าที่มีผลต่ออัตราการกำจัดสารพิษในน้ำ⁶

ในปีเดียวกัน Caporale และคณะได้มีการศึกษาการดูดซับ As(V) บน Mg/Al-LDH และ Mg/Fe-LDH โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับ คือ pH ความเข้มข้นของลิแกนด์ที่เป็นอินทรีย์และลิแกนด์อินทรีย์ และเวลาในการดูดซับ As(V) ผลการทดลองพบว่า ความสามารถของลิแกนด์ในการยับยั้งการตรึงของ As(V) บน Mg/Al-LDH ตามลำดับ คือ ไนเตรต < ไนไตรต์ < ซัลเฟต < ซิลิไนท์ < ทาร์เทรต < ออกซาเลต << ฟอสเฟต และการตรึงของ As(V) บน Mg/Fe-LDH ตามลำดับ คือ ไนเตรต < ซัลเฟต \approx ไนไตรต์ < ทาร์เทรต < ออกซาเลต < ซิลิไนท์ << ฟอสเฟต กล่าวคือการยับยั้งการดูดซับ As(V) เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของลิแกนด์เริ่มต้นและเพิ่มขึ้นบน Mg/Al-LDH มากกว่าบน Mg/Fe-LDH เช่นเดียวกับเวลาที่ As(V) อยู่ใน LDH นานทำให้ลิแกนด์มีประสิทธิภาพน้อยลงในการดูดซับ As(V)³⁰

ในปี 2017 ได้มีการเติมสารเข้ามาใน LDH เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารพิษในน้ำมากขึ้น ดังที่ Lijiao และคณะได้มีการศึกษาการกำจัดออกซีแอนไอออนของ As(III) As(VI) และ Cr(VI) ด้วย LDH ที่รวมตัวกับ MoS_4^{2-} พบว่า Mg/Al-LDH ที่สอดแทรก MoS_4^{2-} มีความสามารถในการกำจัดแอนไอออนของ As(III) As(VI) และ Cr(VI) ได้สูงถึง 99% ที่ 10-20 ppm ซึ่งการดักจับ HAsO_3^{2-} และ HAsO_4^{2-} มาจากปฏิกิริยารีดอกซ์ของ As กับซัลเฟอร์ ในขณะที่การกำจัด CrO_4^{2-} ถูกทำปฏิกิริยารีดอกซ์กับ MoS_4^{2-} กลายเป็น Cr(III)²⁰

จากที่กล่าวมา พบว่า การกำจัดโครเมียมและอาร์เซนิคออกจากสารละลายโดยใช้สารประกอบ LDH นั้นทำได้ทั้งสองวิธีคือ การแลกเปลี่ยนแอนไอออน และการตกตะกอนร่วม เนื่องจากโครเมียมและอาร์เซนิคที่พบในธรรมชาติอยู่ในรูปของออกซีแอนไอออน ซึ่ง Cr(VI) และ As(III) จะมีโครงสร้างและรูปแบบของสารประกอบต่างกันทำให้ความสามารถในการถูกกำจัดต่างกันด้วย นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมและอาร์เซนิค คือ ค่าความเป็นกรดเบสและชนิดของสารประกอบ LDH เป็นต้น

บทที่ 2

การทดลอง

2.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

2.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) model iCAP 6500 series (Thermo Fisher Scientific)
2. X-Ray Diffraction Rigaku, Dmax-2200 Ultima+
3. UV-Visible spectroscopy model GENESYS 10S UV-Vis (Thermo Fisher Scientific)
4. เครื่องเซนทรีฟิวจ์ รุ่น DT5-3
5. เตอบสาร Mammert UM500

2.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ปีกเกอร์ ขนาด 50 mL, 100 mL และ 250 mL
2. ขวดกำหนดปริมาตรขนาด 10 mL, 100 mL, 250 mL และ 500 mL
3. กรวยแก้ว
4. หลอดฉีดยา (syringe)
5. ที่กรองสารสำหรับหลอดฉีดยา (syringe filter) ขนาด 0.45 ไมครอน
6. ไมโครปิเปต ขนาด 1000 μ L
7. บิวเรตขนาด 50 mL
8. โกร่งบดสาร
9. หลอดเซนทรีฟิวจ์ขนาด 50 mL
10. กระจกตวงขนาด 10 mL และ 100 mL

2.1.3 สารเคมี

1. $K_2Cr_2O_7$ 99.5% (Carlo Erba Reagents)
2. $NaAsO_2$ $\geq 90.0\%$ (Sigma Aldrich)
3. $NaOH$ $\geq 99.0\%$ (Merck)
4. $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 99.0-102.0% (Ajax Finechem)
5. $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ 99.0-102.0% (Ajax Finechem)
6. $FeCl_3$ 97% (Fisher Chemical)

7. ZnCl_2 95% (Ajax Finechem)
8. $\text{Ni}(\text{Cl})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 99% (Ajax Finechem)

2.2 การทดลอง

2.2.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมที่เป็นพิษในน้ำ

ในการทดลองนี้ตัวแปรที่ศึกษา คือ ค่าความเป็นกรดเบส ความเข้มข้นของสารละลาย และชนิดโลหะของสารประกอบ LDH

1. ปีเปตสารละลาย $0.0015 \text{ M K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 130 mL ลงในบีกเกอร์แล้วใส่แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar) จากนั้นนำเครื่องวัดความเป็นกรดเบสมาควบคุมค่าความเป็นกรดเบสตลอดการตกตะกอนร่วม ปรับค่าความเป็นกรดเบสให้เท่ากับ 11 โดยใช้สารละลาย 1 M NaOH

2. ปีเปตสารละลาย $0.24 \text{ M Mg}(\text{Cl})_2$ และ $0.08 \text{ M Al}(\text{Cl})_3$ มาอย่างละ 10 mL ลงในบีกเกอร์ จากนั้นจึงเริ่มหยดสารละลายผสมนี้ลงในสารละลาย $0.0015 \text{ M K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ที่ปรับค่าความเป็นกรดเบสแล้ว และในระหว่างการทดลองให้ปรับค่าความเป็นกรดเบสให้คงที่ตลอดเวลา

3. เมื่อหยดสารละลายผสมระหว่าง $\text{Mg}(\text{Cl})_2$ และ $\text{Al}(\text{Cl})_3$ จนครบให้กวนสารผสมทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (นับจากหยดสารละลายผสมหยดแรก)

4. นำสารผสมไปปั่นเหวี่ยงตะกอนโดยใช้ความเร็ว 3000 rpm เป็นเวลา 20 นาที

ส่วนตะกอน :

ล้างตะกอนด้วยน้ำ DI สามครั้ง นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ $60 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 วัน บดตะกอนและนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารโดยใช้เทคนิค XRD

ส่วนน้ำ :

นำไปหาปริมาณของโครเมตในสารละลายหลังการตกตะกอนร่วมด้วยเครื่อง UV-Visible เทียบกับสารละลายก่อนการตกตะกอนร่วม

5. ทำการทดลองข้อที่ 1 – 4 โดยปรับค่าความเป็นกรดเบสเป็น 9 และ 7

6. ทำการทดลองข้อที่ 1 – 5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้น $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ เป็น 0.0005 M , 0.0025 M , 0.00005 M และ 0 M

7. ทำการทดลองข้อที่ 1 – 4 โดยเปลี่ยนสารละลาย $0.08 \text{ M Al}(\text{Cl})_3$ เป็นสารละลาย $0.08 \text{ M Fe}(\text{Cl})_3$

2.2.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดอาร์เซนิกที่เป็นพิษในน้ำ

ในการทดลองนี้เปลี่ยนสารละลาย $0.0015 \text{ M K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ เป็นสารละลาย 0.0023 M NaAsO_2 และ $0.00077 \text{ M NaAsO}_2$

1. ทำการทดลองตามข้อที่ 2.2.1 โดยทำการทดลองที่ค่าความเป็นกรดเบสเป็น 11 และ 9 ซึ่งสารละลายหลังจากการตกตะกอนร่วมนำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP-OES
2. ทำการทดลองตามข้อที่ 2.2.1 โดยเปลี่ยนสารละลาย 0.08 M $Al(Cl)_3$ เป็นสารละลาย 0.08 M $Fe(Cl)_3$

2.2.3 ศึกษาชนิดของโลหะไอออนที่มีผลต่อการตกตะกอน LDH

1. ทำการทดลองตามข้อที่ 2.2.1 โดยเปลี่ยนชนิดโลหะไอออน 0.24 M $Mg(Cl)_2$ เป็น 0.24 M $Zn(Cl)_2$ และ $Ni(Cl)_2$
2. ทำการทดลองข้อที่ 2.2.1 โดยทำการทดลองที่ค่าความเป็นกรดเบสเป็น 11 และ 9

2.2.4 การหาปริมาณแอนไอออนที่เป็นพิษในน้ำ

2.2.4.1 การหาปริมาณโครเมียมในน้ำด้วยเครื่อง UV-Visible Spectroscopy

1. เตรียมสารละลายเพื่อที่จะสร้างกราฟมาตรฐานโดยปิเปตสารละลาย 0.005 M $K_2Cr_2O_7$ จำนวน 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 μL ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 10 mL จำนวน 6 ขวด จากนั้นทำการ dilute ด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดกำหนดปริมาตร
2. ปิเปตสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ ที่ได้จากการตกตะกอนร่วมในการทดลองตอนที่ 2.2.1 และ 2.2.3 ลงใน ขวดกำหนดปริมาตรขนาด 10 mL โดยทำการ dilute ให้ความเข้มข้นของสารละลายอยู่ในช่วง 10-15 ppm ด้วยน้ำกลั่น
3. นำสารละลายเตรียมไว้ทั้งหมดไปตรวจวัดด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ซึ่งวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200-500 นาโนเมตร กำหนดระยะห่าง interval ระหว่างจุดอ่านเป็น 0.5 และใช้ความเร็วในการสแกนแบบเร็ว โดยทำการตรวจวัดซ้ำ 3 ครั้ง
4. นำข้อมูลของสารละลายในข้อที่ 2 มาแทนค่าในสมการเส้นตรง เพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่แท้จริง

2.2.4.1 การหาปริมาณอาร์เซนิกในน้ำด้วยเครื่อง ICP-OES

1. เตรียมสารละลาย $NaAsO_2$ ก่อนการทดลองและหลังการทดลองการตกตะกอนร่วมกับ LDH ปริมาตร 10 mL มาตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP-OES
2. นำค่าที่ได้มาคำนวณ %removal ในสมการ

$$\%RV = \frac{\text{ปริมาณ As ก่อนการตกตะกอนร่วม} - \text{ปริมาณ As หลังการตกตะกอนร่วม}}{\text{ปริมาณ As ก่อนการตกตะกอนร่วม}} \times 100$$

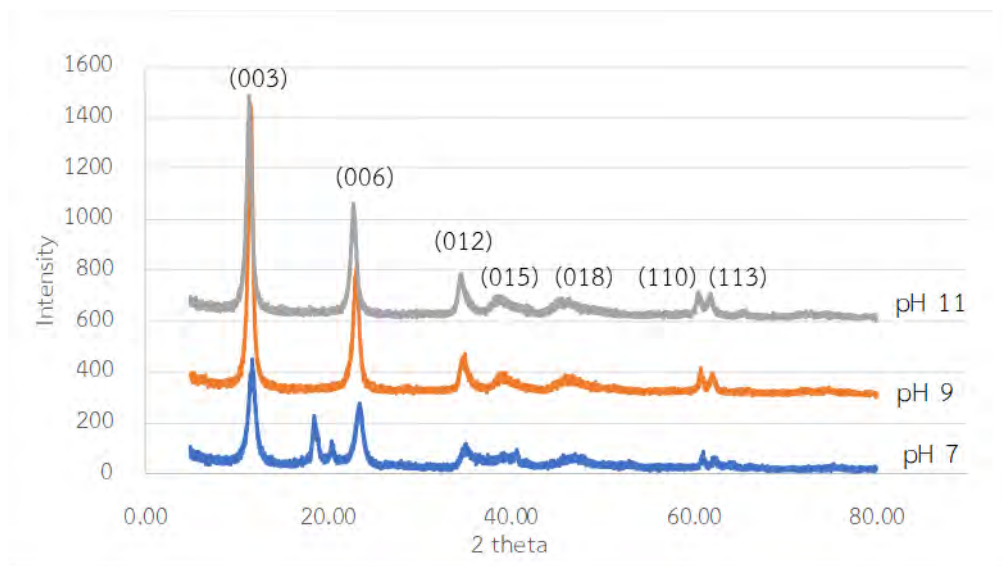
บทที่ 3

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมที่เป็นพิษในน้ำ

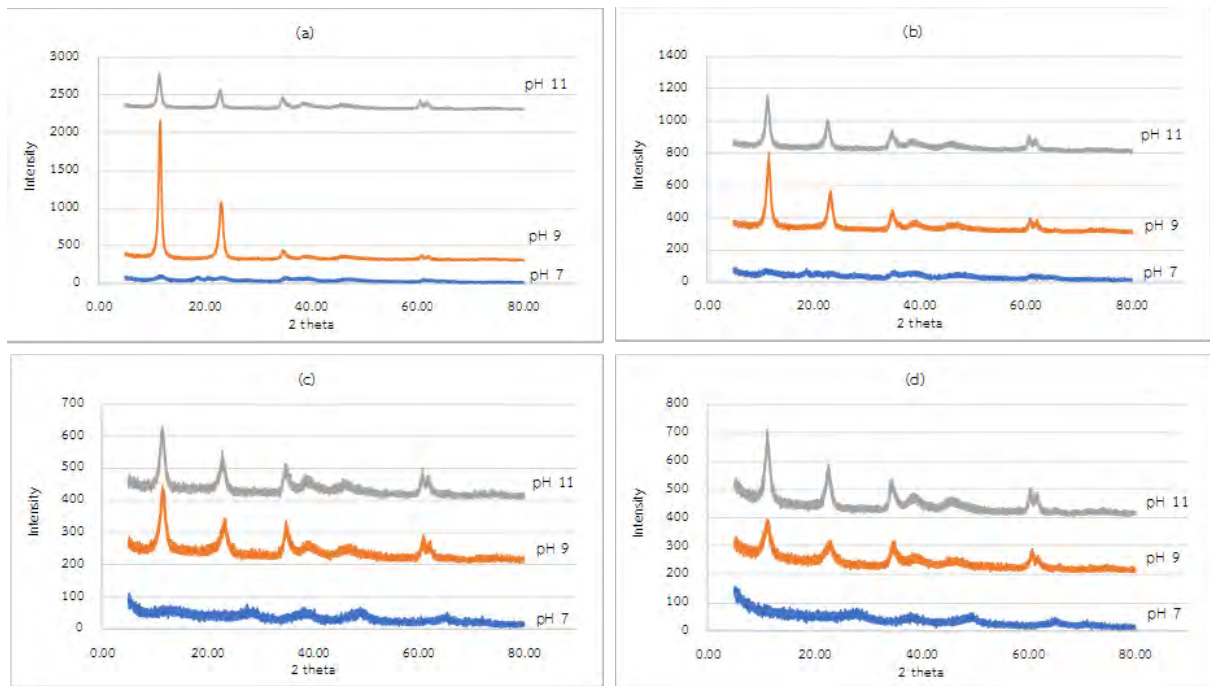
สารประกอบ LDH เป็นสารประกอบที่มีไฮดรอกไซด์เป็นองค์ประกอบต้องตกตะกอนในภาวะที่เป็นเบส การทดลองในครั้งนี้จึงเลือกตกตะกอนร่วมระหว่างสารประกอบ Mg/Al LDH กับโครเมตแอนไอออนที่ค่าความเป็นกรดเบสที่ 7, 9 และ 11 ตามลำดับ เนื่องจาก Mg/Al สามารถเกิดเป็นสารประกอบ LDH ได้ง่ายและสารประกอบ LDH มีไฮดรอกไซด์ไอออนเป็นองค์ประกอบจึงไม่สามารถตกตะกอนได้ที่ภาวะกรด²⁷

จากการทดลองการตกตะกอน LDH ร่วมกับโครเมตแอนไอออนที่ความเข้มข้น 0 ppm พบว่าเกิดตะกอนของสารที่สังเคราะห์ขึ้น มีลักษณะเป็นสีเหลืองขุ่นกระจายอยู่ทั่วสารผสม จาก XRD pattern ดังรูปที่ 12 พบว่า ที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 7, 9 และ 11 เป็นสารประกอบ LDH โดยมีระนาบที่สำคัญปรากฏอยู่ 7 ระนาบ ได้แก่ (003) (006) (012) (015) (018) (110) และ (113) ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Ramesh และคณะ²¹ ซึ่งจะเห็นว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส 7 มีระนาบอื่นนอกเหนือจาก 7 ระนาบข้างต้นปรากฏอยู่ คาดว่าน่าจะเป็นระนาบของสารประกอบชนิดอื่นที่ปะปนอยู่แต่ไม่สามารถระบุชนิดของสารได้ชัดเจน



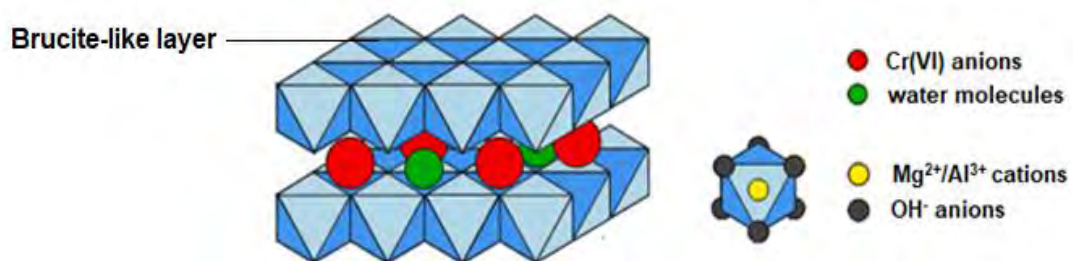
รูปที่ 12 XRD pattern ของสารประกอบ Mg/Al LDH-Cr(VI) ที่ 0 ppm

สำหรับการตกตะกอนร่วมของ LDH กับโครเมตแอนไอออนที่ความเข้มข้น 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm และ 300 ppm เป็นไปในทางเดียวกัน คือ ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 เป็นสารประกอบ LDH กล่าวคือมีระนาบที่ปรากฏ 7 ระนาบดังที่กล่าวมาข้างต้น ส่วนที่ค่าความเป็นกรดเบส 7 ไม่ได้เป็นสารประกอบ LDH ดังรูปที่ 13



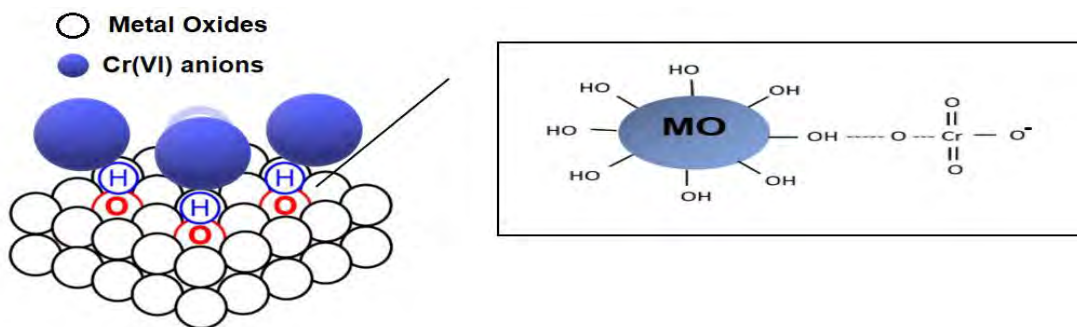
รูปที่ 13 XRD pattern ของสารประกอบ Mg/Al LDH-Cr(VI) ที่ (a)10 ppm, (b)50 ppm, (c)100 ppm และ (d)300 ppm

จาก XRD pattern รูปที่ 13 การตกตะกอนร่วมแมกนีเซียมอะลูมิเนียมกับสารละลายผสมของ Cr(VI) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่าค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 เกิดเป็นสารประกอบ LDH เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 มีปริมาณไฮดรอกไซด์มากพอที่จะทำให้เกิดเป็นสารประกอบ LDH ซึ่งไฮดรอกไซด์เป็นองค์ประกอบของสารประกอบ LDH โดยจะอยู่ล้อมรอบโลหะในรูปร่างออกตะฮีดรอล ซึ่งเรียกชั้นนี้ว่า ชั้นบรูไซต์ มีโครงสร้างแบบจำลอง ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 แบบจำลองโครงสร้างสารประกอบ Mg/Al LDH-Cr(VI)³¹

แต่ที่ค่าความเป็นกรดเบส 7 มีปริมาณไฮดรอกไซด์น้อยและยังถูกรบกวนจากโครเมตแอนไอออนในสารละลาย จึงทำให้ไม่เกิดเป็นสารประกอบ LDH แต่คาดว่าเกิดเป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ที่ไม่ได้ยึดเกาะกันเป็นโครงสร้างบรูไซต์เหมือนข้างต้น โดยสารประกอบโลหะออกไซด์นี้อาจจะสามารถจับโครเมตแอนไอออนไว้ได้ที่บริเวณผิว ดังนั้นยังสามารถที่จะดูดซับโครเมตแอนไอออนไว้ได้บางส่วน²⁹ ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 แบบจำลองโครเมตแอนไอออนที่ถูกดูดซับบนผิวของสารประกอบโลหะออกไซด์ที่ค่าความเป็นกรดเบส 7

ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดลองในส่วนของการละลายที่ได้หลังจากการทดลองการตกตะกอนร่วมที่ตรวจวัดปริมาณ Cr(VI) ด้วยเทคนิค UV-Visible spectroscopy และคำนวณ %removal (%RV) ได้ดังสมการด้านล่างนี้

สมการที่ 1 การคำนวณ %removal ของสารละลายโครเมียม

$$\%RV = \frac{\text{ปริมาณ Cr ก่อนการตกตะกอนร่วม} - \text{ปริมาณ Cr หลังการตกตะกอนร่วม}}{\text{ปริมาณ Cr ก่อนการตกตะกอนร่วม}} \times 100$$

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr(VI) ออกจากสารละลายด้วยการตกตะกอนร่วมกับ Mg/Al LDH ที่ค่าความเป็นกรดเบสและที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

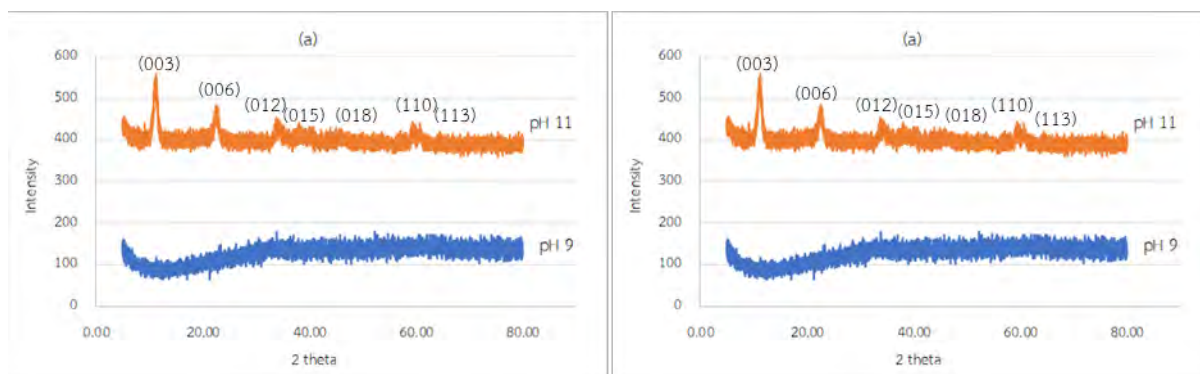
ความเข้มข้น (ppm)	pH	ความเข้มข้นก่อนตกตะกอนร่วม (ppm)	ความเข้มข้นหลังตกตะกอนร่วม (ppm)	%RV
10	7	8.27	2.09	74.7
	9	8.27	0.27	96.7
	11	8.27	1.12	86.5
50	7	44.50	21.42	51.9
	9	44.50	2.72	93.9
	11	44.50	12.08	72.9
100	7	91.55	57.90	36.8
	9	91.55	20.82	77.3
	11	91.55	38.63	57.8
300	7	271.37	179.32	33.9
	9	271.37	112.74	58.5
	11	271.37	176.71	34.9

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า ค่าความเป็นกรดเบสมีผลต่อการกำจัด Cr(VI) ออกจากสารละลายต่างกัน ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 มีค่า %RV ที่สูงกว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส 7 เหตุผล

ดังที่กล่าวไปข้างต้น และสังเกตได้ว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 มีค่า %RV สูงกว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส 11 เนื่องจากว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส 11 มีปริมาณไฮดรอกไซด์มาก เมื่อตกตะกอนร่วมกับโครเมตแอนไอออนในสารละลาย ทำให้เกิดการแข่งชั้นระหว่างไฮดรอกไซด์กับโครเมตแอนไอออนที่จะเข้าไปอยู่ในระหว่างชั้นของสารประกอบ LDH ดังนั้นจึงทำให้ %RV ที่ค่าความเป็นกรดเบส 11 น้อยกว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส 9

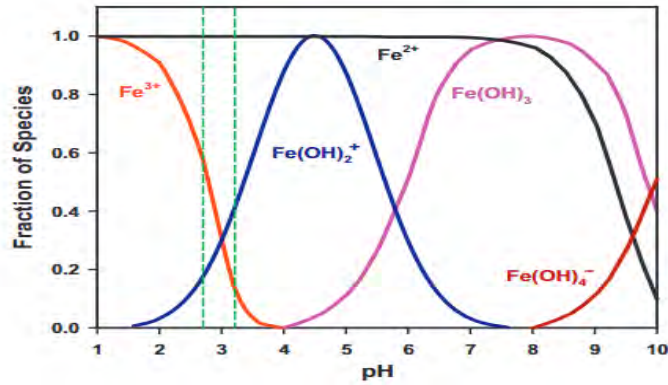
จากการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่าค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมในการดูดซับ Cr(VI) ได้ดีและได้โครงสร้างเป็นสารประกอบ LDH ได้แก่ ที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 9 และ 11 และเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายที่ 100 และ 300 ppm

จากภาวะที่เหมาะสมในการทดลองข้างต้นคือ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 9 และ 11 ได้เปลี่ยนชนิดโลหะอะลูมิเนียม ($AlCl_3$) เป็นเหล็ก ($FeCl_3$) เนื่องจากเหล็กสามารถเกิดเป็นสารประกอบ LDH กับแมกนีเซียมได้ง่ายเช่นเดียวกับอะลูมิเนียม²⁷ โดยใช้วิธีการตกตะกอนร่วมแมกนีเซียมและเหล็กกับสารละลายผสมของ Cr(VI) ที่ความเข้มข้น 100 และ 300 ppm จากนั้นนำตะกอนที่สังเคราะห์ที่ได้มาตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารที่ได้โดยเทคนิค XRD ได้ผลดังรูปที่ 16



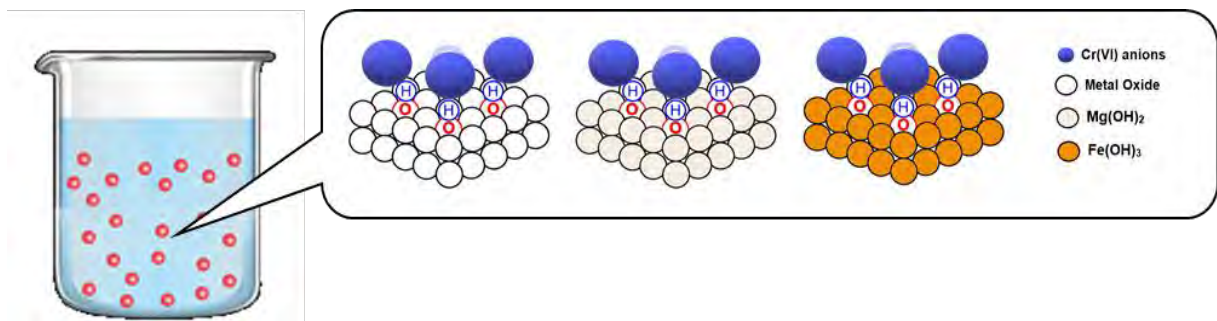
รูปที่ 16 XRD pattern ของสารประกอบ Mg/Fe LDH-Cr(VI)
ที่ (a)100 ppm และ (b)300 ppm

จาก XRD pattern รูปที่ 16 การตกตะกอนร่วมแมกนีเซียมและเหล็กกับสารละลายผสมของ Cr(VI) ที่ความเข้มข้น 100 และ 300 ppm พบว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส 11 เกิดสารประกอบ LDH ที่มีระนาบ (003) (006) (012) (015) (018) (110) และ (113) ส่วนที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 ไม่เกิดระนาบของสารประกอบ LDH เนื่องจากว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 ไฮดรอกไซด์ไปจับตัวกับเหล็กเกิดเป็น $Fe(OH)_3$ ³² โดยที่ค่าความเป็นกรดเบสที่ 9 เหล็กจะอยู่ในรูปของ $Fe(OH)_3$ สังเกตได้จากกราฟดังรูปที่ 17 ที่ค่าความเป็นกรดเบสตั้งแต่ 4 ขึ้นไป เหล็กจะอยู่ในรูปของ $Fe(OH)_3$ ทำให้เหล็กในสารละลายและไฮดรอกไซด์มีปริมาณไม่เพียงพอในการเกิดเป็นสารประกอบ LDH



รูปที่ 17 ชนิดของ Fe(III) ที่ค่าความเป็นกรดเบสต่าง ๆ³³

ที่ค่าความเป็นกรดเบส 11 เกิดเป็นสารประกอบ LDH ได้ เนื่องจากว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส 11 ไฮดรอกไซด์จะถูกนำไปใช้เกิดเป็น Fe(OH)_3 แต่ยังมีปริมาณไฮดรอกไซด์มากเกินไปที่เกิดเป็นสารประกอบ LDH และตกตะกอนร่วมกับโครเมตแอนไอออนออกมาได้มากกว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 ซึ่งคาดว่าตะกอนที่เกิดขึ้นในสารละลายที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 อาจเกิดสารประกอบชนิดอื่นที่ไม่ใช่สารประกอบ LDH แต่ยังสามารถที่จะจับกับโครเมตแอนไอออนที่ผิวได้บางส่วน ดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 การเกิดตะกอนในสารละลาย Mg/Fe-Cr(VI) ที่ความเข้มข้น 100 ppm และ 300 ppm ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9

ซึ่งสอดคล้องกับผลในส่วนของสารละลายที่ได้จากการตกตะกอนร่วม นำไปตรวจวัดปริมาณ Cr(VI) ด้วยเทคนิค UV-Visible spectroscopy และคำนวณ %Removal (%RV) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

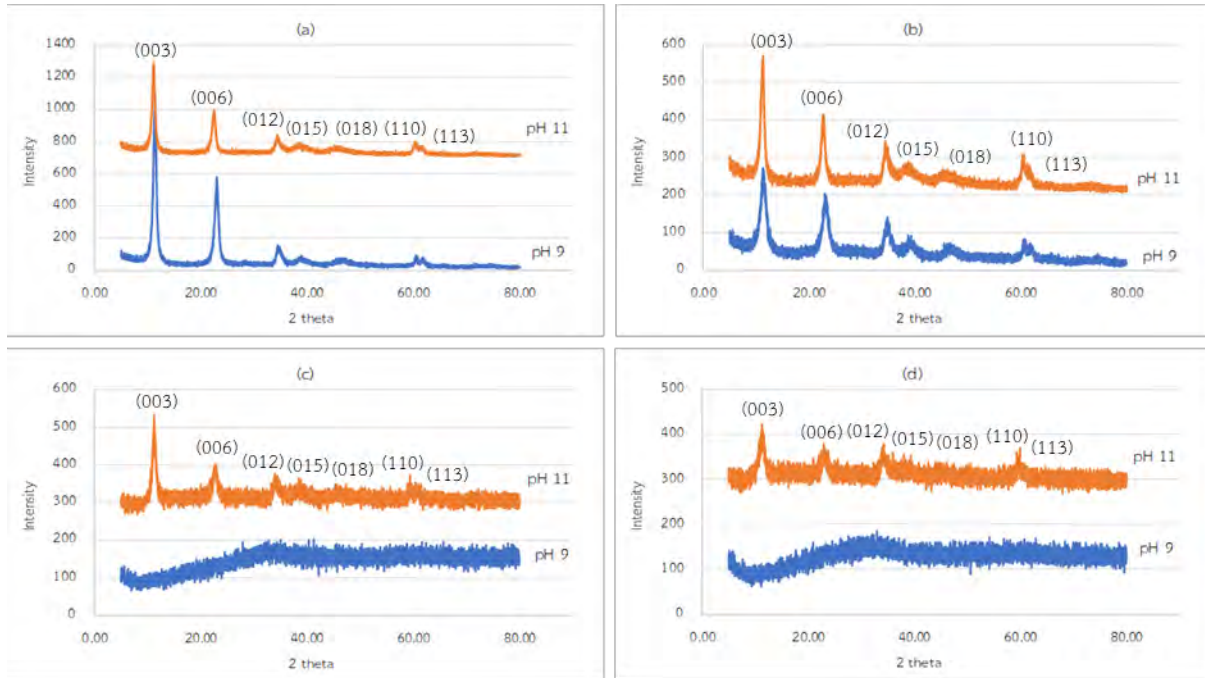
ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr(VI) ออกจากสารละลายด้วยการตกตะกอนร่วมกับ Mg/Fe LDH ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11

LDH	ค่า pH	ความเข้มข้นก่อนตกตะกอน (ppm)	ความเข้มข้นหลังตกตะกอน (ppm)	%RV
Mg/Al 3:1	pH 9	300.00	96.2	67.94
	pH 11	300.00	168.3	43.89
	pH 9	100.00	17.5	82.50
	pH 11	100.00	50.4	49.60
Mg/Fe 3:1	pH 9	300.00	17.0	94.34
	pH 11	300.00	36.1	87.96
	pH 9	100.00	1.1	98.86
	pH 11	100.00	6.9	93.12

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการตกตะกอนร่วมกันระหว่างแมกนีเซียมเหล็กกับสารละลาย Cr(VI) ทั้งที่ความเข้มข้น 100 ppm และ 300 ppm ที่ค่าความเป็นกรดเบส 11 สามารถกำจัดโครเมตแอนไอออนในสารละลายได้มากกว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 เหตุผลดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น

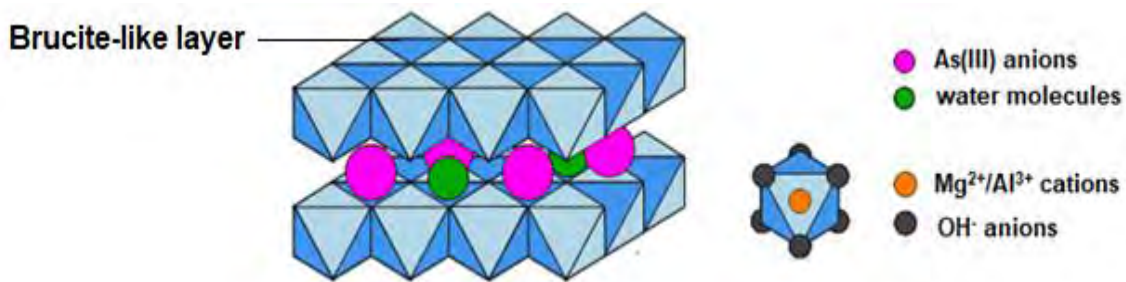
3.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดอาร์เซนิกที่เป็นพิษในน้ำ

จากการทดลองที่ 3.1 ภาวะที่เหมาะสมในการทดลองที่ใช้คือ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 9 และ 11 ในการทดลองนี้เป็นการตกตะกอนร่วมแมกนีเซียมอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมเหล็กกับสารละลายผสมของ As(III) ที่ความเข้มข้น 100 และ 300 ppm โดยทำการทดลองคล้ายกับการทดลองที่ 3.1 จากนั้นนำส่วนตะกอนที่ได้จากการทดลองไปตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารที่ได้โดยเทคนิค XRD ได้ผลดังรูปที่ 19



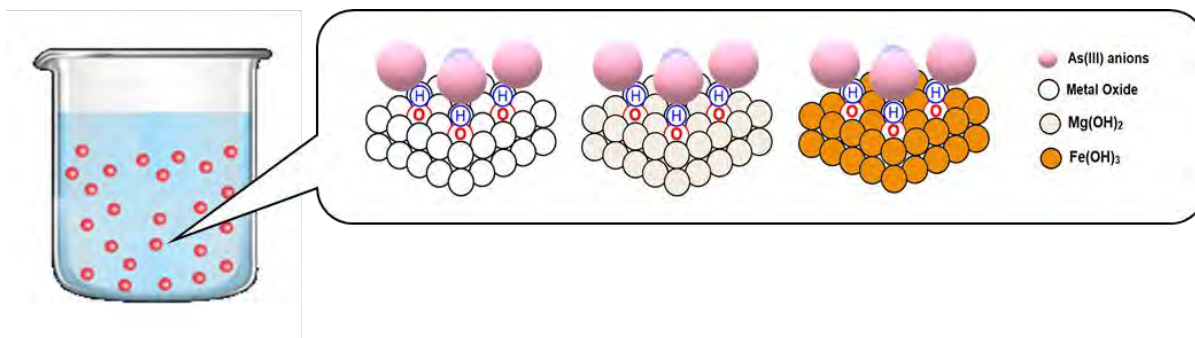
รูปที่ 19 XRD pattern ของสารประกอบ Mg/Al LDH-As(III) ที่ (a)100 ppm (b)300 ppm และ Mg/Fe LDH-As(III) ที่ (c)100 ppm (d)300 ppm

จาก XRD pattern รูปที่ 19 ผลการทดลองที่ได้เป็นไปในทางเดียวกันกับการตกตะกอนร่วมกันระหว่างสารประกอบ LDH กับโครเมตแอนไอออน คือ การตกตะกอนร่วมแมกนีเซียมอะลูมิเนียมกับสารละลายผสมของ As(III) ความเข้มข้น 100 และ 300 ppm ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 เกิดสารประกอบ LDH ที่มีระนาบ (003) (006) (012) (015) (018) (110) และ (113) โดยเกิดโครงสร้างของสารประกอบ LDH ดังแบบจำลองรูปที่ 20



รูปที่ 20 แบบจำลองโครงสร้างสารประกอบ Mg/Al LDH-As(III)³¹

ส่วนการตกตะกอนร่วมแมกนีเซียมและเหล็กกับสารละลายผสมของ As(III) ที่ความเข้มข้น 100 และ 300 ppm พบว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส 11 เกิดระนาบของสารประกอบ LDH แต่ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นอสัณฐานและไม่เป็นสารประกอบ LDH เหตุผลเช่นเดียวกันกับการทดลองตอนที่ 3.1 ดังนั้นจึงคาดว่าในสารละลายที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 เกิดเป็นอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์หรือโลหะไฮดรอกไซด์ ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 การเกิดตะกอนในสารละลาย Mg/Fe-As(III) ที่ความเข้มข้น 100 ppm และ 300 ppm ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9

ผลของ XRD ยังสอดคล้องกับการทดลองเมื่อนำสารละลายหลังจากการทดลองที่ได้จากการตกตะกอนร่วมไปตรวจวัดปริมาณ As(III) ด้วยเทคนิค ICP-OES และคำนวณ %Removal (%RV) ได้ดังสมการที่ 2

สมการที่ 2 การคำนวณ %removal ของสารละลายอาร์เซนิก

$$\%RV = \frac{\text{ปริมาณ As ก่อนการตกตะกอนร่วม} - \text{ปริมาณ As หลังการตกตะกอนร่วม}}{\text{ปริมาณ As ก่อนการตกตะกอนร่วม}} \times 100$$

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัด As(III) ออกจากสารละลายที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 โดยใช้ Mg/Al LDH และ Mg/Fe LDH

LDH	ค่า pH	ความเข้มข้นก่อนตกตะกอน (ppm)	ความเข้มข้นหลังตกตะกอน (ppm)	%RV
Mg/Al 3:1	pH 9	300.00	96.2	67.94
	pH 11		168.3	43.89
	pH 9	100.00	17.5	82.50
	pH 11		50.4	49.60
Mg/Fe 3:1	pH 9	300.00	17.0	94.34
	pH 11		36.1	87.96
	pH 9	100.00	1.1	98.86
	pH 11		6.9	93.12

จากผลการทดลองดังตารางที่ 3 พบว่า แมกนีเซียมเหล็กสามารถกำจัด As(III) ในสารละลายได้ดีกว่าแมกนีเซียมอะลูมิเนียม เนื่องจากแมกนีเซียมเหล็กมีพื้นที่ผิวของผลึกมากกว่าแมกนีเซียมอะลูมิเนียม 273 และ 219 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ ตามลำดับ²⁷ โดยอาร์เซนิกจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของ Fe(OH)_3 ได้สูง เกิดเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน³⁴ จึงทำให้แมกนีเซียมเหล็กสามารถกำจัด As(III) ออกจากสารละลายได้ดี และจากการตกตะกอนร่วมแมกนีเซียมอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมเหล็ก จะเห็นว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 มี %RV มากกว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส 11 เนื่องจากเหตุผลเช่นเดียวกันกับการทดลองตอนที่ 3.1 คือ เมื่อตกตะกอนร่วมกันระหว่างชั้นประจุบวกของสารประกอบ LDH กับสารละลายอาร์ซิเนตแอนไอออนแล้ว ที่ค่าความเป็น

กรดเบส 11 มีปริมาณไฮดรอกไซด์มากทำให้เข้าไปรบกวนอาร์ซีเนตแอนไอออนที่อยู่ในระหว่างชั้นของสารประกอบ LDH ส่งผลให้การตกตะกอนอาร์ซีเนตแอนไอออนออกจากสารละลายน้อยกว่าที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 9

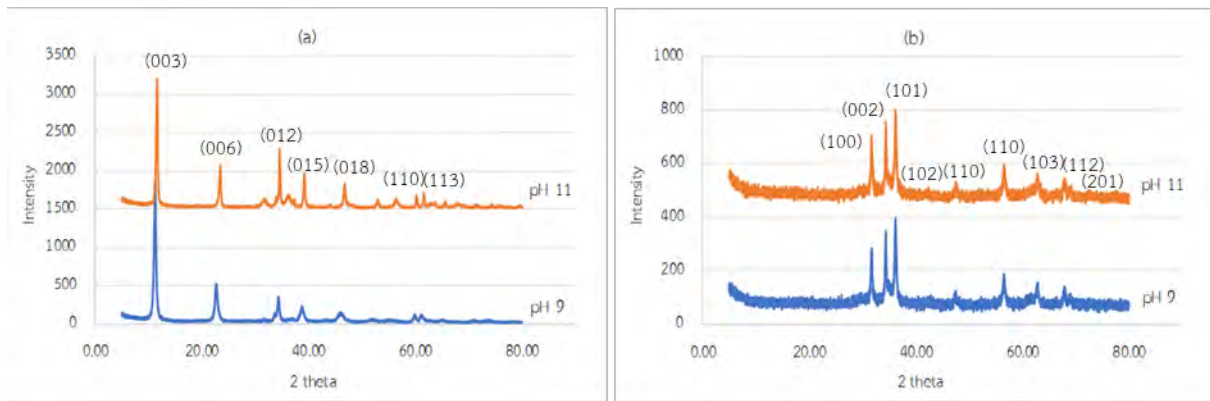
ถึงแม้ว่าที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 9 ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรดเบส ที่ As(III) ส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบ H_3AsO_3 และ $H_2AsO_3^-$ ซึ่ง H_3AsO_3 เป็นกลางอาจไม่ตกตะกอนร่วมกับ LDH แต่ระหว่างการตกตะกอน LDH และ $H_2AsO_3^-$ ซึ่งเป็นแอนไอออนจะเข้าไปจับกับชั้นประจุบวกของสารประกอบ LDH ส่งผลให้ H_3AsO_3 ซึ่งอยู่ในรูปไม่มีประจุจะเปลี่ยนรูปเป็น $H_2AsO_3^-$ ตามกฎของเลอชาเตอลิเอ สมการการแตกตัวครั้งแรกของ As(III): $H_3AsO_3 \rightleftharpoons H_2AsO_3^- + H^+$ สมดุลต้องเลื่อนไปทางขวา เมื่อรูปที่เป็นแอนไอออนเพิ่มขึ้น จึงสามารถเข้าไปจับกับชั้นประจุบวกของสารประกอบ LDH ได้ ส่งผลให้ %RV เพิ่มขึ้น

3.3 การศึกษาชนิดของโลหะไดวาเลนต์ที่มีผลต่อการตกตะกอน LDH

การศึกษาชนิดของโลหะไดวาเลนต์ในโครงสร้างสารประกอบ LDH มีผลต่อการตกตะกอนร่วมระหว่าง LDH กับแอนไอออนที่เป็นพิษในการทดลองใช้ตกตะกอนร่วมกับโครเมตแอนไอออน โดยทำการทดลองคล้ายกับตอนที่ 3.1 โดยจะทำการตกตะกอนร่วมระหว่าง LDH 4 ชนิด คือ Zn/Al LDH, Zn/Fe LDH, Ni/Al LDH และ Ni/Fe LDH กับสารละลาย Cr(VI) ที่ความเข้มข้น 100 ppm ที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 9 และ 11

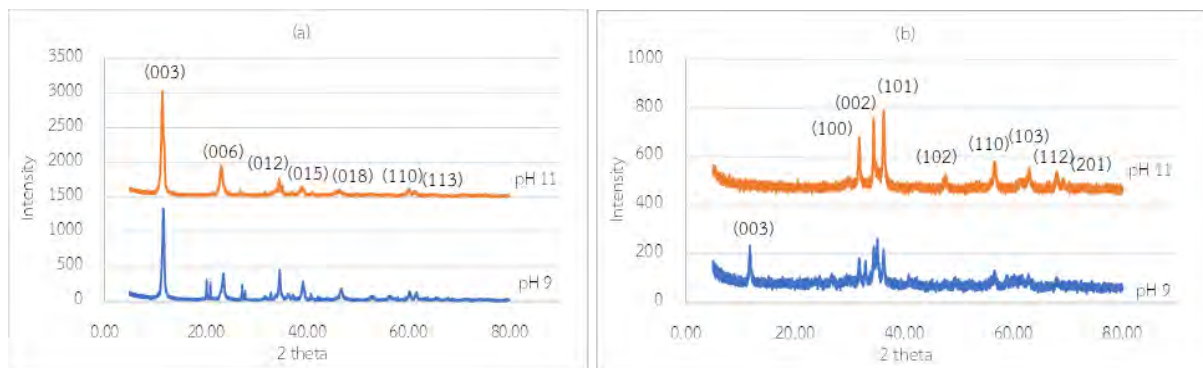
จากการทดลองการใช้โลหะไดวาเลนต์เป็นซิงค์ตกตะกอนร่วมกับอะลูมิเนียมและเหล็ก พบว่า เกิดตะกอนสีขาวของสารที่สังเคราะห์ขึ้นกระจายอยู่ทั่วสารผสม เมื่อนำสารที่สังเคราะห์ได้มาตรวจสอบโดยเทคนิค XRD ผลการทดลองที่ได้พบว่า Zn/Al เกิดเป็นสารประกอบ LDH ที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 9 และ 11 โดยมีระนาบปรากฏอยู่ 7 ระนาบ ได้แก่ (003) (006) (012) (015) (018) (110) และ (113) และยังปรากฏระนาบของสารประกอบอื่นเพิ่มเติมเกิดขึ้นเนื่องจากสารที่สังเคราะห์ได้อาจเกิดสารประกอบตัวอื่นปะปนมาด้วย ดังรูปที่ 22(a)

ส่วนการตกตะกอนของ Zn/Fe ไม่เกิดเป็นสารประกอบ LDH ซึ่งผลยังคงสอดคล้องกับการทดลองที่ 3.1 เช่นกัน โดยที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 เหล็กจะเกิดสารประกอบ $Fe(OH)_3$ คาดว่าทำให้ Zn ที่มีอยู่ในสารละลายเกิดเป็นสารประกอบ ZnO รวมถึงในภาวะที่ค่าความเป็นกรดเบสที่ 11 ด้วย เนื่องจาก Zn เกิดเป็นสารประกอบ ZnO ที่มีความชัดเจนของผลึกเรียงตัวกันได้ดีกว่าการเกิดเป็นสารประกอบ LDH สังเกตได้จากผลของ XRD ที่ปรากฏระนาบผลึกของสารประกอบ ZnO มีระนาบที่สำคัญปรากฏอยู่อย่างชัดเจน 9 ระนาบ ได้แก่ (100) (002) (101) (102) (110) (103) (200) (112) และ (201) ดังรูปที่ 22(b)



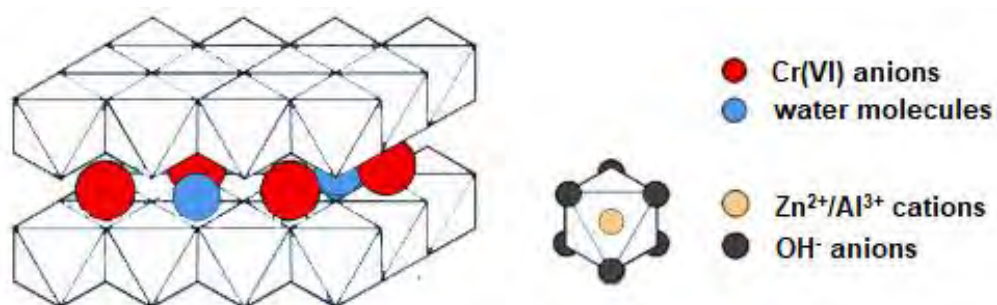
รูปที่ 22 XRD pattern ของสารประกอบ (a)Zn/Al และ (b)Zn/Fe

เมื่อนำมาตกตะกอนร่วมกับสารละลาย Cr(VI) ในภาวะเดียวกัน ผล XRD ที่ได้ยังคงสอดคล้องกัน คือ Zn/Al-Cr(VI) เกิดเป็นสารประกอบ LDH โดยปรากฏระนาบที่สำคัญ 7 ระนาบดังที่กล่าวไปข้างต้น ส่วนผล XRD ของ Zn/Fe-Cr(VI) ปรากฏระนาบ (003) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และยังปรากฏระนาบของผลึก ZnO อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 23



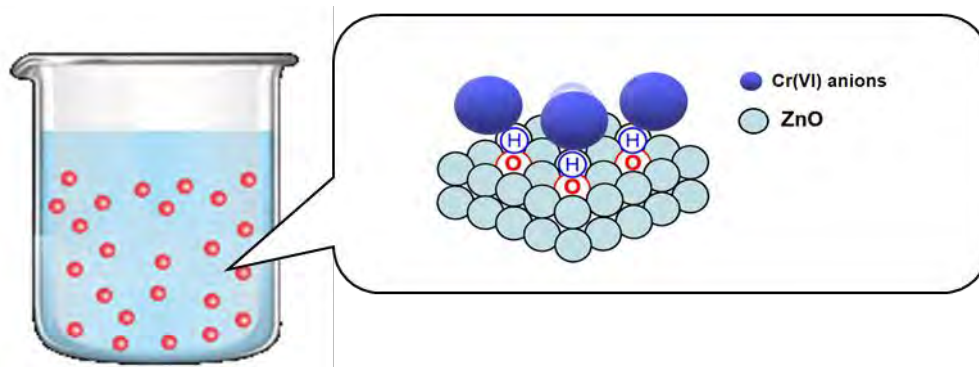
รูปที่ 23 XRD pattern ของสารประกอบ Zn/Al-Cr(VI) และ Zn/Fe-Cr(VI) ที่ 100 ppm

ดังนั้นเมื่อใช้โลหะไดวาเลนต์เป็นซิงค์ในโครงสร้างของสารประกอบ LDH ในการตกตะกอนร่วมกับโครเมตแอนไอออน ดังผล XRD ที่ปรากฏ Zn/Al สามารถตกตะกอนร่วมกับโครเมตแอนไอออนเกิดเป็นสารประกอบ LDH แสดงดังแบบจำลองรูปที่ 24



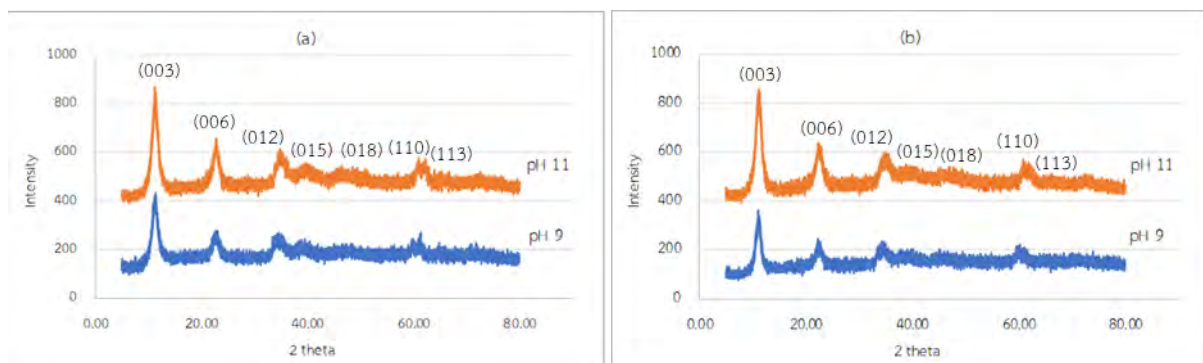
รูปที่ 24 แบบจำลองโครงสร้างสารประกอบ Zn/Al LDH-Cr(VI) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11³¹

ส่วนแบบจำลองของ Zn/Fe ที่ตกตะกอนร่วมกันกับโครเมตแอนไอออน เกิดเป็นสารประกอบ ZnO ที่สามารถดูดซับโครเมตแอนไอออนได้ที่บริเวณผิว ดังรูปที่ 25



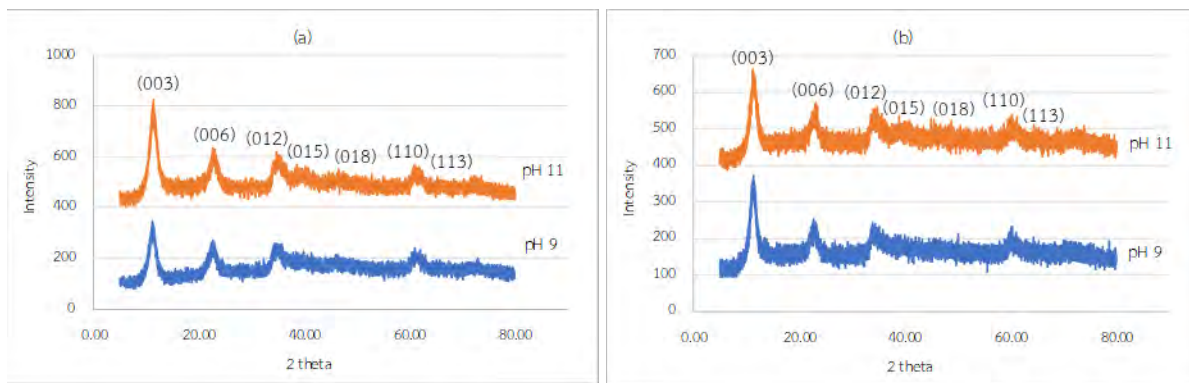
รูปที่ 25 แบบจำลองโครเมตแอนไอออนที่ถูกดูดซับบนผิวของสารประกอบ ZnO ที่ค่าความเป็นกรดเบส 11

เมื่อเปลี่ยนโลหะไดวาเลนต์เป็นนิกเกิลตกตะกอนสารประกอบ LDH กับอะลูมิเนียมและเหล็ก พบว่าสารที่ตกตะกอนออกมามีลักษณะเป็นตะกอนสีเขียวกระจายอยู่ทั่วสารผสม เมื่อนำมาตรวจสอบโดยเทคนิค XRD พบว่า Ni/Al และ Ni/Fe เกิดเป็นสารประกอบ LDH ที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 9 และ 11 โดยปรากฏระนาบของสารประกอบ LDH แสดงดังรูปที่ 26



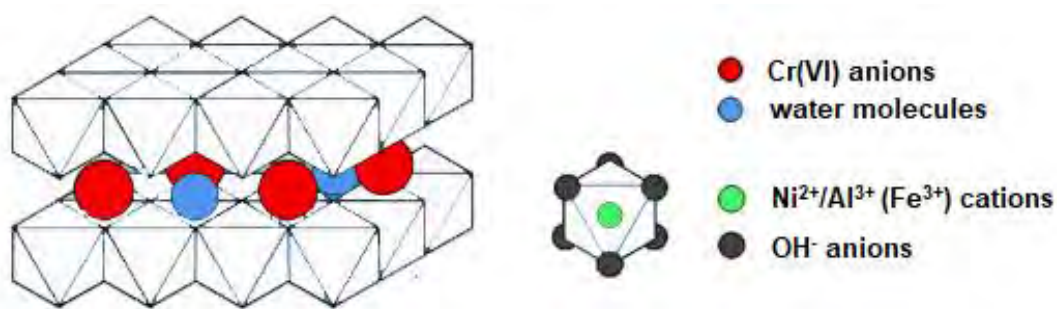
รูปที่ 26 XRD pattern ของสารประกอบ (a)Ni/Al LDH และ (b)Ni/Fe LDH

เมื่อนำมาตกตะกอนร่วมกันกับสารละลาย Cr(VI) ในภาวะเดียวกัน ผล XRD ที่ได้ยังคงสอดคล้องกัน คือ Ni/Al และ Ni/Fe ตกตะกอนร่วมกับโครเมตแอนไอออนเกิดเป็นสารประกอบ LDH ที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 9 และ 11 โดยปรากฏระนาบของสารประกอบ LDH 7 ระนาบและมีค่าความเป็นผลึกที่ต่ำลงเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 27



รูปที่ 27 XRD pattern ของสารประกอบ (a)Ni/Al LDH-Cr(VI) และ (b)Ni/Fe LDH-Cr(VI) ที่ 100 ppm

ดังนั้นเมื่อใช้โลหะไดวาเลนต์เป็นนิกเกิลในสารประกอบ LDH ตกตะกอนร่วมกับกับโครเมตแอนไอออน แสดงได้ดังแบบจำลองรูปที่ 28



รูปที่ 28 แบบจำลองโครงสร้างสารประกอบ Ni/Al LDH-Cr(VI) และ Ni/Fe LDH-Cr(VI) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11³¹

เมื่อนำสารละลายที่ได้หลังจากตกตะกอนร่วมมาตรวจวัดปริมาณ Cr(VI) ด้วยเทคนิค UV-Visible spectroscopy และคำนวณ %Removal (%RV) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr(VI) ออกจากสารละลายที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 โดยใช้ Zn/Al LDH, Zn/Fe LDH, Ni/Al LDH และ Ni/Fe LDH

ชนิดโลหะ	ความเข้มข้น (ppm)	pH	ความเข้มข้นก่อนตกตะกอนร่วม (ppm)	ความเข้มข้นหลังตกตะกอนร่วม (ppm)	%RV
Zn-Al	100	9	85.32	9.61	88.7
		11	86.32	44.81	48.1
Zn-Fe	100	9	87.32	8.30	90.5
		11	88.32	68.06	22.9
Ni-Al	100	9	96.62	1.72	98.2
		11	97.62	17.48	82.1
Ni-Fe	100	9	98.62	1.29	98.7
		11	99.62	15.46	84.5

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4 พบว่า การใช้โลหะไดวาเลนต์เป็นนิกเกิลของสารประกอบ LDH ในการตกตะกอนร่วมกับโครเมตแอนไอออนให้ค่า %RV ที่สูง ซึ่งสอดคล้องกับผล XRD ของนิกเกิลที่เกิดเป็นสารประกอบ LDH ได้ทั้ง Ni/Al และ Ni/Fe ดังนั้นจึงสามารถกำจัดโครเมตแอนไอออนในสารละลายได้ รวมถึงซิงค์อะลูมิเนียมที่ตกตะกอนร่วมกับโครเมตแอนไอออนเกิดโครงสร้างเป็นสารประกอบ LDH และมีค่า %RV ในการกำจัดโครเมตแอนไอออนสูงด้วยเช่นกัน แต่ซิงค์เหล็กที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 มีค่า %RV สูง เนื่องจากที่เห็นในผลของ XRD ปรากฏระนาบ (003) ของสารประกอบ LDH ขึ้น คาดว่าอาจจะมีการเริ่มเกิดสารประกอบ LDH ขึ้นจึงสามารถจับโครเมตแอนไอออนได้

ในส่วนของ การตกตะกอนร่วมระหว่างโลหะของสารประกอบ LDH ทั้ง 4 ชนิดคือ Zn/Al LDH, Zn/Fe LDH, Ni/Al LDH และ Ni/Fe LDH กับสารละลาย Cr(VI) ความเข้มข้น 100 ppm ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 มีค่า %RV มากกว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส 11 เหตุผลเช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 3.1 ดังนั้นในการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่านิกเกิลใช้เป็นโลหะไดวาเลนต์ของสารประกอบ LDH ที่สามารถใช้กำจัดแอนไอออนที่เป็นพิษในน้ำเสียได้ดีที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 เมื่อใช้โลหะไตรวาเลนต์เป็นอะลูมิเนียมและเหล็ก

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

4.1. สรุปผลการทดลอง

การทดลองในส่วนที่หนึ่งเป็นการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมที่เป็นพิษในน้ำ โดยใช้วิธีการตกตะกอนร่วมระหว่างสารประกอบ LDH กับสารละลายโครเมตแอนไอออน โดยศึกษาค่าความเป็นกรดเบสที่ 7 9 และ 11 ความเข้มข้นของสารละลายที่ 0 ppm, 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm และ 300 ppm และศึกษาชนิดโลหะของสารประกอบ LDH 2 ชนิด คือ Mg/Al LDH และ Mg/Fe LDH พบว่า Mg/Al สามารถกำจัดโครเมตแอนไอออนในสารละลายได้ดีและเกิดเป็นโครงสร้างของสารประกอบ LDH ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 ที่ความเข้มข้น 100 ppm และ 300 ppm ส่วน Mg/Fe เกิดเป็นสารประกอบ LDH ที่ค่าความเป็นกรดเบส 11 และสามารถกำจัดโครเมียมได้ เนื่องจากว่ามีปริมาณไฮดรอกไซด์มากเกินไปที่เกิดเป็นสารประกอบ LDH ได้ ส่วนที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรดเบสที่เหล็กจะเกิดเป็นสารประกอบ $Fe(OH)_3$ ทำให้ที่มีปริมาณไฮดรอกไซด์ไม่เพียงพอที่จะเกิดเป็นสารประกอบ LDH ได้

การทดลองในส่วนที่สองเป็นการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดอาร์เซนิกที่เป็นพิษในน้ำ โดยตกตะกอนร่วมกันระหว่าง LDH 2 ชนิดคือ Mg/Al และ Mg/Fe กับอาร์ซิเนตแอนไอออนที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 ความเข้มข้นสารละลาย 100 ppm และ 300 ppm พบว่า Mg/Al สามารถกำจัดอาร์เซนิกในสารละลายได้ดีและเกิดเป็นโครงสร้างของสารประกอบ LDH ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 ส่วน Mg/Fe สามารถกำจัดอาร์เซนิกได้มากกว่า Mg/Al เนื่องจากว่าอาร์เซนิกจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของ $Fe(OH)_3$ ได้สูง เกิดเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน และ Mg/Fe สามารถตกตะกอนร่วมกับอาร์ซิเนตแอนไอออนเกิดเป็นสารประกอบ LDH ได้ที่ค่าความเป็นกรดเบส 11 เหตุผลเช่นเดียวกันกับการทดลองส่วนแรกและที่ค่าความเป็นกรดเบส 11 มีปริมาณไฮดรอกไซด์มากกว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 ทำให้สามารถเกิดเป็นสารประกอบ LDH ได้

การทดลองส่วนที่สามเป็นการศึกษาชนิดของโลหะไดวาเลนต์ในโครงสร้างสารประกอบ LDH มีผลต่อการตกตะกอนร่วมระหว่าง LDH กับแอนไอออนที่เป็นพิษ โดยทำการตกตะกอนร่วมระหว่าง LDH 4 ชนิด คือ Zn/Al LDH, Zn/Fe LDH, Ni/Al LDH และ Ni/Fe LDH กับสารละลาย Cr(VI) ความเข้มข้น 100 ppm ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 พบว่า Zn/Al สามารถกำจัดโครเมตแอนไอออนได้และเกิดเป็นสารประกอบ LDH ทั้งที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 ส่วน Zn/Fe ไม่เกิดเป็นสารประกอบ LDH ทั้งที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 เนื่องจากว่าเกิดเป็นสารประกอบ ZnO ที่มีโครงสร้างผลึกที่ชัดเจน และสำหรับ Ni/Al และ Ni/Fe ตกตะกอนร่วมกับโครเมตแอนไอออนเกิดเป็นสารประกอบ LDH ได้ที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 และมีค่า %RV ที่สูงมากกว่า Zn/Al LDH และ Zn/Fe LDH ในทั้งสองค่าความเป็นกรดเบส

จากการทดลองทั้งสามส่วนสามารถสรุปได้ว่าภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนร่วมระหว่างสารประกอบ LDH กับแอนไอออนที่เป็นพิษในน้ำ เมื่อใช้ Mg/Al LDH สามารถกำจัดโครเมตแอนไอออนและอาร์ซิเนตแอนไอออนโดยเกิดเป็นสารประกอบ LDH ได้ที่ค่าความเป็นกรดเบสที่ 9 และ 11 ส่วน Mg/Fe สามารถกำจัดโครเมตแอนไอออนและอาร์ซิเนตแอนไอออนและเกิดเป็นสารประกอบ LDH ได้ที่ค่าความเป็นกรดเบสที่ 11 มีสาเหตุมาจากที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 เหล็กเกิดสารประกอบ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ทำให้มีปริมาณเหล็กและไฮดรอกไซด์ไม่เพียงพอในการเกิดเป็นสารประกอบ LDH เมื่อเปลี่ยนชนิดโลหะไดวาเลนต์ของสารประกอบ LDH เป็น Zn และ Ni ตกตะกอนร่วมกับโครเมตแอนไอออนที่ค่าความเป็นกรดเบส 9 และ 11 พบว่า Zn/Al, Ni/Al และ Ni/Fe สามารถกำจัดโครเมตแอนไอออนได้และเกิดเป็นสารประกอบ LDH

4.2. ข้อเสนอแนะสำหรับการทดลองในอนาคต

- ศึกษาการตกตะกอนร่วมโดยเปลี่ยนอัตราส่วนชนิดของโลหะของสารประกอบ LDH ที่มีผลต่อการกำจัดแอนไอออนที่เป็นพิษในน้ำเสีย
- ศึกษาการตกตะกอนร่วมระหว่าง Zn/Fe กับแอนไอออนที่เกิดเป็นสารประกอบ ZnO ที่มีผลต่อการกำจัดแอนไอออนได้มากขึ้น
- ศึกษาสาเหตุที่นิกเกิลเป็นโลหะไดวาเลนต์ที่ตกตะกอนร่วมกับโครเมตแอนไอออนแล้วเกิดเป็น LDH ได้ดีกว่าโลหะไดวาเลนต์ตัวอื่น
- ทดลองการตกตะกอนร่วมของ Ni/Fe LDH กับอาร์ซิเนตแอนไอออน

เอกสารอ้างอิง

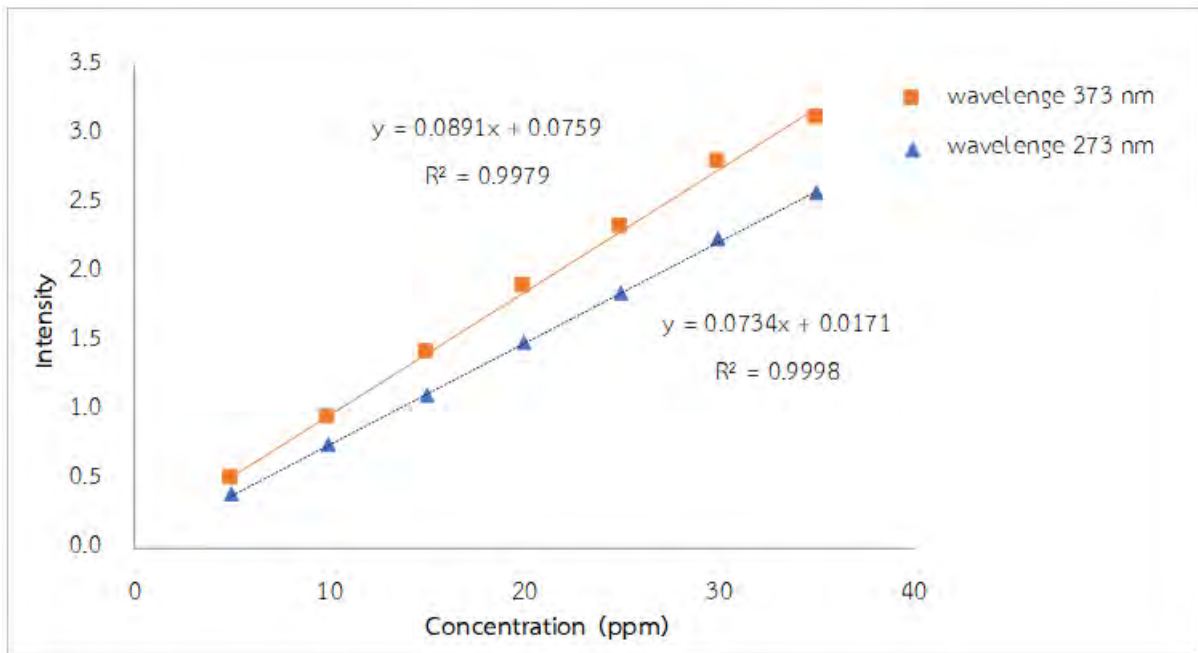
1. Saikia, J.; Saha, B.; Das, G., Efficient removal of chromate and arsenate from individual and mixed system by malachite nanoparticles. *Journal of hazardous materials* 2011, 186 (1), 575-582.
2. Zhu, K.; Gao, Y.; Tan, X.; Chen, C., Polyaniline-modified Mg/Al layered double hydroxide composites and their application in efficient removal of Cr (VI). *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 2016, 4 (8), 4361-4369.
3. WHO, Guidelines for Drinking Water Quality. In World Health Organization, 3rd ed.; 2004.
4. Steinmaus, C.; Moore, L.; Hopenhayn-Rich, C.; Biggs, M. L.; Smith, A. H., Arsenic in drinking water and bladder cancer: environmental carcinogenesis. *Cancer investigation* 2000, 18 (2), 174-182.
5. Issa, N. B.; Rajaković-Ognjanović, V. N.; Marinković, A. D.; Rajaković, L. V., Separation and determination of arsenic species in water by selective exchange and hybrid resins. *Analytica chimica acta* 2011, 706 (1), 191-198.
6. Chetia, M.; Goswamee, R. L.; Banerjee, S.; Chatterjee, S.; Singh, L.; Srivastava, R. B.; Sarma, H. P., Arsenic removal from water using calcined Mg–Al layered double hydroxide. *Clean Technologies and Environmental Policy* 2012, 14 (1), 21-27.
7. Gu, Z.; Atherton, J. J.; Xu, Z. P., Hierarchical layered double hydroxide nanocomposites: structure, synthesis and applications. *Chemical Communications* 2015, 51 (15), 3024-3036.
8. Asiabi, H.; Yamini, Y.; Shamsayei, M., Highly selective and efficient removal of arsenic (V), chromium (VI) and selenium (VI) oxyanions by layered double hydroxide intercalated with zwitterionic glycine. *Journal of hazardous materials* 2017, 339, 239-247.
9. Miyata, S., Anion-exchange properties of hydrotalcite-like compounds. *Clays and Clay minerals* 1983, 31 (4), 305-311.
10. Barahuie, F.; Hussein, M. Z.; Arulselvan, P.; Fakurazi, S.; Zainal, Z., Drug delivery system for an anticancer agent, chlorogenate-Zn/Al-layered double hydroxide nanohybrid synthesised using direct co-precipitation and ion exchange methods. *Journal of Solid State Chemistry* 2014, 217, 31-41.

11. Khan, A. I.; O'Hare, D., Intercalation chemistry of layered double hydroxides: recent developments and applications. *Journal of Materials Chemistry* 2002, 12 (11), 3191-3198.
12. <https://www.siamchemi.com/Chromate> (accessed March 5,2020).
13. Gherasim, C.-V.; Bourceanu, G.; Olariu, R.-I.; Arsene, C., A novel polymer inclusion membrane applied in chromium (VI) separation from aqueous solutions. *Journal of hazardous materials* 2011, 197, 244-253.
14. Noll, M. R., Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals. *Journal of Environmental Quality* 2003, 32 (1), 374.
15. <http://www.mwit.ac.th/~sarawoot/chem40235.htm> (accessed March 7,2020).
16. <https://www.sciencetopia.net/physics/braggs-law> (accessed March 8,2020).
17. <http://www.jcesr.org/edl/analytical-electrochemistry-lab/inductively-coupledplasma-mass-spectrometry-icp-ms/> (accessed March 11,2020).
18. Kentjono, L.; Liu, J.; Chang, W.; Irawan, C., Removal of boron and iodine from optoelectronic wastewater using Mg–Al (NO₃⁻) layered double hydroxide. *Desalination* 2010, 262 (1-3), 280-283.
19. Ma, L.; Wang, Q.; Islam, S. M.; Liu, Y.; Ma, S.; Kanatzidis, M. G., Highly selective and efficient removal of heavy metals by layered double hydroxide intercalated with the MoS₄²⁻ ion. *Journal of the American Chemical Society* 2016, 138 (8), 2858-2866.
20. Ma, L.; Islam, S. M.; Liu, H.; Zhao, J.; Sun, G.; Li, H.; Ma, S.; Kanatzidis, M. G., Selective and efficient removal of toxic oxoanions of As (III), As (V), and Cr (VI) by layered double hydroxide intercalated with MoS₄²⁻. *Chemistry of Materials* 2017, 29 (7), 3274-3284.
21. Wang, J.; Wang, X.; Tan, L.; Chen, Y.; Hayat, T.; Hu, J.; Alsaedi, A.; Ahmad, B.; Guo, W.; Wang, X., Performances and mechanisms of Mg/Al and Ca/Al layered double hydroxides for graphene oxide removal from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal* 2016, 297, 106-115.
22. Guo, Y.; Zhu, Z.; Qiu, Y.; Zhao, J., Adsorption of arsenate on Cu/Mg/Fe/La layered double hydroxide from aqueous solutions. *Journal of hazardous materials* 2012, 239, 279-288.
23. Bagherifam, S.; Komarneni, S.; Lakzian, A.; Fotovat, A.; Khorasani, R.; Huang, W.; Ma, J.; Wang, Y., Evaluation of Zn–Al–SO₄ layered double hydroxide for the removal of arsenite and arsenate from a simulated soil solution: isotherms and kinetics. *Applied clay science* 2014, 95, 119-125.

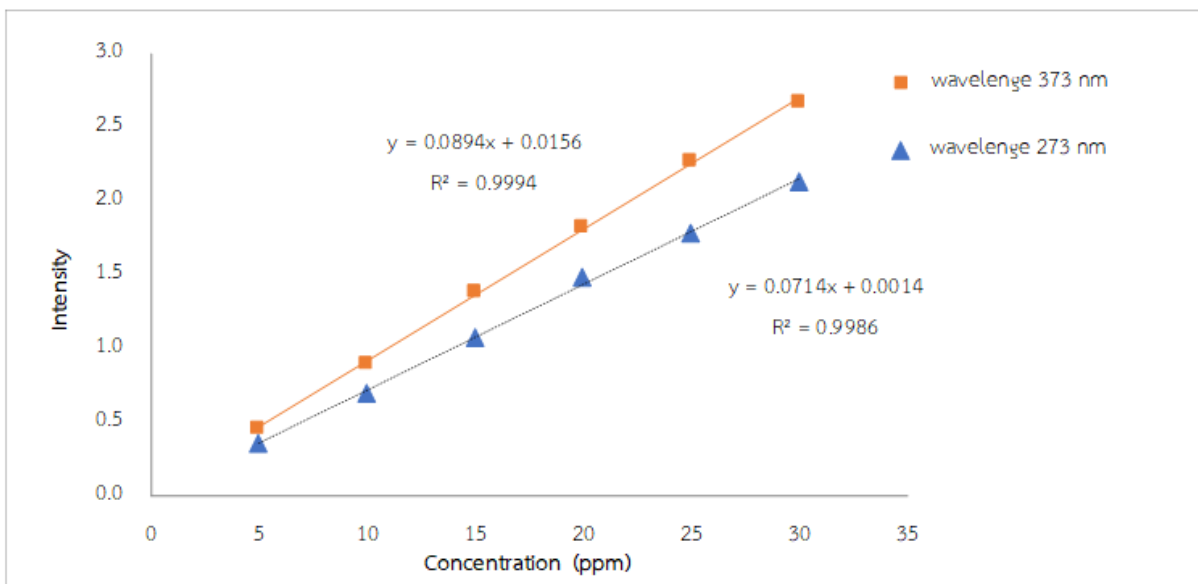
24. Yu, S.; Liu, Y.; Ai, Y.; Wang, X.; Zhang, R.; Chen, Z.; Chen, Z.; Zhao, G.; Wang, X., Rational design of carbonaceous nanofiber/Ni-Al layered double hydroxide nanocomposites for high-efficiency removal of heavy metals from aqueous solutions. *Environmental pollution* 2018, 242, 1-11.
25. Lu, Y.; Jiang, B.; Fang, L.; Ling, F.; Gao, J.; Wu, F.; Zhang, X., High performance NiFe layered double hydroxide for methyl orange dye and Cr (VI) adsorption. *Chemosphere* 2016, 152, 415-422.
26. Lu, H.; Zhu, Z.; Zhang, H.; Zhu, J.; Qiu, Y., Simultaneous removal of arsenate and antimonate in simulated and practical water samples by adsorption onto Zn/Fe layered double hydroxide. *Chemical Engineering Journal* 2015, 276, 365-375.
27. Caporale, A.; Pigna, M.; Dynes, J.; Cozzolino, V.; Zhu, J.; Violante, A., Effect of inorganic and organic ligands on the sorption/desorption of arsenate on/from Al-Mg and Fe-Mg layered double hydroxides. *Journal of hazardous materials* 2011, 198, 291-298.
28. Kameda, T.; Kondo, E.; Yoshioka, T., Preparation of Mg-Al layered double hydroxide doped with Fe²⁺ and its application to Cr(VI) removal. *Separation and Purification Technology* 2014, 122, 12-16.
29. Prasanna, S.; Kamath, P. V., Synthesis and characterization of arsenate-intercalated layered double hydroxides (LDHs): prospects for arsenic mineralization. *Journal of colloid and interface science* 2009, 331 (2), 439-445.
30. Sommella, A.; Caporale, A. G.; Denecke, M. A.; Mangold, S.; Pigna, M.; Santoro, A.; Terzano, R.; Violante, A., Nature and reactivity of layered double hydroxides formed by coprecipitating Mg, Al and As (V): effect of arsenic concentration, pH, and aging. *Journal of hazardous materials* 2015, 300, 504-512.
31. Bukhtiyarova, M., A review on effect of synthesis conditions on the formation of layered double hydroxides. *Journal of Solid State Chemistry* 2019, 269, 494-506.
32. Bokare, A. D.; Choi, W., Review of iron-free Fenton-like systems for activating H₂O₂ in advanced oxidation processes. *Journal of hazardous materials* 2014, 275, 121-135.
33. Millero, F.; Pierrot, D., Speciation of metals in natural waters. In *Chemistry of Marine Water and Sediments*, Springer: 2002; pp 193-220.
34. Razzouki, B.; El Hajjaji, S.; Azzaoui, K.; Errich, A.; Lamhamdi, A.; Berrabah, M.; Elansari, L., Physicochemical study of arsenic removal using iron hydroxide. *Journal of Materials and Environmental Science* 2015, 6 (5), 144-1450.

ภาคผนวก

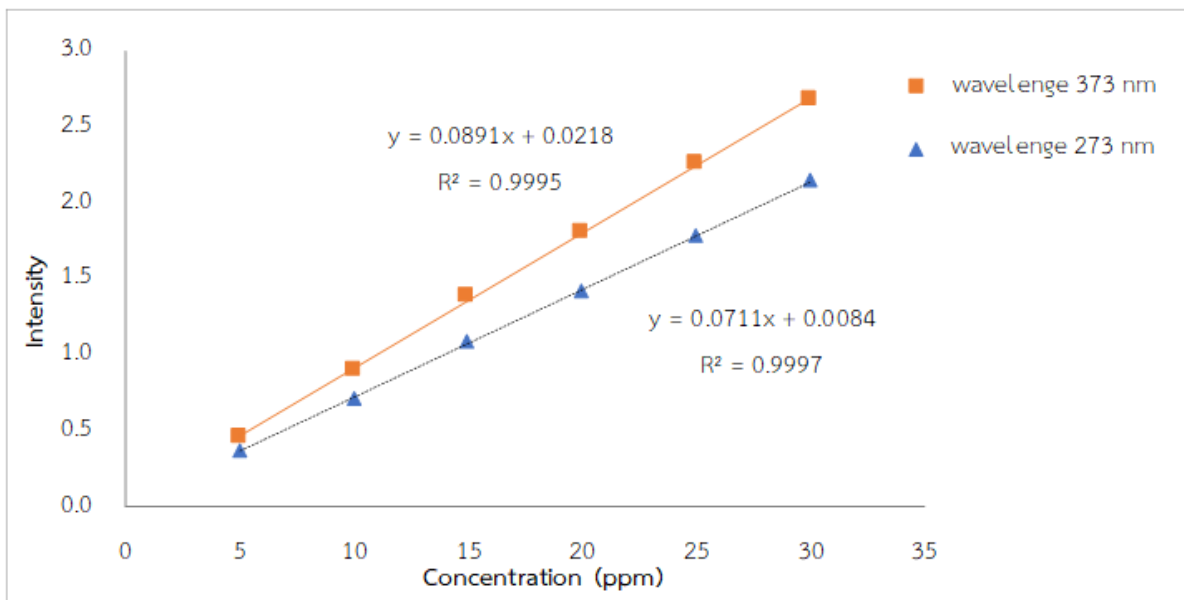
1. กราฟมาตรฐานสารละลายโครเมียมที่ความยาวคลื่น 273 nm และ 373 nm



รูปที่ 1 กราฟมาตรฐานสารละลายโครเมียมที่ความยาวคลื่น 273 nm และ 373 nm ของการทดลองตกตะกอนร่วมกับสารประกอบ Mg/Al LDH



รูปที่ 2 กราฟมาตรฐานสารละลายโครเมียมที่ความยาวคลื่น 273 nm และ 373 nm ของการทดลองตกตะกอนร่วมกับสารประกอบ Mg/Fe LDH



รูปที่ 3 กราฟมาตรฐานสารละลายโครเมียมที่มีความยาวคลื่น 273 nm และ 373 nm ของการศึกษาชนิดของโลหะไดวาเลนต์ที่มีผลต่อการตกตะกอน LDH

2. สัญญาณ UV-Visible spectroscopy ของสารละลายโครเมียม

ตารางที่ 1 ค่าสัญญาณ UV-Visible spectroscopy ของสารละลายโครเมียมในการทดลองการตกตะกอนร่วมกับสารประกอบ Mg/Al LDH

สารละลาย		ค่าสัญญาณ UV-Visible (A)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
Cr(VI) 10 ppm	เริ่มต้น	0.621	0.621	0.621	0.621	0.000
	pH 7	0.169	0.170	0.169	0.169	0.001
	pH 9	0.037	0.037	0.037	0.037	0.000
	pH 11	0.101	0.098	0.098	0.099	0.002
Cr(VI) 50 ppm	เริ่มต้น	0.665	0.668	0.667	0.667	0.002
	pH 7	0.328	0.329	0.332	0.330	0.002
	pH 9	0.216	0.215	0.216	0.216	0.001
	pH 11	0.195	0.192	0.193	0.193	0.002
Cr(VI) 100 ppm	เริ่มต้น	0.686	0.686	0.684	0.685	0.001
	pH 7	0.44	0.44	0.439	0.440	0.001
	pH 9	0.17	0.169	0.168	0.169	0.001
	pH 11	0.301	0.299	0.297	0.299	0.002
Cr(VI) 300 ppm	เริ่มต้น	0.681	0.677	0.674	0.677	0.004
	pH 7	0.38	0.381	0.38	0.380	0.001
	pH 9	0.29	0.289	0.295	0.291	0.003
	pH 11	0.449	0.446	0.446	0.447	0.002

ตารางที่ 2 ค่าสัญญาณ UV-Visible spectroscopy ของสารละลายโครเมียมในการทดลองการตกตะกอนร่วมกับสารประกอบ Mg/Fe LDH

สารละลาย		ค่าสัญญาณ UV-Visible (A)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
Cr(VI) 100 ppm	เริ่มต้น	0.619	0.602	0.598	0.61	0.0
	pH 9	0.436	0.435	0.432	0.43	0.0
	pH 11	0.314	0.315	0.317	0.32	0.0
Cr(VI) 300 ppm	เริ่มต้น	0.677	0.685	0.683	0.68	0.0
	pH 9	0.536	0.534	0.531	0.53	0.0
	pH 11	0.474	0.473	0.473	0.47	0.0

ตารางที่ 3 ค่าสัญญาณ UV-Visible spectroscopy ของสารละลายโครเมียมในการทดลองการศึกษาชนิดของโลหะไดวาเลนต์ที่มีผลต่อการตกตะกอน LDH

ชนิดสารประกอบ LDH	สารละลาย Cr(VI) 100 ppm	ค่าสัญญาณ UV-Visible (A)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
Zn/Al LDH	เริ่มต้น	0.618	0.615	0.612	0.62	0.0
	pH 9	0.674	0.694	0.706	0.69	0.0
	pH 11	0.327	0.327	0.327	0.33	0.0
Zn/Fe LDH	เริ่มต้น	0.618	0.615	0.612	0.62	0.0
	pH 9	0.598	0.598	0.600	0.60	0.0
	pH 11	0.488	0.494	0.495	0.49	0.0
Ni/Al LDH	เริ่มต้น	0.698	0.7	0.688	0.70	0.0
	pH 9	0.134	0.128	0.131	0.13	0.0
	pH 11	0.128	0.129	0.141	0.13	0.0
Ni/Fe LDH	เริ่มต้น	0.698	0.7	0.688	0.70	0.0
	pH 9	0.093	0.099	0.108	0.10	0.0
	pH 11	0.118	0.118	0.119	0.12	0.0

3. สัญญาณ ICP-OES ของสารละลายอาร์เซนิก

ตารางที่ 4 ค่าสัญญาณ ICP-OES ของสารละลายอาร์เซนิกของการทดลองการตกตะกอนร่วมกับสารประกอบ Mg/Al LDH

สารละลาย		ค่าสัญญาณ ICP-OES (count/s)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
As(III) 100 ppm	เริ่มต้น	24360	24360	24360	24360.00	0.0
	pH 9	4269	4262	4256	4262.33	6.5
	pH 11	12280	12290	12260	12276.67	15.3
As(III) 300 ppm	เริ่มต้น	37550	37600	37660	37603.33	55.1
	pH 9	12050	12060	12060	12056.67	5.8
	pH 11	21110	21110	21080	21100.00	17.3

ตารางที่ 5 ค่าสัญญาณ ICP-OES ของสารละลายอาร์เซนิกของการทดลองการตกตะกอนร่วมกับ
สารประกอบ Mg/Fe LDH

สารละลาย		ค่าสัญญาณ ICP-OES (count/s)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
As(III) 100 ppm	เริ่มต้น	16560	16570	16540	16556.67	15.3
	pH 9	189.3	189.2	189.3	189.27	0.1
	pH 11	1145	1138	1135	1139.33	5.1
As(III) 300 ppm	เริ่มต้น	37550	37600	37660	37603.33	55.1
	pH 9	2128	2125	2130	2127.67	2.5
	pH 11	4522	4529	4531	4527.33	4.7

ประวัติ

นางสาววิญญูภรณ์ โยริยะ เกิดเมื่อวันที่ 20 เดือนกรกฎาคม พ.ศ.2540 ที่จังหวัดลำพูน เมื่อปี 2558 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายสามัญ แผนการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จาก โรงเรียนจักรคำคณาทร จังหวัดลำพูน

ต่อมาในปี 2559 เข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้หลังสำเร็จการศึกษาคือ บ้านเลขที่ 67 หมู่ 4 ซอย 2 ตำบลมะกอก อำเภอบ้านโฮ่ง จังหวัดลำพูน 51120 อีเมล pangpui1997@gmail.com