

การสังเคราะห์ การพิสูจน์เอกลักษณ์และประสิทธิภาพ
การดูดซับของตัวดูดซับคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม ออกไซด์/
กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต
SYNTHESIS, CHARACTERIZATION AND ADSORPTION
PERFORMANCE OF Cu-Zn-Al OXIDE/GRAPHENE OXIDE
COMPOSITE ADSORBENTS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2560
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS, CHARACTERIZATION AND ADSORPTION
PERFORMANCE OF Cu-Zn-Al OXIDE/GRAPHENE OXIDE
COMPOSITE ADSORBENTS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาสาระของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




ACADEMIC YEAR 2017

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์ การพิสูจน์เอกลักษณ์และประสิทธิภาพการดูดซับของ
ตัวดูดซับคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม ออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ คอมโพสิต
Synthesis, characterization and adsorption performance of Cu-
Zn-Al oxide/graphene oxide composite adsorbents

ชื่อนักศึกษา นางสาวพิชญา ไคลมี รหัสนักศึกษา 57050474
นางสาววิลาสิณี สวงโท รหัสนักศึกษา 57050509
นายสุรัตน์ โคตรคำหาร รหัสนักศึกษา 57050543

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช กรรมการ	
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสังเคราะห์ การพิสูจน์เอกลักษณ์และประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม ออกไซด์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพิชญา ไคลมี	รหัสนักศึกษา 57050474
	นางสาววิลาสิณี สวงโท	รหัสนักศึกษา 57050509
	นายสุรัตน์ โคตรคำหาร	รหัสนักศึกษา 57050543
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต	
ภาควิชา	เคมี	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2560	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์	

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษนี้คือการศึกษาการสังเคราะห์ การพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียมออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Cu-Zn-AL/GO) คอมโพสิต โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นสารตกตะกอนและใช้ $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ เป็นสารตั้งต้นด้วยอัตราส่วนโมลที่แตกต่างกันของ Cu-Zn-AL/GO คือ 10:1 20:1 และ 30:1 ตามลำดับ จากนั้นตะกอนผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นไปกรอง ล้าง อบแห้งและเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างของ Cu-Zn-AL/GO ที่สังเคราะห์ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ เช่น การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ (FT-IR) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (EDS) และเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยใช้สมบัติทางความร้อน (TGA) ผลการทดลองพบว่าผลที่ได้จาก XRD และ FT-IR ยืนยันว่ารูปแบบโครงสร้างผลึกและหมู่ฟังก์ชันของ Cu-Zn-AL/GO คอมโพสิต สอดคล้องกับ CuO ZnO และ Al_2O_3 ตั้งต้น ในขณะที่ไม่พบฟีดเอกลักษณ์ของ GO ผลการทดสอบด้วยเทคนิค SEM พบว่ารูปร่างของอนุภาค Cu-Zn-AL/GO ไม่แตกต่างกันกับรูปร่างของอนุภาค Cu-Zn-Al ที่บริสุทธิ์ (โดยไม่มีการใส่ GO) นอกจากนี้ยังศึกษาสมบัติการดูดซับของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH ที่ไม่มีการเผาผลึก) Cu-Zn-Al และสารประกอบ Cu-Zn-AL/GO ทั้งหมดที่สังเคราะห์ได้จากการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มิน ผลการทดลองพบว่าวัสดุคอมโพสิต Cu-Zn-AL/GO ที่มี

อัตราส่วน 10:1 มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีที่สุด โดยประสิทธิภาพการดูดซับที่เพิ่มขึ้นก็เนื่องจากไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการใส่ GO ลงไปใน Cu-Zn-AU/GO คอมโพสิต จึงทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้นจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับได้ดียิ่งขึ้น

คำสำคัญ : กระบวนการอัลตราซาวด์ช่วยตกตะกอนร่วม กราฟีนออกไซด์ สมบัติการดูดซับ โลหะคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม วัสดุคอมโพสิต อินดิโกคาร์มิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Synthesis, characterization and adsorption performance of Cu-Zn-Al oxide/graphene oxide composite adsorbents	
Student Name	Miss Pichaya Klaimée	Student ID 57050474
	Miss Wilasinee Suangtho	Student ID 57050509
	Mr. Surat Khotkhumharn	Student ID 57050543
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2017	
Advisor	Dr.Chaval Sriwong	

Abstract

The aims of this special project are to investigate the synthesis, characterization and adsorption performances of Copper-Zinc-Aluminium oxide/graphene oxide (Cu-Zn-Al/GO) composite adsorbents. These adsorbent samples were synthesized through an ultrasound assisted co-precipitation method using sodium carbonate (Na_2CO_3) as a precipitating agent based on the use of $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ as precursors with different mole ratios of Cu-Zn-Al/GO, such as 10:1, 20:1 and 30:1 respectively. Then, the precipitated products were filtered, washed, dried and calcined at $350\text{ }^\circ\text{C}$ for 3 h. The synthesized Cu-Zn-Al/GO samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), Fourier-transformed infrared spectroscopy (FT-IR), scanning electron microscope (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and thermogravimetric analysis (TGA) techniques. XRD and FT-IR results confirmed that the crystalline phases and functional groups of Cu-Zn-Al/GO composites were corresponding to pristine CuO, ZnO and Al_2O_3 , whereas the GO characteristic peak was not observed. From the SEM results, the morphologies of Cu-Zn-Al/GO particles were not different from the pure Cu-Zn-Al (without GO loading). Moreover, the adsorption properties of layer double hydroxy (LDH; without calcined), Cu-Zn-Al and all the Cu-Zn-Al/GO composites were also studied by removing of Indigo carmine dye solution. The results showed that

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ การคัดลอกหรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cu-Zn-Al/GO composites with a ratio of 10:1 showed the best adsorption performance. The improved adsorption performance can be attributed to the highest presence of GO into the Cu-Zn-Al/GO composite led to the increase of active surface adsorption, enhancing a good adsorption performance of this adsorbent.

Keywords: Copper-Zinc-Aluminium oxide, graphene oxide (GO), composite material, ultrasound assisted co-precipitation method, indigo carmine (IC), adsorption property



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาโครงการพิเศษฉบับนี้สามารถสำเร็จได้เป็นอย่างดีด้วยความอนุเคราะห์จาก ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ และถ่ายทอดความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการพิเศษรวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอดจนทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณประธานการสอบโครงการพิเศษ ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ และกรรมการสอบโครงการพิเศษ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช ที่ได้ให้เกียรติและสละเวลาเพื่อสอบโครงการพิเศษนี้ตลอดจนให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์และชี้แนะข้อผิดพลาดเพื่อให้โครงการพิเศษฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีและในคณะวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และน้อง ๆ ที่คอยช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่คอยสนับสนุน ส่งเสริมและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

พิชญา ไคลมี
วิลาสิณี สวงโท
สุรัตน์ โคตรคำหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Layered double hydroxides : LDH).....	4
2.1.1 ลักษณะโครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์.....	6
2.1.2 การดัดแปลงโครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์.....	7
2.1.3 ประโยชน์ของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์.....	10
2.2 การดูดซับ (Adsorption).....	11
2.2.1 ประเภทของตัวดูดซับ.....	12
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	13
2.2.3 สมดุลและไอโซเทอมการดูดซับ.....	14
2.3 สีย้อม (Dyes).....	17
2.3.1 ลักษณะของสีย้อม.....	17
2.3.2 เคมีของสีย้อม.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมีเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ประเภทของสีย้อม.....	19
2.4 สีย้อมอินดิโกคาร์มีน (Indigo CarmineDye).....	20
2.4.1 การสกัดสีคราม	21
2.4.2 การสังเคราะห์ทางเคมีของสีคราม	21
2.4.3 คุณสมบัติทางเคมีของสีคราม	22
2.5 กราฟีน.....	23
2.5.1 สมบัติของกราฟีน.....	23
2.5.2 รีดิคซ์กราฟีนออกไซด์	24
2.5.3 การสังเคราะห์รีดิคซ์กราฟีนออกไซด์.....	25
2.5.4 คุณสมบัติของรีดิคซ์กราฟีนออกไซด์	26
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	30
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	30
3.2 สารเคมี	31
3.3 วิธีการทดลอง.....	31
3.4 การวิเคราะห์และการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์	34
3.5 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับ	34
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	36
4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคต่างๆ	36
4.1.1 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) .	36
4.1.2 เครื่องวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์	38
4.1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(Scanning Electron Microscopy).....	39
4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวและองค์ประกอบธาตุตัวดูดซับในระดับจุลภาค.....	41
4.1.5 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยใช้สมบัติทางความร้อน .	44
4.2 การทดสอบประสิทธิภาพตัวดูดซับโลหะออกไซด์	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 4.2 การทดสอบประสิทธิภาพตัวดูดซับโลหะออกไซด์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสีย้อมอินดิโก้คาร์มีน.....	45
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	51
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
เอกสารอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก.....	57
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ.....	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงความแตกต่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี	13
3.1 แสดงอัตราส่วนปริมาณของ Cu-Zn-Al และ GO โดยน้ำหนักที่ใช้	33
4.1 องค์ประกอบธาตุของกราฟีนออกไซด์	42
4.2 องค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับ Cu-Zn-Al (LDH)	43
4.3 องค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับ Cu-Zn-Al/GO 20:1	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะโครงสร้างของแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์	4
2.2 ลักษณะโครงสร้างของแกรไฟต์ (graphite)	5
2.3 ลักษณะของโครงสร้างมอนอริโกลไนด์ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียว	5
2.4 ลักษณะโครงสร้างของไฮโดรทัลไซต์	6
2.5 ชั้นโลหะไฮดรอกไซด์หรือชั้นบรูไซต์	7
2.6 การแทนที่ M^{2+} ด้วย M^{3+} ในชั้นโลหะไฮดรอกไซด์	7
2.7 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange)	8
2.8 กระบวนการฟื้นฟูสภาพ (reconstruction)	9
2.9 การเตรียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สอดแทรกด้วยไอออนประจุลบโดยวิธีต่าง	10
2.10 การสังเคราะห์สีครามโดยเทคนิคของ Heumann	22
2.11 การสังเคราะห์สีครามโดยเทคนิคของ Pflieger	22
2.12 สูตรโครงสร้างของสีคราม (2, 2'-Bis(2,3-dihydro-3-oxoindolylidene), Indigotin)	22
2.13 สูตรโครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน (indigo carmine)	23
2.14 ลักษณะโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์	25
2.15 แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธี Sonication	26
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวดูดซับโลหะออกไซด์ Cu-Zn-Al ผสมกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์ช่วยในกระบวนการตกตะกอนร่วม (a) GO (b) LDH (c) Cu-Zn-Al/GO 10:1 (d) Cu-Zn-Al/GO 20:1 (e) Cu-Zn-Al/GO 30:1 และ (f) Cu-Zn-Al	37
4.2 FT-IR สเปกตรัมของ GO, Cu-Zn-Al (LDH) และ Cu-Zn-Al/GO อัตราส่วน 10:1 20:1 และ 30:1 (a) GO (b) LDH (c) Cu-Zn-Al/GO 10:1 (d) Cu-Zn-Al/GO 20:1 และ (e) Cu-Zn-Al/GO 30:1	39
4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ a) LDH b) Cu-Zn-Al/GO 10:1 c) Cu-Zn-Al/GO 20:1 d) Cu-Zn-Al/GO 30:1 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่าและ 5,000 เท่า	40
4.4 ภาพการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ของกราฟีนออกไซด์ (GO)	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ภาพการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ของตัวดูดซับ Cu-Zn-Al (LDH).....	42
4.6 ภาพการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ของตัวดูดซับ Cu-Zn-Al/GO 20:1.....	43
4.7 การสลายทางความร้อนของ GO และตัวดูดซับ Cu-Zn-Al และ Cu-Zn-Al/GO คอมโพสิต อัตราส่วน 10:1 20:1 และ 30:1	45
4.8 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอินดิโกคาร์มิน(มิลลิกรัม/ลิตร) กับค่าการดูดกลืนแสง.....	46
4.9 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวดูดซับ Cu-Zn-Al (LDH) ที่ใช้ในปริมาณ 50 75 100 และ 125 มิลลิกรัม.....	47
4.10 กราฟแห่งแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวดูดซับ Cu-Zn-Al(LDH) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เวลา 60 นาที.....	47
4.11 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินโดยใช้ตัวดูดซับ LDH/GO คอมโพสิต ในอัตราส่วน 20:1 ที่ไม่เผา.....	48
4.12 กราฟแห่งแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินโดยใช้ตัวดูดซับ Cu-Zn-Al/GO ในอัตราส่วน 10:1 20:1 และ 30:1 ที่เวลา 30 นาที	49
4.13 กราฟแห่งแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินโดยใช้ตัวดูดซับ LDH, LDH/GO และ Cu-Zn-Al/GO 20:1 ที่เวลา 30 นาที	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันได้มีการก่อสร้างอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย เช่น อุตสาหกรรมพอกหนัง อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น โดยมลภาวะที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีหลายอย่างด้วยกัน อาทิ มลภาวะทางอากาศ มลภาวะทางเสียง และมลภาวะทางน้ำ ซึ่งปัญหาหลักที่พบในโรงงานอุตสาหกรรม ก็คือการปล่อยน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการผลิต หรือการชะล้างผลิตภัณฑ์ โดยน้ำเสียดังกล่าวมักประกอบไปด้วยสารเคมีและสารปนเปื้อนที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อแหล่งน้ำและชุมชนโดยรอบ ในน้ำเสียจะมีสารเคมีตกค้างจำพวกโลหะหนักเจือปนในรูปเกลืออนินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ไม่ว่าจะเป็นระบบทางเดินหายใจ ระบบประสาท เป็นตัวการทำให้เกิดเซลล์มะเร็ง รวมทั้งทำให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรม โดยวิธีการกำจัดโลหะหนักหรือสิ่งเจือปนมีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (Precipitation) การแยกโดยใช้กระแสไฟฟ้า (Electrolytic Process) การแยกด้วยแผ่นเมมเบรน (Membrane separation) การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Process) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange) และการใช้สารดูดซับ (Adsorption) ซึ่งกระบวนการกำจัดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น เทคโนโลยีของการกำจัดน้ำเสีย ความเข้มข้น เวลา สถานะออกซิเดชันของโลหะ ความเป็นกรดต่างของน้ำ และกลไกการกำจัดโลหะ โดยงานวิจัยนี้เลือกศึกษาการใช้สารดูดซับ (Adsorption) ซึ่งเป็นวิธีการกำจัดโลหะหนักที่ประหยัดง่าย เป็นมิตรกับระบบนิเวศ

เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (layered double hydroxide, LDH) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างของไฮดรอกไซด์ (Hydroxide : OH^-) จัดเรียงตัวต่อกันเป็นแผ่นล้อมโลหะไอออนบวกโดยมีเลขออกซิเดชันบวกสองและบวกสาม มักมีการแทรกระหว่างชั้นด้วยโมเลกุลหรือไอออนขนาดเล็ก เช่น น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ การสังเคราะห์เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ทำได้ง่ายทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวางในปฏิกิริยาต่าง ๆ โดยทั่วไป LDH มักถูกใช้งานเป็นวัสดุดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากมีพื้นผิวมากและมีไอออนบวกของโลหะอยู่ด้วย โครงสร้างแบบชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีลักษณะคล้ายคลึงกับแผ่นกราฟีนในลักษณะหกเหลี่ยมรวงผึ้งกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide : GO) จึงถูกใช้เป็นตัวนำมาสวมเข้ากับ LDH เนื่องจากกราฟีนออกไซด์เป็นอีกรูปหนึ่งของคาร์บอนมีลักษณะเป็นแผ่นบางสองมิติ (2D) ที่มีพื้นผิวสูง จึงส่งผลให้เป็นการเพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มการกระจายตัวที่ดีให้กับชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการสังเคราะห์และพิกัดของอนุภาคตัวดูดซับโลหะคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม ผสมกับกราฟีนออกไซด์ โดยใช้อัลตราซาวด์ช่วยในกระบวนการตกตะกอนร่วมโดยเมื่อนำตัวดูดซับโลหะคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม ที่ผสมกับกราฟีนออกไซด์จะทำให้โครงสร้างมีความเสถียร มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น มีความแข็งแรงและใช้เป็นตัวดูดซับได้ดีกว่าเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH) แบบปกติ โดยได้นำโลหะคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม (Cu-Zn-Al) ผสมกับกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วน 20:1 เปรียบเทียบกับเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH) แบบปกติ และเมื่อนำ LDH/GO มาทดสอบการดูดซับโดยตัวถูกดูดซับที่ใช้ คืออินดิโก คาร์มิน (indigo carmine) ซึ่งคาดว่า การสอดแทรกของกราฟีนออกไซด์จะช่วยขยายระยะห่างช่องว่างระหว่างชั้นให้มีความเหมาะสมสำหรับการดูดซับ indigo carmine และนำตัวดูดซับที่เตรียมได้มาศึกษาลักษณะทางกายภาพและพิกัดของอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) เทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยใช้สมบัติทางความร้อน (TGA) และ ตรวจสอบโครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรด (FT-IR)

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับโลหะคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม (Cu-Zn-Al) และตัวดูดซับโลหะคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม ผสมกับกราฟีนออกไซด์ (Cu-Zn-Al/GO) ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมโดยใช้อัลตราซาวด์
2. พิกัดของอนุภาคตัวดูดซับโลหะ คอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม ออกไซด์ผสมกับกราฟีนออกไซด์
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีอินดิโกคาร์มิน (Indigo carmine)
4. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโดยเปรียบเทียบระหว่างตัวดูดซับโลหะคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม ออกไซด์กับตัวดูดซับโลหะคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม ออกไซด์ที่ผสมกับกราฟีน-ออกไซด์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาการสังเคราะห์ตัวดูดซับโลหะคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม ออกไซด์ผสมกับกราฟีนออกไซด์ (Cu-Zn-Al/GO) ในอัตราส่วน 10:1 20:1 และ 30:1 โดยใช้อัลตราซาวด์ช่วยในกระบวนการตกตะกอนร่วม
2. ศึกษาหาความเข้มข้นและเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายอินดิโกคาร์มิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มิน ของตัวดูดซับระหว่างตัวดูดซับโลหะคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม กับ ตัวดูดซับโลหะคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม ที่ผสมกับกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วน 10:1 20:1 และ 30:1

4. พิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับปฏิกิริยาโลหะที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค ดังนี้

4.1 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffraction, XRD)

4.2 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

4.3 เครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)

4.4 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยใช้สมบัติทางความร้อน (Thermal gravimetric Analysis, TGA)

4.5 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDX)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถรู้และเข้าใจเกี่ยวกับวิธีการเตรียมตัวดูดซับโลหะ คอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม ออกไซด์ ผสมกับกราฟีนออกไซด์ โดยเทคนิคการตกตะกอนร่วมด้วยคลื่นอัลตราซาวด์
2. สามารถหาอัตราส่วนของตัวดูดซับโลหะคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม ออกไซด์กับกราฟีนออกไซด์ ที่เหมาะสมได้เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

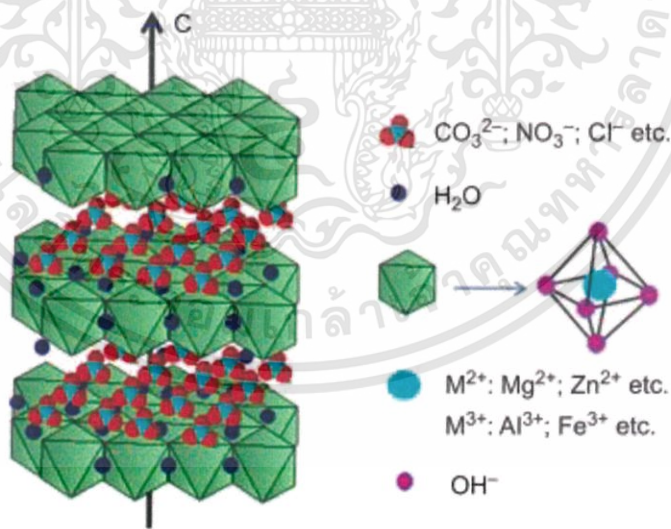
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Layered double hydroxides : LDH) [1-6]

เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ถูกสังเคราะห์ขึ้นใน ค.ศ.1942 โดย Feithnecht ซึ่งได้ทำการทดลองผสมสารละลายเกลือโลหะกับเบส แต่ยังไม่มีการวิเคราะห์หาโครงสร้างที่แน่ชัดของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

ในปี ค.ศ. 1960 ได้มีการทำการศึกษาโครงสร้างของของแข็งโดย Almann และ Taylor ด้วยเทคนิค XRD ซึ่งพบว่าเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์นั้นประกอบไปด้วยชั้นของโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีประจุบวกเรียงซ้อนกัน โดยมีไอออนประจุลบและโมเลกุลน้ำอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้น ซึ่งเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่พบนั้นประกอบด้วย แมกนีเซียม-อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์คาร์บอเนต มีสูตรทางเคมีคือ $Mg_3Al_2(OH)_6CO_3 \cdot 4H_2O$ โดยมีคาร์บอเนตเป็นไอออนลบภายในช่องว่างระหว่างชั้น ซึ่งโครงสร้างของ แมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.1

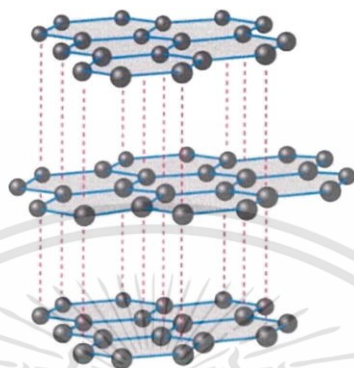


รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

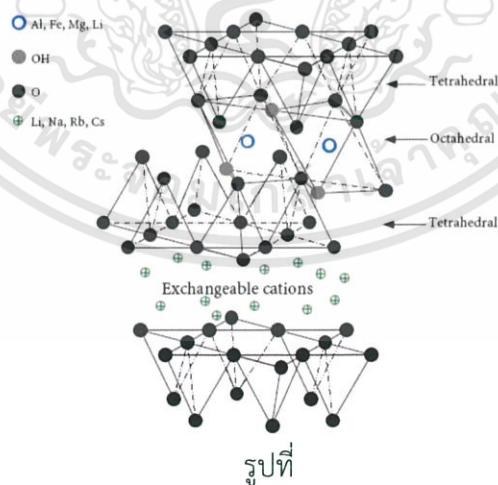
เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ เป็นสารประกอบแบบชั้น (layered compounds) สามารถแบ่งตามชนิดของประจุไอออนภายในช่องว่างได้ 3 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 แบบไม่มีไอออนภายในช่องว่างระหว่างชั้น เนื่องจากประจุของชั้นโลหะเป็นกลางจึงไม่มีการดูดประจุเกิดขึ้น เช่น แกรไฟต์



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของแกรไฟต์ (graphite) [8]

กลุ่มที่ 2 แบบไอออนภายในช่องว่างระหว่างชั้นมีประจุเป็นบวก เช่น แร่ดินเหนียว เป็นต้น ซึ่งประกอบด้วย แผ่นของชั้นโลหะไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกต ที่มีประจุของชั้นเป็นลบและเกิดการจัดเรียงตัวซ้อนกันเป็นชั้นและมีการดูดประจุด้วยชั้นของไอออนบวกในช่องว่างระหว่างชั้น

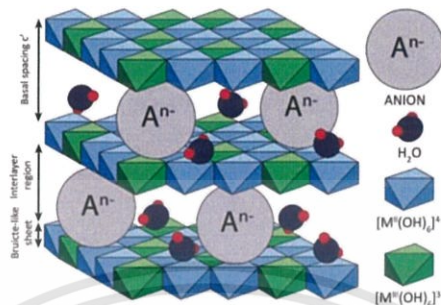


รูปที่

รูปที่ 2.3 ลักษณะของโครงสร้างมอนมอริโลไนต์ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียว [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มที่ 3 แบบไอออนภายในช่องว่างระหว่างชั้นมีประจุเป็นลบ ซึ่งจะประกอบด้วยโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีประจุเป็นบวก เรียงตัวซ้อนกันเป็นชั้น ๆ โดยมีการดุลประจุด้วยชั้นของไอออนลบในช่องว่างระหว่างชั้น เช่น ไฮโดรทัลไซต์ (hydrotalcite) เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของไฮโดรทัลไซต์ [10]

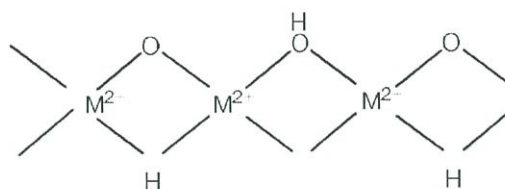
2.1.1 ลักษณะโครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เป็นสารประกอบแบบชั้น ที่มีลักษณะเป็นผลึกซึ่งจัดเรียงซ้อนกันเป็นชั้น สามารถพบได้ทั้งจากธรรมชาติและสังเคราะห์ขึ้นเอง โดยการสังเคราะห์นั้นสามารถทำได้ง่าย ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้ทั้งในห้องปฏิบัติการหรือระดับอุตสาหกรรม

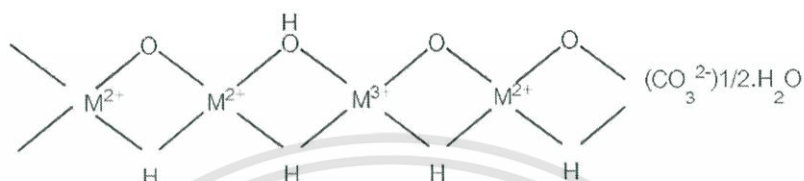
เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ มีองค์ประกอบทางเคมีที่หลากหลาย สามารถปรับแต่งได้ ซึ่งสูตรทางเคมีทั่วไปคือ $[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_x(OH)]A^{n-}_{x/n} \cdot yH_2O$ โดย M แทนโลหะที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับจำนวนประจุที่แสดงในสูตรเคมี x แทนอัตราส่วนโดยโมลของ $M^{3+}/(M^{2+}+M^{3+})$ และ A แทนไอออนประจุลบที่มีประจุเท่ากับ n ซึ่ง M^{2+} ในสูตรเคมีประกอบด้วย Mg^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Cu^{2+} Ni^{2+} Cd^{2+} หรือ Zn^{2+} และ M^{3+} ประกอบด้วย Al^{3+} Cr^{3+} Ga^{3+} หรือ Fe^{3+}

โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เป็นชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ ($M^{2+}(OH)_2$) หรือชั้นบรูไซต์ (brucite layer) ซึ่งโลหะประจุบวกนั้นมีการเรียงตัวแบบออกตะฮีดรอลกับไฮดรอกไซด์-แอนไอออน โดยจะซ้อนทับกันและยึดด้วยพันธะไฮโดรเจน เมื่อ M^{2+} แทนที่ด้วย M^{3+} ทำให้ประจุของชั้นโลหะไฮดรอกไซด์เป็นประจุบวกจึงต้องมีการดุลประจุให้เป็นกลางด้วยไอออนประจุลบและโมเลกุลน้ำ ซึ่งอยู่ระหว่างชั้นของโลหะไฮดรอกไซด์แต่ละชั้น โดยเรียกชั้นนี้ว่า ช่องว่างระหว่างชั้น (interlayer spacing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ชั้นโลหะไฮดรอกไซด์หรือชั้นบรูไซต์

รูปที่ 2.6 การแทนที่ M^{2+} ด้วย M^{3+} ในชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ [2]

2.1.2 การดัดแปลงโครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

ขนาดของช่องว่างระหว่างชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของประจุลบที่อยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นนั้น โดยทั่วไปแล้วเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จะมีไอออนประจุลบเป็นคาร์บอเนตแอนไอออน ซึ่งช่องว่างระหว่างชั้นแคบเพียง 2.9 อังสตรอม ทำให้การประยุกต์ใช้เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ด้านการเป็นตัวดูดซับและการเร่งปฏิกิริยาค่อนข้างจำกัด จึงมีการศึกษาและดัดแปลงโครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เพื่อให้มีขนาดช่องว่างระหว่างชั้นที่ใหญ่ขึ้นโดยใช้วิธีการสอดแทรกไอออนประจุลบหรือโมเลกุลขนาดใหญ่เข้าไปในโครงสร้าง

2.1.2.1 การสอดแทรก (Intercalation)

อินเทอร์คาลันเป็นวิธีการสอดแทรกหรือใส่เกสต์ (guest species) เช่น ไอออนโมเลกุลหรือพอลิเมอร์เข้าไปในช่องว่างระหว่างชั้นของวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นชั้นโดยที่องค์ประกอบพื้นฐานไม่เปลี่ยนแปลง

การสอดแทรกแบบนี้จะทำให้โครงสร้างภายในของวัสดุเลเยอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่แตกต่างกัน โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุเลเยอร์และเกสต์ที่นำมาใช้ ซึ่งโดยปกติแล้วเกสต์จะกระจายไปในช่องว่างระหว่างชั้นอย่างสม่ำเสมอ แต่ในบางกรณีเกสต์จะกระจายตัวในลักษณะที่ต่างออกไป ซึ่งการกระจายตัวมีดังนี้

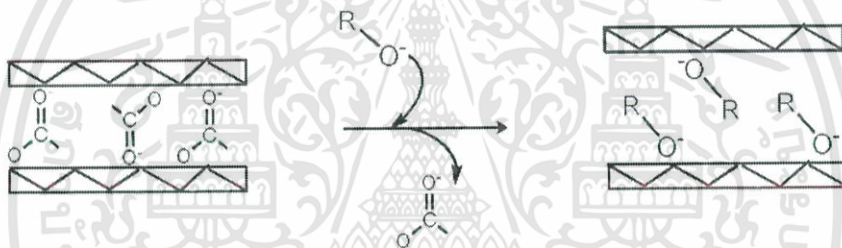
1. สเตจิง (Staging) คือการสอดแทรกเกสต์เข้าไปในช่องว่างระหว่างชั้นเพียงบางชั้น โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ลักษณะนี้จะพบได้ในแกรไฟต์ เป็นต้น ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เซกรีเกชัน (Segregation) คือการสอดแทรกโมเลกุลหรือไอออนในช่องว่างระหว่างชั้นในลักษณะที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของประจุที่ต่างกันในแต่ละชั้นของวัสดุ

2.1.2.2 การสอดแทรกไอออนเข้าสู่เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สามารถแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบที่อยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นกับไอออนประจุลบอื่น ๆ ได้ ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปซึ่งการสอดแทรกไอออนนี้สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

1. การแลกเปลี่ยนไอออน วิธีนี้คือการแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบในช่องว่างระหว่างชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์กับเกสต์อื่น ๆ ที่มีไอออนประจุลบ ซึ่งการแลกเปลี่ยนนี้จะเกิดได้ง่ายหรือยากขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาทางประจุ (electrostatic interaction) ระหว่างชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีประจุบวกกับไอออนประจุลบเดิมในโครงสร้าง



รูปที่ 2.7 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange)

ปัจจัยที่มีผลในการแลกเปลี่ยนไอออนมีหลายปัจจัยด้วยกัน ได้แก่

ก. สัมพรรคภาพของไอออนประจุลบ (affinity incoming anion) เนื่องจากไอออนประจุลบแต่ละชนิดนั้นมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ต่างกันโดยความสามารถในการแลกเปลี่ยนเกิดขึ้นได้ง่ายหรือยากนั้น ขึ้นกับจำนวนประจุของไอออนลบ โดยเรียงลำดับความสามารถจากยากไปง่ายได้ดังนี้ $\text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{OH}^- > \text{F}^- > \text{Cl}^- > \text{Br}^- > \text{NO}_3^- > \text{I}^-$ และโดยทั่วไปแล้วนิยมใช้เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่มีในธรรมชาติไอออนเป็นประจุลบภายในช่องว่างระหว่างชั้นเป็นสารตั้งต้นในการแลกเปลี่ยนไอออน

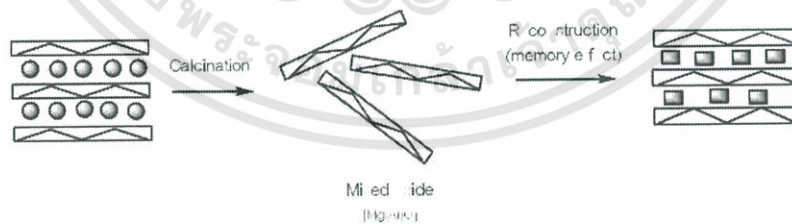
ข. ความหนาแน่นของประจุในชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ (Charge density of the sheet) ความหนาแน่นของประจุในชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ส่งผลต่ออันตรกิริยาทางประจุระหว่างชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ที่เป็นประจุบวกกับไอออนประจุลบเดิมในโครงสร้าง ซึ่งหากมีความหนาแน่นประจุในชั้นมากจะส่งผลให้อันตรกิริยาทางประจุในชั้นสูง ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ยากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ตัวกลางในการแลกเปลี่ยน (Exchange medium) เมื่อมีการใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนไอออน จะทำให้เกิดการขยายช่องว่างระหว่างชั้นชั้นได้ขณะทำการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากการบวมตัว (swelling) ได้ของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนในโครงสร้างทำได้ง่ายขึ้น

2. การตกตะกอนร่วมการตกตะกอนร่วมคือการสอดแทรกไอออนประจุลบเข้าสู่โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์โดยตรง เป็นการตกตะกอนร่วมกันระหว่างสารละลายเกลือโลหะประจุบวกสองและสามกับสารละลายเบสที่มีไอออนประจุลบที่ต้องการนั้นสอดแทรกอยู่ และการที่จะตกตะกอนร่วมได้นั้นไอออนประจุลบที่ต้องการมาสอดแทรกต้องมีความสามารถในการดูดประจุมากกว่าไอออนร่วมของเกลือโลหะ เพื่อไม่ให้ไอออนร่วมของเกลือโลหะสอดแทรกเข้าไปแทนโดยทั่ว ๆ ไปแล้วนั้นจะนิยมใช้เกลือโลหะคลอไรด์หรือไนเตรทเป็นสารตั้งต้นในการตกตะกอนร่วมและควรตกตะกอนร่วมภายใต้ภาวะไนโตรเจนเพื่อป้องกันคาร์บอนไอออนในอากาศ

3. การฟื้นฟูสภาพ (Reconstruction) การฟื้นฟูสภาพเป็นหนึ่งวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการสอดแทรกไอออนประจุลบเข้าไปในโครงสร้าง เมื่อทำให้อุณหภูมิสูงถึง 300-500 องศาเซลเซียส จะเกิดการกำจัดหมู่ไฮดรอกซิลของชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ น้ำและไอออนประจุลบภายในช่องว่าง ซึ่งเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จะสลายโครงสร้างอยู่ในรูปออกไซด์โลหะ M^{2+} และ M^{3+} ต่อมาหากนำมาผสมในสารละลายเอควิวสจะทำให้โครงสร้างของออกไซด์โลหะนั้นกลับคืนเป็นโครงสร้างชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ และไอออนประจุลบในสารละลายกลับมาอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นอีกครั้ง โดยอาศัยหลักการ Memory Effect ดังแสดงในแผนภาพการฟื้นฟูสภาพ



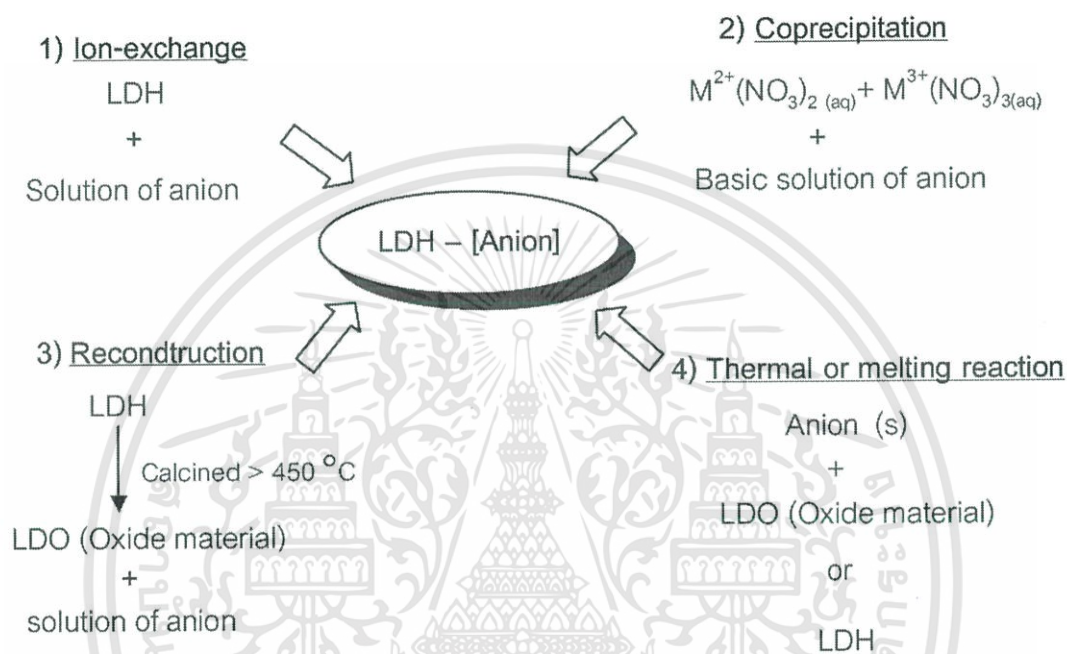
รูปที่ 2.8 กระบวนการฟื้นฟูสภาพ (reconstruction)

4. กระบวนการความร้อน (Thermal or melting reaction) กระบวนการความร้อนคือกระบวนการที่ใช้เตรียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สอดแทรกด้วยไอออนประจุลบ โดยอาศัยการผสม

สารตั้งต้นของไอออนประจุลบกับเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์หรือออกไซด์ที่ได้จากการเผาเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ซึ่งหลังจากผสมแล้วจะมีการให้ความร้อนแก่ของผสมในอัตราทำให้ความร้อน

ไม่เกิน 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที ให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิที่มากกว่าจุดหลอมเหลวของสารที่นำมาทำการสอดแทรกประมาณ 10 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิจนถึงจุดสมดุลแล้วลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้อง เสร็จแล้วทำการล้างและเก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้

ซึ่งสามารถสรุปการสอดแทรกไอออนเข้าสู่เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ของวิธีทั้ง 4 ข้างต้นได้ดังแผนภาพ



รูปที่ 2.9 การเตรียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สอดแทรกด้วยไอออนประจุลบโดยวิธีต่าง [2]

2.1.3 ประโยชน์ของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ได้เริ่มนำมาใช้กันมากขึ้นในปัจจุบัน โดยมีการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ มากมาย ซึ่งได้อาศัยลักษณะเด่นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์นี้ไปใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น

1. สังเคราะห์ได้ง่ายและราคาถูก
2. สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี
3. มีคุณสมบัติ Memory Effect สามารถกลับสู่โครงสร้างเดิมได้

4. มีองค์ประกอบทางเคมีที่หลากหลาย มีความยืดหยุ่น สามารถปรับแต่งได้ง่าย และสามารถสอดแทรกไอออน โมเลกุล ที่ต้องการเข้าไปปรับปรุงคุณสมบัติได้ โดยที่โครงสร้างของมันไม่

เปลี่ยนแปลงที่สวงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่า ตัวอย่างของประโยชน์ของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีดังนี้ ถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.1 ด้านตัวเร่งปฏิกิริยา

เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์นั้นไม่เหมาะสำหรับการนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรง เพราะว่ามีระยะห่างช่องว่างระหว่างชั้นที่น้อย และภายในช่องว่างมีไอออนประจุลบที่มีความเป็นเบสต่ำ จึงนิยมนำเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกระบวนการต่างๆก่อนนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1.3.2 ด้านสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ และมีความสามารถในการดูดซับ จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่เป็นสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม เช่น สีย้อม เป็นต้น ซึ่งมีการนำเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มาใช้ในการดูดซับสารปนเปื้อนเข้าสู่ในโครงสร้างโดยตรง การกำจัดสารปนเปื้อนอาจทำได้ทั้งดูดซับบนผิวและแลกเปลี่ยนเข้าสู่โครงสร้างได้

2.1.3.3 ด้านอุตสาหกรรมยา

ยาบางชนิดและพวกวิตามินต่าง ๆ เช่น วิตามินเอ วิตามินซี และวิตามินอี ปกติแล้วหากเก็บในลักษณะที่เป็นสารละลายจะมีคุณสมบัติที่ไวต่อแสง ความร้อน และออกซิเจน ทำให้เสื่อมสภาพได้ง่าย จึงมีการประยุกต์ สอดแทรกโมเลกุลของวิตามินเข้าไปในโครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เพื่อช่วยในการเก็บรักษา [11]

2.1.3.4 ด้านพอลิเมอร์

ตัวอย่างในด้านพอลิเมอร์คือ คลอไรด์ที่เป็นส่วนประกอบในพอลิเมอร์ เช่น PVC สามารถเกิดปฏิกิริยา ดีไฮโดรคลอไรเนชัน (Dehydrochlorination) ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเอง ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ [12] จึงมีการประยุกต์นำเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มาช่วยเพื่อลดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์นี้ลง โดยใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ

2.2 การดูดซับ (Adsorption) [13-16]

การดูดซับเป็นการแยกสารที่ต้องการออกจากของเหลวหรือก๊าซ โดยให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างสารดูดซับ (Adsorbent) กับสารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) ซึ่งโดยทั่วไปมีกลไกของการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงสารดูดซับ เนื่องจากพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม ทำให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ

2. การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกที่ตัวถูกดูดซับแทรกเข้าถึงช่องว่างของสารดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดติดผิว

3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับยึดติดกับตัวกลางดูดซับ โดยปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

2.2.1 ประเภทของตัวดูดซับ

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เป็นการดูดซับที่ไม่เกิดการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันและไม่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน เป็นแรงดึงดูดอ่อน ๆ ที่เกิดขึ้นจากความต่างของพลังงาน ซึ่งเรียกว่า แรงแวนเดอวาลส์ (Van der waals forces) เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเกาะที่โมเลกุลของตัวดูดซับ ลักษณะของโมเลกุลที่เกาะกันนั้นจะซ้อนกันเป็นชั้น ๆ โดยการดูดซับทางกายภาพ พบว่าความหนาของชั้นโมเลกุลที่มาเกาะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ และเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแบบผันกลับได้ (Reversible) นอกจากนี้การดูดซับทางกายภาพนี้จะไม่มีความจำเพาะ (Specific-site) คือโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะมีความอิสระที่จะถูกดูดซับบนตำแหน่งใด ๆ ก็ได้บนผิวสารดูดซับ

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

เป็นการดูดซับที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนไปมาระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับพื้นผิวของสารดูดซับ ทำให้เกิดการสร้างพันธะเคมีขึ้นมาแล้วเกิดเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่โดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเลือกบริเวณที่เกิดการดูดซับได้กระบวนการณ์นี้จะมีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียวหรือที่เรียกว่าการดูดซับแบบชั้นเดียว และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ โดยการดูดซับทางเคมีจะให้ค่าพลังงานสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงความแตกต่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี [15]

การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
<ul style="list-style-type: none"> - ไม่ได้เกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน - บริเวณที่เกิดปฏิกิริยามีได้ไม่จำกัด โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะเข้าไปเกาะที่ผิวส่วนใดก็ได้ - ค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าต่ำมีค่าเท่ากับค่าความร้อนของการกลายเป็นของเหลว - โมเลกุลที่มาเกาะจะเกิดการเรียงตัวแบบหลายชั้นบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ บางครั้งการดูดซับจะเกิดขึ้นที่ผิวชั้นบนของการดูดซับทางเคมีก็ได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - จะเลือกเฉพาะบริเวณที่เกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น - ค่าความร้อนจะเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น - ส่วนการดูดซับจะเกิดการดูดซับได้อย่างสมบูรณ์ในขั้นแรก

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1. ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวของสารดูดซับ โดยอัตราการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดของสารดูดซับ สำหรับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแปรผันตามความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) นั่นคือสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลสารถูกดูดซับได้มากกว่าสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า

2. ความปั่นป่วน

อัตราในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการขนส่งของโมเลกุลของระบบซึ่งเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) และการแพร่เข้าสู่รูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของระบบ ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารถูกดูดซับที่เข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าระบบมีความปั่นป่วนมากทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลง เป็นผลให้โมเลกุลสารถูกดูดซับเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาสารดูดซับได้เร็วขึ้น ดังนั้นการแพร่เข้าสู่รูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค่าพีเอช

ค่าพีเอชถือว่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการดูดซับเนื่องจากที่ค่าพีเอชต่ำ ๆ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่าพีเอชสูง ๆ และค่าพีเอชที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการดูดซับแตกต่างกัน กล่าวคือหากเป็นสารละลายไอออนถ้าหากสารละลายมีพีเอชต่ำจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากการแย่งกันดูดซับไอออนในสารละลายกับไฮโดรเนียมไอออน ซึ่งจะมีผลตรงข้ามกับการดูดซับในสารละลายที่มีค่าพีเอชสูง นอกจากนี้ค่าพีเอชยังมีผลต่อการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ด้วย

4. เวลาสัมผัส

เป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับในระบบน้ำเสีย ซึ่งระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีที่สุด และยังขึ้นกับชนิดของสารดูดซับด้วย

5. ความสามารถในการละลายน้ำของสารดูดซับบนผิวของสารดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับโมเลกุลสารดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำแล้วไปเกาะติดกับผิวของของแข็งสารที่ละลายน้ำได้ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงยากต่อการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยสามารถเกาะติดบนผิวของสารดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตามที่กล่าวมาข้างต้นอาจไม่เป็นจริงเนื่องจากมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยเกาะติดผิวสารดูดซับได้ยาก

6. ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ

การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อโมเลกุลของสารดูดซับมีขนาดเล็กกว่าขนาดของสารดูดซับเล็กน้อย ซึ่งโดยปกติโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อนจากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไป

7. อุณหภูมิ

อุณหภูมิจะมีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากอัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูง และมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ

2.2.3 สมดุลและไอโซเทอมการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับคือจุดที่อัตราการดูดซับของสารที่ถูกดูดซับมีค่าเท่ากับอัตราการคายของสารที่ถูกดูดซับออกสู่สารละลายจนเข้าสู่สภาวะคงที่หรือความเข้มข้นของมวลสารในสารละลายไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเรียกว่า สมดุลของการดูดซับ ณ จุดสมดุลนี้ไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับหรือในของเหลวได้ ซึ่งปริมาณการดูดซับที่จุดสมดุลจะแปรผันตามความเข้มข้นของมวลสารที่ถูกดูดซับ โดยความสามารถในการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ ณ จุดสมดุลจะเรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ โดยประเภทของไอโซเทอมที่อธิบายทฤษฎีการดูดซับดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานของการดูดซับแบบแลงเมียร์มีดังต่อไปนี้

- ตำแหน่งโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของมวลสารที่ถูกดูดซับ
 - ตำแหน่งบนตัวดูดซับต่อหนึ่งบริเวณจะจับกับโมเลกุลของมวลสารที่ถูกดูดซับหนึ่งหน่วย
 - จำนวนพื้นที่บริเวณที่เกิดการดูดซับมีปริมาณแน่นอนซึ่งกำหนดได้จากลักษณะของพื้นที่ผิว
 - พลังงานของการดูดซับบนตัวดูดซับมีค่าเท่ากันทุกตำแหน่ง
- สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้

$$q = \frac{q_m kC}{1+kC} \quad 2.1$$

- เมื่อ
- q = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 - q_m = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 - C = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - k = ค่าคงที่ของการดูดซับ

เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า q_m และ k ได้ด้วยวิธีการทางกราฟ จึงจำเป็นต้องจัดรูปแบบสมการให้ เป็นดังนี้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{Ckq_m} + \frac{1}{q_m} \quad 2.2$$

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{kq_m} + \frac{C}{q_m} \quad 2.3$$

2. ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm)

สมการของฟรุนด์ลิชมีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ) พื้นที่ผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ได้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q = kC_e^{1/n} \quad 2.4$$

เมื่อ k และ $n =$ ค่าคงที่ของฟรุนด์ลิช

จากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช สามารถบอกถึงประสิทธิภาพการดูดซับได้ด้วยค่า $\frac{1}{n}$ โดยประสิทธิภาพการดูดซับจะต่ำเมื่อ $\frac{1}{n}$ มีค่าน้อยกว่า 1 ในทางกลับกันประสิทธิภาพการดูดซับจะสูงเมื่อค่า $\frac{1}{n}$ มีค่ามากกว่า 1 และถ้าหากกราฟมีความชันมาก ๆ แสดงว่าสารนั้นสามารถดูดซับได้ดี

3. ไอโซเทอมการดูดซับของโกเบลคอร์ริแกน (Koblecorrigan's isotherm)

เป็นแบบจำลองปรับปรุงโดยอาศัยสมมติฐานทั้งแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนด์ลิช แสดงดังสมการ

$$q_e = q_0 \left(\frac{K_{KC} C_e}{1 + (K_{KC} C_e)} \right) \quad 2.5$$

เมื่อ $q_e =$ จำนวนมวลสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$q_0 =$ จำนวนสูงสุดของมวลสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$K_{KC} =$ ค่าคงที่การดูดซับของโกเบลคอร์ริแกน

$n =$ ดัชนีชี้กำลังของแบบจำลองที่มีผลต่อการดูดซับจำนวนมวลสารมากที่สุดที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล

$C_e =$ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (กรัมต่อลิตร)

ซึ่งในการคำนวณเรื่องสมดุลของการดูดซับมีสมการสำหรับการหาค่าความสามารถของการดูดซับ (Adsorption capacity) ดังนี้ (Lei Zhang et al, 2018)

$$q = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad 2.6$$

เมื่อ $q =$ ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_0 =$ ความเข้มข้นตั้งต้นของตัวถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_t =$ ความเข้มข้นสุดท้ายของตัวถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$V =$ ปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ (มิลลิลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สีย้อม (Dyes) [17-20]

สีย้อม คือ สารที่ใช้เคลือบหรือทาเพื่อทำให้เกิดสีต่าง ๆ ตามแต่ละชนิดของสีย้อม โดยในอดีตเริ่มต้นสีย้อมได้จากธรรมชาติ เช่นมาจากพืช ผลไม้ เป็นต้น โดยมีการสกัดสารตั้งต้นเหล่านั้นให้เป็นสีย้อม แต่พบว่าสีย้อมจากธรรมชาตินั้นสามารถหลุดลอกหรือว่าเสื่อมสภาพได้ง่าย จึงทำให้เกิดการสังเคราะห์สีย้อมขึ้นมาที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นและคงสภาพได้ยาวนานขึ้น ซึ่งสีย้อมที่ได้จากการสังเคราะห์ถูกค้นพบโดย วิลเลียม เพอร์คิน (William Perkin) ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาสีย้อมของมนุษย์ สีย้อมสังเคราะห์เป็นสารเคมีที่ได้จากการสกัดน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน หลังผ่านการสกัดแล้วจะได้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว ตัวอย่างเช่น เบนซีน ไซลีนแอนทราซีน แนพทาลีน และพาราฟิน เป็นต้น โดยที่สารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคกระบวนการต่าง ๆ สีย้อมที่ผลิตได้ออกมาจากสารไฮโดรคาร์บอนด้วยเทคนิคต่างๆ จะมีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด ซึ่งมีสีย้อมบางชนิดที่ได้มานั้นสามารถละลายน้ำได้และบางชนิดไม่สามารถละลายน้ำได้แต่จะสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้แทน การนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมนั้นจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราวซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง

2.3.1 ลักษณะของสีย้อม

จงชัย พรรณสวัสดิ์ (2527) ได้พูดถึงสีย้อมที่นำมาใช้ในการย้อมเส้นใยว่ามีอยู่ด้วยกันมากมายหลายชนิด คุณภาพในการใช้สีย้อมให้ได้ดั่งนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวกันของสีย้อมกับเส้นใยว่าดีแค่ไหน ซึ่งต้องมีค่ามากกว่าค่าการรวมกันของสีย้อมกับน้ำ โดยเกิดจากโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดเรียงตัวในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใยแล้วเกิดเป็นพันธะยึดเหนี่ยวกันแน่น ซึ่งอิทธิพลเชิงเคมี มีทั้งหมด4ชนิด ที่เกี่ยวข้องกับการช่วยให้สีดูดติดกับเส้นใย ดังนี้

2.3.1.1 พันธะไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนในกลุ่มไฮดรอกซิลจะยึดกันอย่างหลวมๆกับอะตอมอื่น ๆ ได้เป็นวาเลนซีที่ 2 (secondary- valency) เช่น การยึดตัวของไฮโดรเจนกับออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำเส้นใยและสีย้อมเกือบทุกชนิดจะมีกลุ่มไฮดรอกซิลอยู่

2.3.1.2 แรงแวนเดอร์วาลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เป็นแรงที่เกิดตามธรรมชาติ ทำให้อะตอมและโมเลกุลเข้ามายึดติดกันตัวเอง โดยเฉพาะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างตัวสีย้อมกับเส้นใยจะเกิดแรงนี้ขึ้นทำให้ยึดติดกันได้

2.3.1.3 พันธะไอออนิก

พันธะนี้จะเกิดได้เนื่องมาจากการให้และรับอิเล็กตรอนระหว่างอะตอมของธาตุ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน เมื่ออะตอมมีการให้และรับอิเล็กตรอน จะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าบวกและลบขึ้นเป็นผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้ว จึงเรียกว่าไอออนิก โดยพันธะประเภทนี้เป็นพันธะที่แข็งแรงแต่เปราะ จุดเดือดและจุดหลอมเหลวจะสูง การยึดรวมตัวระหว่างเส้นใยและสีย้อมนั้นเกิดขึ้นโดยไฟฟ้าต่างศักย์ เส้นใยเมื่ออยู่ในน้ำจะมีปฏิกิริยาไฟฟ้าเป็นลบ ส่วนใหญ่แล้วสีย้อมซึ่งละลายน้ำจะมีไอออนของสีเป็นลบการดูดซึมจึงไม่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนไอออนของเส้นใยก่อนที่ไอออนของสีย้อมจะเข้ามาใกล้พอที่แรงแวนเดอร์วาลส์จะทำหน้าที่ได้ แต่ถ้าหากว่าสีนั้นมีไอออนบวกอยู่แล้วก็สามารถใช้งานได้เลย เช่น สีที่ใช้ย้อมเส้นใยอะคริลิก

2.3.1.4 พันธะโควาเลนต์

เป็นพันธะที่เกิดจากอะตอมสองอะตอมหรือมากกว่าเกาะกันด้วยการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกัน เป็นพันธะที่แข็งแรงและแยกตัวออกจากกันได้ยาก เช่น สีย้อมรีแอกทีฟจะยึดกับเส้นใยด้วยพันธะโควาเลนต์

อิทธิพลเชิงเคมีที่กล่าวมานี้มักจะทำหน้าที่ร่วมกัน การจะทำให้สีย้อมติดกับโมเลกุลของเส้นใยได้นั้น จะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจจะเกิดทั้ง 4 ชนิดเลยก็เป็นได้ สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่ดีที่สุดคือ พันธะโควาเลนต์ และนอกจากอิทธิพลด้านเคมีที่กล่าวมาแล้ว ยังมีอิทธิพลด้านเรขาคณิตของโมเลกุลของสีอีกด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีมีลักษณะที่แบนและยาวมาก ก็จะทำให้การติดของสีนั้นมีความคงทนที่สูงขึ้น เป็นต้น

2.3.2 เคมีของสีย้อม

โครงสร้างของโมเลกุลสีย้อมนั้นจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนก็คือ

2.3.2.1 โครโมฟอร์ (Chromophores)

เป็นกลุ่มอะตอมของสารประกอบอินทรีย์ที่มีสีในกลุ่มโมเลกุลเดี่ยว หน้าที่ของโครโมฟอร์คือเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ให้สีแก่โมเลกุลของสีย้อม โดยโครโมฟอร์จะเป็นตัวที่ทำให้เราเห็นสีย้อมมีโทนสีที่แตกต่างกัน

2.3.2.2 ออกโซโครม (Auxochromes)

เป็นกลุ่มที่เกาะอยู่บนโครโมฟอร์ที่สร้างลักษณะของความเข้มข้นสี และปรับปรุงคุณสมบัติในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การดูดติดกับเส้นใยให้กับสีย้อม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกพิมพ์ห้ามมีเหตุขัดแย้งและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 พันธะคู่สลับ (Conjugated double bonds)

ทั้งโครโมฟอร์และออกโซโครมต่างเชื่อมกับพันธะคู่สลับ ซึ่งเรียกส่วนนี้ว่า โครโมเจน (Chromogen)

2.3.3 ประเภทของสีย้อม

การจำแนกสีย้อมในปัจจุบัน มีวิธีการจำแนกสีย้อมหลายแบบ โดยยกตัวอย่างการจำแนกสีย้อมได้ดังนี้

1. จำแนกตามแหล่งกำเนิด แบ่งได้ 2 ประเภทคือ

1.1 สีย้อมที่ได้จากธรรมชาติ เป็นสีย้อมที่มาจากธรรมชาติ เช่นพืชหรือสัตว์ยกตัวอย่างเช่น สีย้อมเงินจากต้นคราม สีย้อมจากลูกมะเกลือ

1.2 สีย้อมที่ได้จากการสังเคราะห์ เป็นสีย้อมที่เกิดจากกระบวนการเคมี ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นมาของมนุษย์

2. จำแนกตามความสามารถการละลายน้ำ

1.1 สีย้อมที่ละลายน้ำได้

1.2 สีย้อมที่ละลายน้ำไม่ได้ ที่เรียกว่า พิกเมนต์ (Pigments)

3. จำแนกตามวิธีการใช้งาน

สามารถจำแนกได้ 9 ประเภทดังนี้

1.1 สีย้อมแอซิด (Acid Dye) เป็นสีย้อมที่มีประจุลบละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่โครงสร้างจะเป็นเกลือของกรดซัลฟิวริกและมีบางส่วนที่มีองค์ประกอบของหมู่เอโซ (Azo linkage) ในโครงสร้างกลไกในการย้อมสีจะเกิดเป็นพันธะไอออนิกในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีย้อมแอซิดบางตัวสามารถนำไปย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ป่าน ไนลอน ไยขนแกะ ไหมและอะคริลิกได้ดี แต่สีย้อมแอซิดไม่ทนการซักและไม่ทนเหงื่อ

1.2 สีย้อมมอร์แดนต์ (Mordant Dye) หรือสีย้อมโครม (Chrome Dye) เป็นสีย้อมที่ให้ประจุลบสามารถละลายน้ำได้ โดยสีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยยึดติดเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารช่วยยึดติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

1.3 สีย้อมเบสิก (Basic Dye) เป็นสีย้อมที่ให้ประจุบวกสามารถละลายน้ำได้ดี ในโครงสร้าง

ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของหมู่เอโซ กลไกในการย้อมสีจะเกิดเป็นพันธะไอออนิกในน้ำสีสังเคราะห์ที่มีเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สภาวะเป็นเบส นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและเส้นใยอะคริลิก
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 สีย้อมไคเรกท์ (Direct Dye) เป็นสีย้อมที่ให้ประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ดี โครงสร้างส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบของหมู่เอโซและหมู่ซัลโฟนิค โดยในการย้อมสีจะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเส้นใย สามารถย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ง่ายโดยไม่ต้องเติมสารช่วยย้อม สีนี้ทนทานต่อแสงแต่ไม่ทนต่อการซัก

1.5 สีย้อมดิสเพอร์ส (Disperse Dye) เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำแต่มีการกระจายตัวที่ดี การย้อมสีชนิดนี้จะใช้สารตัวนำ หรืออนุหนุมิและความดันสูง เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใย นิยมย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยพอลิเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกสีย้อมดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักได้ดี

1.6 สีย้อมแว็ต (Vat Dye) เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ จึงต้องมีการเติมสารรีดิวซ์ที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการละลายและแตกตัวเป็นเกลือก่อน สีย้อมจึงจะสามารถซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปสัมผัสกับอากาศสีย้อมจะถูกออกซิไดซ์และไม่ละลายน้ำเหมือนเดิม ทำให้สีติดเส้นใย

1.7 สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulfur Dye) เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำจึงต้องมีการเติมสารรีดิวซ์เพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้แล้วจึงเข้าไปในเส้นใย นิยมย้อมฝ้ายหรือเส้นใยเซลลูโลส เป็นสีย้อมที่ราคาถูกและมีความทนทานสูง

1.8 สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive Dye) เป็นสีย้อมที่มีประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง เป็นสีที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด กลไกของสีย้อมคือจะเกิดพันธะโควาเลนต์กับเส้นใย สีย้อมรีแอคทีฟให้สีที่สดใส สีสอดทนในทุกสภาวะ

1.9 สีย้อมออกซิเดชัน (Oxidation Dye) เป็นสีย้อมที่สามารถละลายน้ำได้ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ แล้วสีจะเข้าไปติดเส้นใยซึ่งจะอาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมฝ้ายและขนสัตว์

2.4 สีย้อมอินดิโกคาร์มีน (Indigo Carmine Dye) [21]

สีครามหรือสีน้ำเงินที่ออกไปทางสีฟ้า เรียกเป็นภาษาอังกฤษว่า Indigo เป็นสีที่ได้มาจากพืชกลุ่มหนึ่งที่นำมาใช้ในการย้อมสีผ้า โดยองค์ประกอบทางเคมีจะเรียกว่า indicant สมัยก่อนนอกจากจะสกัดสีครามได้จากพืชแล้วยังพบว่าสามารถสกัดมาจากเปลือกหอยทากทะเลเฟนิเซียน

(Phoenician sea snail) ปัจจุบันสามารถสังเคราะห์ได้เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมสีย้อม เช่น การย้อมผ้า ยีนส์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 การสกัดสีคราม

อินดิโกคาร์มินเป็นสีครามที่ได้จากทั้งธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ โดยสีครามที่ได้จากธรรมชาติพบว่ามีได้มาจากพืชหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นพืชสกุลถั่วคราม (Indigofera) พบกระจายทั่วไปอยู่ในเขตร้อนชื้น ขณะที่เขตอบอุ่นจะได้จากต้นโวด (Woad) มีชื่อพฤกษศาสตร์ว่า *Isatis tinctorial* L. และต้นผักไผ่ครามที่มีชื่อพฤกษศาสตร์ว่า *Persicaria tinctorial* (Aiton) Spac สีครามจะสกัดได้จากส่วนใบของพืชโดยผ่านกระบวนการแช่น้ำและการหมัก เพื่อเปลี่ยนสารไกลโคไซด์อินดิแคน (glycoside indican) ธรรมชาติที่พบอยู่ในพืชออกมาอยู่ในรูปของสีย้อมน้ำเงินโทนฟ้าเรียกว่า อินดิโกติน (indigotin) ซึ่งเกิดจากน้ำหมักพืชได้ผสมกับน้ำปูนที่มีสมบัติเป็นด่าง เมื่อผ่านขั้นตอนดังกล่าวแล้ว จะได้สีครามที่มีลักษณะที่เปียกคล้ายก้อนเค้กหรือทำให้แห้ง ตลอดจนทำเป็นผงเมื่อผ่านการผสมกับสารอื่น ๆ หลายชนิด เพื่อผลิตให้มีความแตกต่างกันของโทนสี

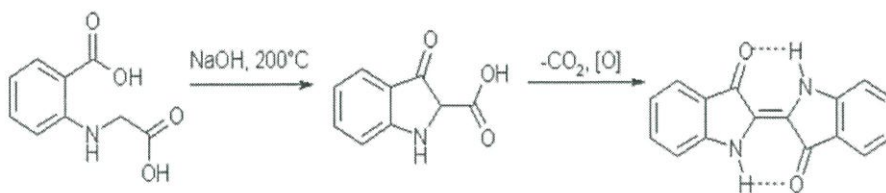
2.4.2 การสังเคราะห์ทางเคมีของสีคราม

ปัจจุบันสีครามธรรมชาติมีการนำมาใช้น้อยลง เนื่องจากไม่สะดวก ขาดวัตถุดิบ และสีครามสังเคราะห์เข้ามามีบทบาทแทน ในปี ค.ศ. 1805 นักเคมีชาวเยอรมันชื่อ ออดอล์ฟ วอน บีเยอร์ (Adolf Von Baeyer) ได้ศึกษาเกี่ยวกับสีคราม ต่อมาปี ค.ศ. 1878 เข้าสังเคราะห์สีครามได้เป็นครั้งแรกจากอีสตาติน (Istatine) ครั้งที่ 2 ในปี ค.ศ. 1880 ได้จากไนโตรเบนซัลดีไฮด์ (o-nitrobenzaldehyde) และอะซิโตน (acetone) โดยการทำละลายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) แบริยมไฮดรอกไซด์ (Barium hydroxide) หรือแอมโมเนีย

การผลิตสารไนโตรเบนซัลดีไฮด์ในปริมาณมากเป็นขบวนการที่ซับซ้อนและค่าการลงทุนสูง จึงใช้สาร BASF และ Hoechst แทน ในการสังเคราะห์ไนโตรเจนไกลซีน (N-(2-carboxy phenyl) glycine) เริ่มจากใช้สารแอนตาซีน (anthracene) เติมเข้าไปจนได้สารไนโตรเจนไกลซีนออกมา

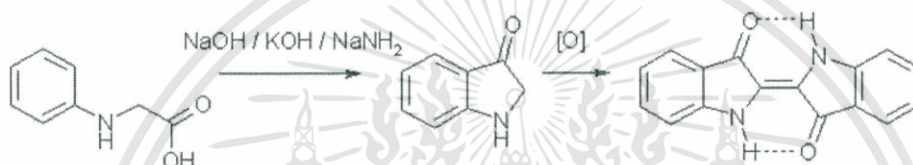
ในปี ค.ศ. 1821 มีการสังเคราะห์สีครามของบีเยอร์-ดริวสัน (Baeyer-Brewson indigo synthesis) เป็นเทคนิคที่ใช้กรด N-(2-carboxy phenyl) glycine ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แล้วเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การสังเคราะห์สีครามโดยเทคนิคของ Heumann

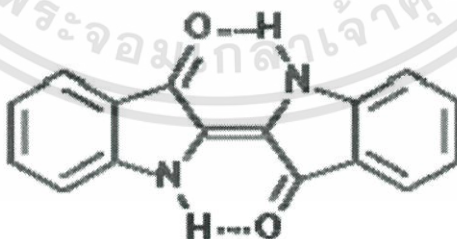
ในปัจจุบันมีการสังเคราะห์สีครามคิดค้นโดย Pflieger เป็นเทคนิคที่ใช้ N-phenylglycine ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ มีโซดาไมด์เป็นส่วนผสม จะได้อินดอกซิลและเมื่ออินดอกซิลทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศจะทำให้เกิดสีคราม (indigo)



รูปที่ 2.11 การสังเคราะห์สีครามโดยเทคนิคของ Pflieger

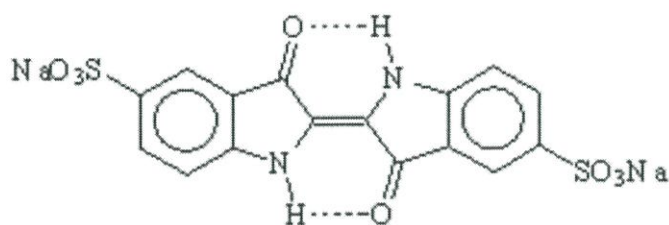
2.4.3 คุณสมบัติทางเคมีของสีคราม

สีครามเป็นสีน้ำเงินอยู่ในรูปผงผลึก มีจุดเดือดที่ 390-392 องศาเซลเซียส ไม่สามารถละลายในน้ำ แอลกอฮอล์หรืออีเทอร์ได้ แต่จะละลายในคลอโรฟอร์ม ไนโตรเบนซีน และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น สูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $C_{16}H_{10}N_2O_2$



รูปที่ 2.12 สูตรโครงสร้างของสีคราม (2, 2'-Bis(2,3-dihydro-3-oxoindolyliden), Indigotin)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 สูตรโครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน (indigo carmine)

สีครามธรรมชาติอยู่ในรูปของสารที่เรียกว่า อินดิแคน (indican) เป็นสารไม่มีสี สามารถละลายน้ำได้ อินดิแคนละลายในน้ำตาลกลูโคสและอินดอกซิล เกิดออกซิเดชันได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับอากาศจะเปลี่ยนสภาพเป็นสีคราม (indigo) สารประกอบบางชนิดที่สามารถทำยาสีครามได้ คือ อะนิลีน (aniline) และกรดพิคริก (picric acid) ส่วนยูเรียเป็นสารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับสีครามจนทำให้เกิดครามขาว หากนำสีครามไปทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริก ทำให้เกิดซัลโฟเนตอินดิโก (sulfonate indigo) ซึ่งเป็นสารที่ชื่อว่า saxonblue หรือ indigo carmine สีน้ำเงินอมเขียว

2.5 กราฟีน [22-23]

กราฟีน (Graphene) เป็นวัสดุสองมิติที่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนที่มีการจัดเรียงตัวในรูปแบบหกเหลี่ยม ลักษณะคล้ายรังผึ้ง และมีไฮบริดเดชัน (Hybridization) แบบ sp^2 มีความหนา 1 อะตอม หรือเป็นแผ่นระนาบเพียงชั้นเดียวของกราฟิตที่มีความหนาเพียง 0.335 นาโนเมตร กราฟีน ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 2004 โดยนักฟิสิกส์ 2 คน คือ อังเดร ไกม์ (Andre Geim) และ คอนสแตนติน โนโวเซลอฟ (Konstantin Novoselov) จากมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ (Manchester's university) ประเทศอังกฤษ ทั้งคู่ได้ใช้วิธีการแยกกราฟีนออกจากกราฟิตด้วยเทปกาวหรือที่เรียกว่า Micromechanical cleavage กราฟิตที่หลุดออกมาที่ละชั้นจนได้แผ่นของกราฟีนที่มีความหนาเพียง 1 อะตอม มีระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนเท่ากับ 0.142 นาโนเมตร แต่ละอะตอมจะยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der-Waals) การค้นพบนี้ทำให้ไกม์และโนโวเซลอฟได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 2010 โดยแผ่นกราฟีนที่ได้มีสมบัติที่น่าสนใจคือ มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นสูง เป็นตัวนำความร้อนและตัวนำไฟฟ้าที่ดี

2.5.1 สมบัติของกราฟีน

1. สมบัติทางไฟฟ้า กราฟีนมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำมากแต่สามารถเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี

มากตัวหนึ่ง ซึ่งคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของกราฟีนนั้นดีเทียบเท่ากับ superconductor หรือมากกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สูงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าทองแดงหลายเท่า แต่การนำไฟฟ้าของกราฟีนจะดีมากที่อุณหภูมิห้องซึ่งต่างจาก superconductor ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ต้องลดอุณหภูมิจนติดลบถึงจะสามารถแสดงคุณสมบัติดังกล่าวได้

2. สมบัติเชิงกล กราฟีนนั้นมีค่าระดับความแข็งแรงที่สูงมาก ซึ่งเทียบได้ว่าเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กถึง 5 เท่า อาจจะเทียบเท่ากับเพชรหรือมากกว่า โดยค่าความแข็งแรงต้านทานการแตกหัก (Breaking Strength) มีค่าสูงถึง 42 นิวตันต่อเมตร ค่าความเครียดเชิงกลของกราฟีนประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ค่ายังโมดูลัสสูงถึง 1 เทระปาสคาล และค่าความแข็งแรงภายใน (Intrinsic Strength) มีค่าถึง 130 กิกะปาสคาล ถึงแม้จะแข็งแรงแต่แผ่นกราฟีนนั้นสามารถ บิดงอ ม้วน หรือพับได้อย่างง่ายโดยไม่ทำให้โมเลกุลเสียหาย

3. สมบัติทางแสง ความโปร่งแสงของกราฟีนสามารถทำการทดสอบได้โดยการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงในตัวกลางอากาศ ซึ่งพบว่ากราฟีนที่มีความหนาหนึ่งชั้นอะตอม จะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 2.3 เปอร์เซ็นต์ของแสงขาวเท่านั้น และผลทางด้านสเปกโตรสโกปีพบว่าค่าความทึบแสงของกราฟีนไม่ขึ้นกับค่าความยาวคลื่นเลยแสดงว่ากราฟีนนั้นมีค่าความโปร่งแสงสูงมากถึง 97-98 เปอร์เซ็นต์ในทุกความยาวคลื่น

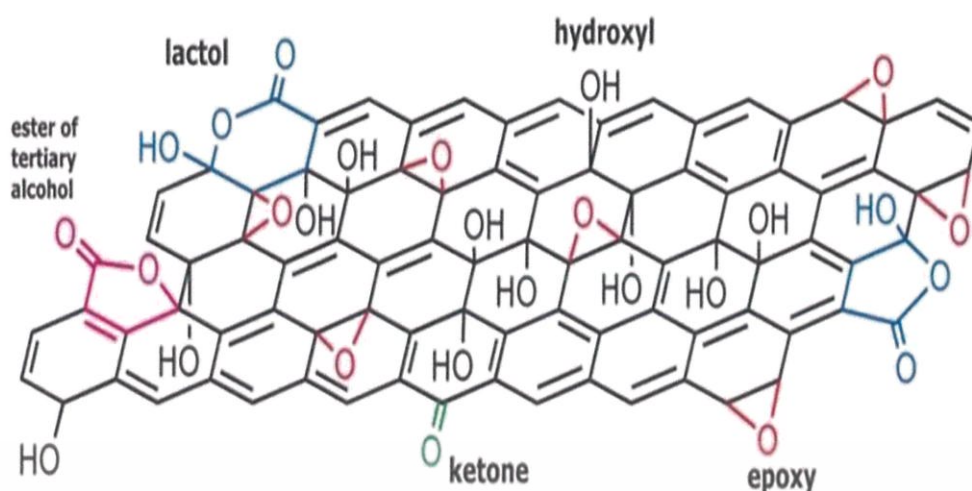
4. สมบัติทางความร้อน ความสามารถในการนำความร้อนจำเพาะของกราฟีนจะสูงกว่าวัสดุประเภทอื่น ๆ และยังนำความร้อนได้ดีกว่าเพชร ด้วยคุณสมบัตินี้จึงสามารถนำกราฟีนไปช่วยในระบบระบายความร้อนใน CPU ได้ด้วย

5. สมบัติทางเคมี ผิวหน้าของกราฟีนนั้นสามารถดูดซับและคายอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซต่าง ๆ ได้ เช่น NO_2 NH_3 และ OH สารที่ถูกดูดซับมานั้นจะทำหน้าที่เป็นเสมือนอะตอมผู้ให้และผู้รับนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้า (Carrier Concentration)

2.5.2 กราฟีนออกไซด์

กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) เป็นกราฟีนที่เตรียมได้จากกระบวนการทางเคมี ซึ่งสามารถเตรียมได้จำนวนมากต่อครั้ง จึงเหมาะสมในการผลิตทางอุตสาหกรรม กราฟีนออกไซด์มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบคาร์บอนชั้นเดียวเหมือนกับกราฟีน ดังรูปที่ 2.14 แต่มีความแตกต่างกันที่กราฟีนเป็นโครงสร้างที่มีแค่คาร์บอนและไฮโดรเจนทำให้เป็นสารที่ไม่มีขั้ว แต่กราฟีนออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนเข้ามาด้วย เช่น หมู่คาร์บอกซิล โดยหมู่ฟังก์ชันจะอยู่รอบ ๆ ที่ขอบหรือระหว่างโครงสร้าง ทำให้กราฟีนออกไซด์มีสมบัติเป็นสารมีขั้ว ส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ในลักษณะของสารแขวนลอยกับน้ำจึงสะดวกต่อการขนส่งและการจัดเก็บนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ลักษณะโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ [24]

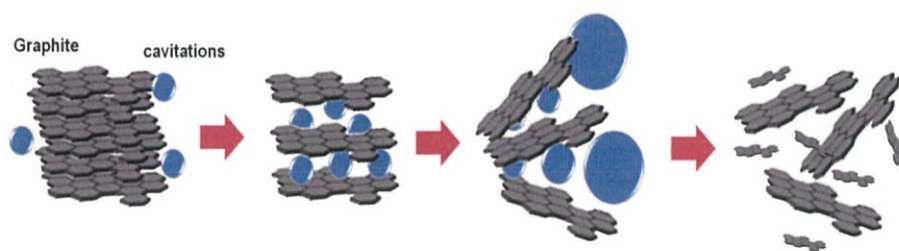
2.5.3 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์

การสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีทั้งหมด 3 ขั้นตอน โดยเริ่มจากการทำให้กราฟไฟต์เปลี่ยนเป็นกราฟไฟต์ออกไซด์ จากนั้นเปลี่ยนกราฟไฟต์ออกไซด์เป็นกราฟีนออกไซด์และนำกราฟีนออกไซด์ไปผ่านกระบวนการรีดักชันเพื่อให้ได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

1. การสังเคราะห์กราฟไฟต์ออกไซด์ คือการทำให้ผงกราฟไฟต์เปลี่ยนเป็นผงกราฟไฟต์ออกไซด์ ด้วยวิธีการของฮัมเมอร์ (Hummer's method) ซึ่งกระบวนการนี้คือการดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันของกราฟไฟต์โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนแทรกในระหว่างชั้น ทำให้ความกว้างของระนาบผลึกกราฟไฟต์กว้างขึ้นโดยกระบวนการนี้จะอาศัยตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง ตัวอย่างเช่น กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก ซึ่งผงกราฟไฟต์ออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีสีน้ำตาลแตกต่างจากสีกราฟไฟต์เดิม

2. การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ คือขั้นตอนในการเปลี่ยนผงกราฟไฟต์ออกไซด์จากขั้นตอนที่แล้วเป็นสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ โดยใช้วิธี Sonication ซึ่งเป็นการปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูงแทรกไประหว่างชั้นของกราฟไฟต์ออกไซด์ที่เกาะกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ เพื่อแยกชั้นออกจากกันและทำให้หลุดออกมาเป็นแผ่นชั้นเดียวของกราฟีนออกไซด์ ซึ่งกระบวนการ Sonication แสดงได้ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธี Sonication [22]

3. การสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ คือขั้นตอนการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ให้ได้สารแขวนลอยสีดำของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์โดยอาศัยกระบวนการรีดักชัน ซึ่งกระบวนการรีดักชันสามารถทำได้ 2 วิธี คือ กระบวนการรีดักชันทางความร้อนและกระบวนการรีดักชันทางเคมี โดยกระบวนการรีดักชันทางความร้อนเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่ายไม่ซับซ้อนแต่ใช้เวลานานทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการรีดิวซ์ ส่วนกระบวนการทางเคมีเป็นกระบวนการที่นิยมทำเนื่องจากมีความรวดเร็วและให้ผลผลิตร้อยละของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สูง แต่ต้องใช้สารเคมีหลายตัว เช่น ไฮโดรราซีน (N_2H_4) ไฮโดรควิโนน ($C_6H_6O_2$) เป็นต้น เพื่อช่วยในกระบวนการรีดิวซ์ซึ่งสารเคมีเหล่านี้เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

2.5.4 คุณสมบัติของกราฟีนออกไซด์

ปัจจุบันกราฟีนออกไซด์ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่น อาทิเช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น การนำไฟฟ้า เป็นต้น โดยคุณสมบัติที่สำคัญมีดังนี้

1. ความโปร่งแสง เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีความบางทำให้วัสดุมีความโปร่งแสงสูง แต่ขณะเดียวกันก็ดูดซับแสงได้สูงถึงร้อยละ 2.3 ซึ่งมากกว่าวัสดุอื่น ๆ ที่โปร่งแสงเท่ากัน จึงนิยมนำไปใช้ในด้านการของแผงวงจรพลังงานอาทิตย์และตัวตรวจจับแสง เป็นต้น

2. คุณสมบัติเชิงกล กราฟีนออกไซด์มีค่าความแข็งแรงสูงซึ่งที่ความหนาเท่ากับเหล็กกราฟีนออกไซด์มีความแข็งแรงสูงกว่าเป็นร้อยเท่า นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการยืดหยุ่นสูง จึงนิยมนำไปใช้เป็นส่วนเสริมให้แก่วัสดุหรือผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

3. คุณสมบัติด้านความร้อน เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีค่าการนำความร้อนจำเพาะที่สูงมาก ทำให้นำความร้อนได้ดีและกระจายความร้อนได้ทุกทิศทางตามระนาบของแผ่นกราฟีนออกไซด์ ซึ่งนิยมนำไปใช้เป็นส่วนประกอบหรือชิ้นส่วนในโรงงาน หรือพวกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่ดี

4. คุณสมบัติทางเคมี เนื่องจากกราฟีนออกไซด์เป็นสารมีขั้วจึงสามารถละลายน้ำได้และมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความสามารถในการดูดซับสูงเพราะมีรูพรุนในโครงสร้างจำนวนมากและมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง จาก

คุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซลล์เยื่อเลือกผ่านในการกลั่นเอทานอล หรือ การแยกเกลือออกจากน้ำ เป็นต้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โชติมา รัตนศักดิ์ปรากฏการ [25] ศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/Zn/Al โดยใช้คลื่นไมโครเวฟช่วย ตกตะกอนร่วม ผสมกับ HZSM-5 เจือ Zr เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์ ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/Zn/Al มีตัวแปรคือเวลาในการให้ความร้อนด้วย คลื่นไมโครเวฟที่ 0-30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 เจือ Zr ด้วยวิธีการเอ็บซุ่มแบบพอดี้ ร่วมกับการ ใช้คลื่นอัลตราซาวด์โดยมีตัวแปรคืออัตราส่วนร้อยละปริมาณการเจือ Zr 2%-6% โดยน้ำหนัก จากนั้น ผสมรวมตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ด้วยการบดผสมทางกายภาพ โดยศึกษา สัณฐานวิทยาของ ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/Zn/Al และปริมาณการเจือ Zr บน HZSM-5 โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM-EDS) การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (X-ray diffraction : XRD) และการสลายตัวทางความร้อนโดย (Thermal gravimetric analysis : TGA) ค่าความเป็นกรดตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ด้วยเทคนิคโปรแกรมทางอุณหภูมิเพื่อทดสอบการคายซับโดยใช้แอมโมเนีย (Ammonium Temperature Programmed Desorption : NH₃-TPD)

Ainara Garcia-Gallastegui และคณะ [26] ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์บนตัวรองรับกราฟีนออกไซด์ พบว่าเลเยอร์ไฮดรอกไซด์สองชั้น (LDHs) มีศักยภาพในการดูดซับสาร CO₂ แต่ต้องมีการปรับปรุงความเสถียรและความสามารถในการดูดซับ CO₂ ในเชิงพาณิชย์ ในการศึกษาในปัจจุบันนี้ graphene oxide ให้อัตราดูดซับสูงกว่าสองมิติ (2D) ที่มีน้ำหนักเบาซึ่งสามารถโต้ตอบกับ 2D LDHs ได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้เพิ่มความสามารถในการดูดซับ CO₂ และความเสถียรของ multicycle ในการประกอบ เป็นผลให้ความจุสัมบูรณ์ของ LDH เพิ่มขึ้น 62% โดยใช้ graphene oxide เพียง 7% น้ำหนัก (GO) เป็นตัวรองรับ ขั้นตอนการทดลองสำหรับการสังเคราะห์วัสดุที่จะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝนโดยตรงของอนุภาคนาโน LDH บน GO ตามด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างและทางกายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน X-ray การเลี้ยวเบน การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและ (BET) พื้นผิว Brunauer-Emmett- เหมาะกับการวัดพื้นที่ การไต่ตรอยละเอียดยืนยันความเข้ากันได้ของสารเคมีพื้นผิว หลังจากการสลายตัวด้วยความร้อนผสมโลหะออกไซด์ (MMOs) จะได้รับกับสถานที่ขึ้นพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CO₂ ได้มีการจัดทำตัวอย่างตัวอย่างที่มีสัดส่วน GO/MMO ที่แตกต่างกันซึ่งมีลักษณะครบถ้วนและมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ CO₂ ที่สร้างขึ้นผ่าน TGA

Muhammad Duaud และคณะ [27] ได้ทำการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยต่าง ๆ เกี่ยวกับการสังเคราะห์และการใช้งานของวัสดุผสมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์กับกราฟีนออกไซด์ เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการใช้งานในด้านต่างๆ เนื่องจากสมบัติที่ดีขึ้นทั้งพื้นผิวที่มากขึ้น เสถียรภาพทางความร้อนและเคมีที่ดีขึ้น การนำไฟฟ้า เป็นต้น โดยงานวิจัยที่รวบรวมมายังมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถควบคุมการกระจายตัวและขนาดของวัสดุผสมได้

นุชนารถ ศิริวงษ์ [28] ได้ศึกษาการสอดแทรกแอลคอกไซด์เข้าสู่โครงสร้างของแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ เพื่อขยายระยะห่างช่องว่างระหว่างชั้นของโลหะไฮดรอกไซด์ โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบชนิดต่าง ๆ ภายในโครงสร้างของแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ได้แก่ เมทอกไซด์ เอทอกไซด์ ไอโซโพรพอกไซด์และเตริต-1บิวทอกไซด์ วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การสูญเสียน้ำหนักด้วยความร้อนและฟูรีเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี โดยทำการศึกษาค่าผลของชนิดแอลคอกไซด์ที่ทำการสอดแทรกเข้าสู่โครงสร้างของแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่มีต่อผลได้และการเลือกจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์ในการเร่งทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของกลีเซอรอลกับเมทิลลอเรตเพื่อสังเคราะห์กลีเซอริลโมโนลอรีน พบว่า แมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่สอดแทรกด้วยแอลคอกไซด์ทั้งสี่ชนิดสามารถเร่งปฏิกิริยาได้อย่างว่องไวและมีการเลือกจำเพาะต่อกลีเซอริลโมโนลอรีนสูงชัน การสอดแทรกด้วยเตริต-1บิวทอกไซด์ไอออนเข้าสู่โครงสร้างของแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวและการเลือกจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์สูงสุด โดยให้ผลได้และการเลือกจำเพาะต่อกลีเซอริลโมโนลอรีนเท่ากับ 86.6 และ 87.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่การเปลี่ยนของเมทิลลอเรตเท่ากับ 99.0 เปอร์เซ็นต์เมื่อภาวะในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อเมทิลลอเรตเท่ากับ 6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและระยะเวลาทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

Lei Zhang และคณะ [29] ได้ศึกษาการกำจัดฟอสเฟต (PO₄³⁻) ออกจากน้ำ โดยการเตรียมสารดูดซับผ่านการทำกาทตะกอนจากกาทตะกอนจากโรงงานบำบัดน้ำเสีย: สารดูดซับตะกอนคาร์บอน (CSA) กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสถูกกำหนดขึ้นหลังจากศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติทาง

เคมีของ CSA และผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัส ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการดูดซับฟอสเฟตโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

CSA สามารถอธิบายปรากฏการณ์ ดูดซับที่เกิดขึ้นแบบจำลองจลนพลศาสตร์ pseudo-second

order และ ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับคือการดูดซับชั้นโมเลกุลเดี่ยวโดยมีปฏิกิริยาทางเคมี บริเวณที่มีผลผูกพันกับฟอสเฟตบนพื้นผิวจะทำให้อนุภาคของแร่ธาตุมี Si/Ca/Al/Fe แร่ธาตุที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลักในการกำจัดฟอสฟอรัส กลไกการกำจัดฟอสเฟตเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนรวมถึงการตกผลึกผ่านปฏิกิริยาระหว่าง Ca^{2+} และ PO_4^{3-} การเกิดการตกตะกอน ของ Ca^{2+} , Al^{3+} และ PO_4^{3-} และการดูดซับโพแทสเซียมโพแทสเซียมออกไซด์ที่ประกอบด้วย Si/Al/Fe



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

- 1) บีกเกอร์ : Duran ขนาด 50 100 600 มิลลิลิตร และ 1 2 3 ลิตร
- 2) กรวยแยก : Witeg ขนาด 200 และ 500 มิลลิลิตร
- 3) ชุดอุปกรณ์การกรองลดความดัน และ กระดาษกรอง : Macherey-Nagel GmbH&Co.KG
- 4) หลอดหยดสาร แท่งแก้วคนสาร : Local
- 5) ชุดขาตั้ง แคลมป์จับ และโอริง
- 6) เครื่องวัดค่า pH : Denver Instrument, UltraBASIC UB-10
- 7) เครื่องอัลตราซาวด์
- 8) แท่งแก้วคน
- 9) ข้อนटकสาร
- 10) กระจกนาฬิกา
- 11) กระดาษยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์
- 12) ชุดกรองบุชเนอร์
- 13) กระดาษฟอยด์
- 14) หลอดหยด
- 15) อ่างให้ความร้อน
- 16) ขวดวัดปริมาตร ขนาด 250 500 และ 1000 มิลลิลิตร
- 17) กระบอกตวง ขนาด 10 และ 50 มิลลิลิตร
- 18) ตู้อบ : MEMMERT. UNB 300
- 19) เตาเผา : CHAVACHOTE, L9/12P
- 20) เครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น FT-IR SPECTRUM GX

21) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) : BRUCKER เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 22) เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยใช้สมบัติทางความร้อน (Thermal gravimetric Analysis, TGA) : Perkin, Pyris 1 TGA
- 23) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) : ZEISS, EVO@MA10
- 24) เครื่องวิเคราะห์ธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDX)

3.2 สารเคมี

- 1) น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water, DI water)
- 2) คอปเปอร์ไนเตรต ไทไฮเดรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) assay 99.5% บริษัท Laboratory Reagent & Fine Chemicals
- 3) ซิงค์ไนเตรต เฮกซะไฮเดรต ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) assay 98% บริษัท Laboratory Reagent & Fine Chemicals
- 4) อะลูมิเนียมไนเตรต ไนนะไฮเดรต ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) assay 98% บริษัท Laboratory Reagent & Fine Chemicals
- 5) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) assay 99.5% บริษัท Sigma-Aldrich Laborchemikalien GmbH
- 6) สีย้อมอินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine) บริษัท Sigma Aldrich

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่

- 1) การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์
- 2) การเตรียมตัวดูดซับโลหะออกไซด์ Cu-Zn-Al (LDH)
- 3) การเตรียมตัวดูดซับโลหะออกไซด์ Cu-Zn-Al ผสมกับกราฟีนออกไซด์ (Cu-Zn-Al oxide/GO)
- 4) การทดสอบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการดูดซับ

3.3.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ (GO)

ทำการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์โดยใช้วิธีการดัดแปลงกระบวนการของฮัมเมอร์ (Hummer method) จากนั้นนำไปโซนิเคชัน (Sonication) ในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั่วโมง และนำไปหมუნเหวียง 3000 รอบ/7นาที จะได้สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ในน้ำเข้มข้น 3.2 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร

3.3.2 การเตรียมตัวดูดซับเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH)

สังเคราะห์ LDH ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมอย่างง่าย (Conventional Co-precipitation method) โดยใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวช่วยตกตะกอน วิธีการเตรียมเป็นดังนี้

- 1) ชั่งคอปเปอร์ไนเตรต ไตรไฮเดรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 9.3028 กรัม, ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 5.7663 กรัม และอะลูมิเนียมไนเตรด-โนนนะไฮเดรต ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 1.2005 กรัม ผสมให้เข้ากันจากนั้นละลายในน้ำปราศจากไอออนแล้วปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร
- 2) ชั่งสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 6.7940 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออนจากนั้นปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร
- 3) นำสารละลายในข้อ 1 และ 2 เทใส่กรวยแยก แล้วนำมาตกตะกอนร่วมในบีกเกอร์ขนาด 2000 มิลลิลิตรที่มีน้ำปราศจากไอออนประมาณ 500 มิลลิลิตรซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียสและ ควบคุมความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 ± 0.5 โดยใช้แท่งแม่เหล็กปั่นกวนตลอดเวลาจนสารละลายในกรวยแยกหมด จากนั้นปั่นกวนต่ออีก 1 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ข้ามคืนในระบบปิด
- 4) นำตะกอนที่ได้มารองแบบลดความดันและล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนอุ่นประมาณ 8-9 ครั้ง
- 5) นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารประกอบโลหะออกไซด์ จากนั้นนำสารที่ได้ไปบดด้วยโม่ร่งบดสาร

3.3.3 การเตรียมตัวดูดซับโลหะออกไซด์ Cu-Zn-Al ผสมกับกราฟีนออกไซด์ (GO)

การเตรียมตัวดูดซับโลหะออกไซด์ Cu-Zn-Al ผสมกับกราฟีนออกไซด์ (GO) โดยใช้อัลตราซาวด์ช่วยในการตกตะกอนร่วม (Ultrasound assted co-precipitation method) วิธีการเตรียมเป็นดังนี้

- 1) ชั่งคอปเปอร์ไนเตรตไตรไฮเดรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) อะลูมิเนียมไนเตรดโนนนะไฮเดรต ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ผสมกันโดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราส่วนตามตารางที่ 3.1 จากนั้นละลายในน้ำปราศจากไอออนแล้วปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร
- 2) ชั่งสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 6.7940 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออนจากนั้นปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร
 - 3) นำสารละลายในข้อ 1 และ 2 เทใส่กรวยแยก แล้วนำมาตกตะกอนรวมในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตรที่มีน้ำปราศจากไอออนประมาณ 200 มิลลิลิตรและสารละลายกราฟีน-ออกไซด์ตามตารางที่ 3.1 โดยใช้แท่งแม่เหล็กปั่นกวนตลอดเวลา ซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียสและ ควบคุมความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 ± 0.5 โดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์ช่วยในการตกตะกอนรวมโดยคลื่นความถี่ที่ใช้อยู่ในช่วง 20-40 กิโลเฮิร์ต
 - 4) นำตะกอนที่ได้มากรองแบบลดความดันและล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนอุ่นประมาณ 8-9 ครั้ง
 - 5) นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารประกอบโลหะออกไซด์ จากนั้นนำสารที่ได้ไปบดด้วยโม่บดสาร

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนปริมาณของ Cu-Zn-Al และ GO โดยน้ำหนักที่ใช้

ชื่อสารตัวอย่าง (อัตราส่วน)	$(\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$ (g)	$(\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ (g)	$(\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O})$ (g)	GO (ml)
Cu-Zn-Al	9.3028	5.7663	1.2005	-
Cu-Zn-Al/GO (10:1)	0.9302	0.5768	0.1201	31.25
Cu-Zn-Al/GO (20:1)	0.9302	0.5768	0.1201	26.32
Cu-Zn-Al/GO (30:1)	0.9302	0.5768	0.1201	17.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ระบุชื่อผู้แต่ง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์และการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์

3.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับโลหะออกไซด์ Cu-Zn-Al และ Cu-Zn-Al/GO คอมโพสิต

3.4.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray powder Diffraction, XRD) เพื่อวิเคราะห์เอกลักษณ์และขนาดผลึกของตัวดูดซับโลหะออกไซด์ Cu-Zn-Al

3.4.3 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยใช้สมบัติทางความร้อน (Thermal gravimetric Analysis, TGA) เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของตัวดูดซับโลหะออกไซด์ Cu/Zn/Al

3.4.4 เครื่องวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) เพื่อการตรวจสอบสารในเชิงคุณภาพหรือเพื่อยืนยันสูตรโครงสร้าง

3.5 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับ

3.5.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสีย้อมอินดิโกคาร์มิน

- 1) เตรียมสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินความเข้มข้น 60 มิลลิกรัม/ลิตร โดยอินดิโกคาร์มิน 0.06 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร
- 2) นำสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินที่เตรียมได้มาเจือจางที่ความเข้มข้นต่างๆดังนี้ 0.5 1 3 7.5 15 30 45 และ 60 มิลลิกรัม/ลิตร
- 3) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer เลือกความเข้มข้นที่เหมาะสมเพื่อนำมาทดสอบกับตัวดูดซับโลหะออกไซด์ โดยใช้ความเข้มข้นที่ 45 มิลลิกรัม/ลิตร

3.5.2 การทดสอบประสิทธิภาพของสีย้อมอินดิโกคาร์มิน

- 1) ชั่งตัวดูดซับโลหะออกไซด์ 0.05 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2) เตรียมสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินความเข้มข้น 45 มิลลิกรัม/ลิตรปริมาตร 100 มิลลิลิตรแล้วผสมกับตัวดูดซับโลหะออกไซด์ในข้อที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างโดยการเก็บสารละลายตัวอย่างใส่หลอดเซนต์ปีวีสประมาณ 10 มิลลิลิตร ทุก ๆ นาทีที่ 5 10 15 20 25 30 45 และ 60 นาที (ทำ 2 ซ้ำ)
- 4) นำไปหมุนเหวี่ยง 3000 รอบ/20 นาที
- 5) นำสารละลายตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer แล้วบันทึกค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงสูงสุด เท่ากับ 610 นาโนเมตร
- 6) ทำซ้ำข้อที่ 4-8 โดยเปลี่ยนน้ำหนักตัวดูดซับโลหะออกไซด์เป็น 0.075 0.100 และ 0.125 กรัม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

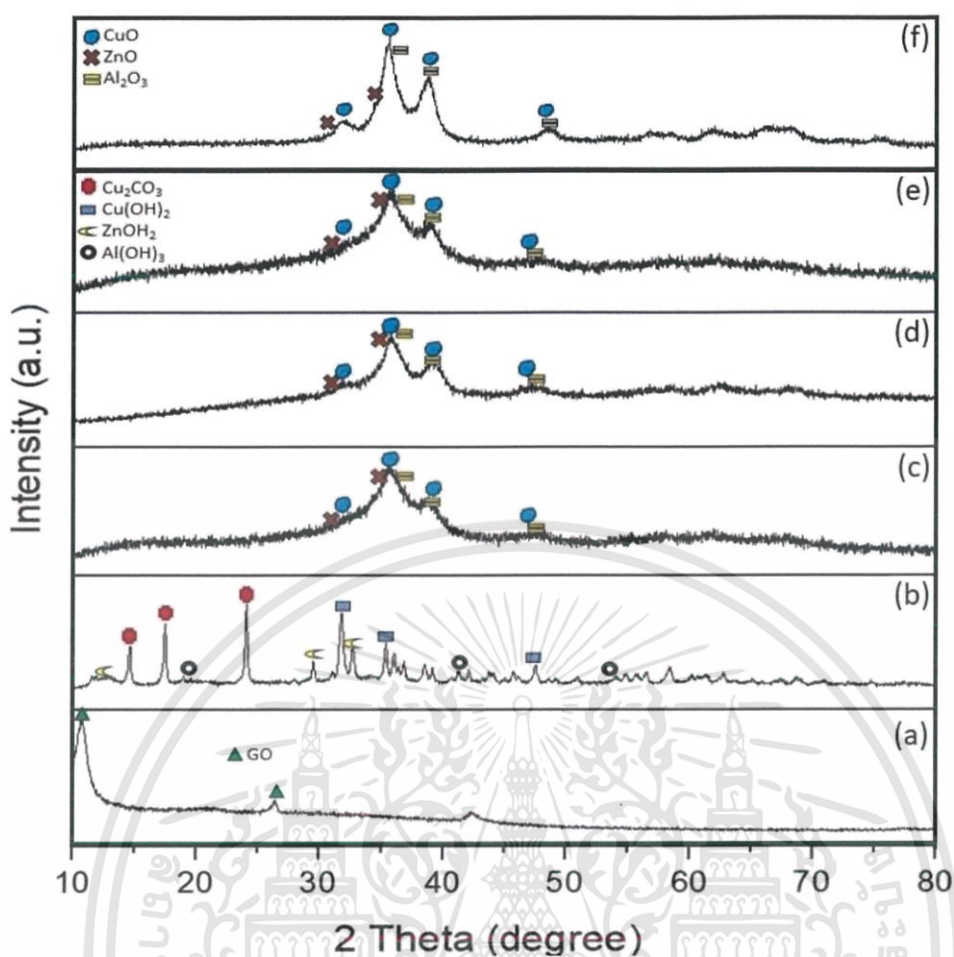
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับโลหะคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม ออกไซด์ผสมกับกราฟีนออกไซด์ (Cu-Zn-Al/GO) โดยใช้อัลตราซาวด์ช่วยในกระบวนการตกตะกอนร่วมโดยการนำเสนอผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองของงานวิจัยนี้เป็นการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีด้วยเทคนิคต่างๆและทดสอบประสิทธิภาพของการดูดซับ

4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคต่างๆ

4.1.1 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกและสามารถคำนวณหาปริมาณต่างๆที่อยู่ในตัวอย่างได้ งานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิค XRD พิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับโลหะออกไซด์ Cu-Zn-Al และตัวดูดซับโลหะออกไซด์ Cu-Zn-Al ผสมกับกราฟีนออกไซด์ โดยผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวดูดซับโลหะออกไซด์ แสดงในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวดูดซับโลหะออกไซด์ Cu-Zn-Al ผสมกราฟีน-ออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์ช่วยในกระบวนการตกตะกอนร่วม (a) GO (b) LDH (c) Cu-Zn-Al/GO 10:1 (d) Cu-Zn-Al/GO 20:1 (e) Cu-Zn-Al/GO 30:1 และ (f) Cu-Zn-Al

และจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ LDH, Cu-Zn-Al และ Cu-Zn-Al/GO คอมโพสิต พบว่าตัวดูดซับ Cu-Zn-Al ที่ผ่านการตกตะกอนร่วมกับกราฟีนออกไซด์ด้วยคลื่นอัลตราซาวด์จะพบพิกัดเอกลักษณ์ที่สอดคล้องกับรูปแบบผลึกของสารประกอบดังนี้คือ

- กราฟีนออกไซด์จะปรากฏพิกัดเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 11.8 และ 26.7
- CuCO_3 จะปรากฏพิกัดเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 14.62, 17.44 และ 24.02 (JCPDS 41-1390)
- Cu(OH)_2 จะปรากฏพิกัดเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 33.55, 35.23 และ 46.23 (JCPDS 41-1390)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

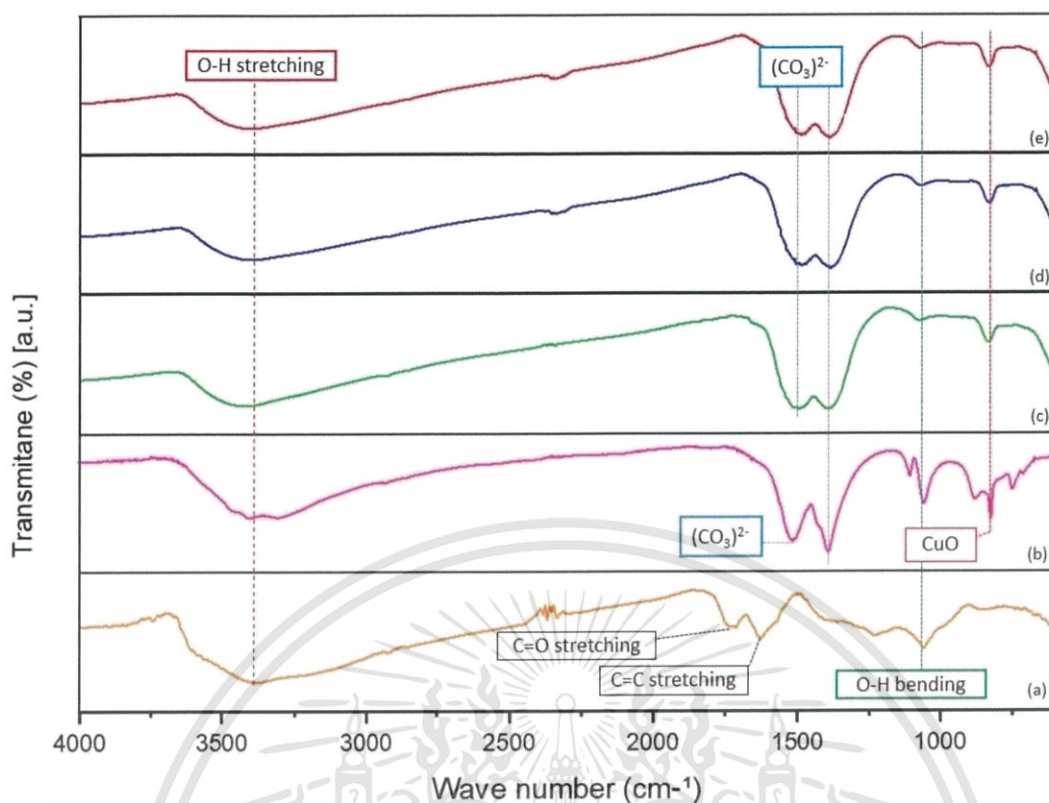
- $Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$ (JCPDS 54-0047) จะปรากฏพีกเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 13.4, 27.5 และ 31.5 [30]
- $Al(OH)_3$ (JCPDS 20-0011) จะปรากฏพีกเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 18.5, 20.2, 28.0, 41.0 และ 53.6
- สารประกอบเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ของคอปเปอร์-ซิงค์-อะลูมิเนียม $((Cu,Zn)_6Al_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O, LDH)$ (JCPDS 38-0487) จะปรากฏพีกเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 11.55, 23.30, 34.9 และ 39.0 [30-31]
- โครงสร้างผลึกแบบโมนอกลิคของ CuO (JCPDS 48-1548) จะปรากฏพีกเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 32.54, 35.55, 38.73 และ 46.23
- โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล ZnO (JCPDS 36-1451) จะปรากฏพีกเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 31.89 และ 34.40
- Al_2O_3 (JCPDS 49-0134) จะปรากฏพีกเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 35.9, 36.3, 37.2, 38.9, 39.9 และ 45.50

จากผลการวิเคราะห์เฟสของ Cu-Zn-Al ที่ผ่านการตกตะกอนร่วมกับกราฟีนออกไซด์ด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ พบพีกหลักเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 32.54, 35.55, 38.73 และ 46.23 ซึ่งตรงกับระนาบของผลึกคอปเปอร์ออกไซด์ ส่วนพีกที่เกิดขึ้นตำแหน่งอื่น ๆ จะตรงกับระนาบของผลึกคอปเปอร์-คาบอเนต ซิงค์ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ เนื่องจากสารประกอบแต่ละตัวเกิดการ overlap ของพีกทำให้ลักษณะที่ปรากฏของพีกมีฐานที่กว้างซึ่งมีความเป็นอสัณฐาน

4.1.2 เครื่องวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับ Cu-Zn-Al (LDH) GO และ Cu-Zn-Al/GO ด้วยเครื่อง Fourier Infrared Spectrometer (FTIR) จากการสั่น ยืด และงอของสารเนื่องจากการดูดกลืนรังสี IR ของพันธะภายในโมเลกุลในช่วงความถี่ต่าง ๆ แล้วแสดงผลออกมาเป็นสเปกตรัมแสดงดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



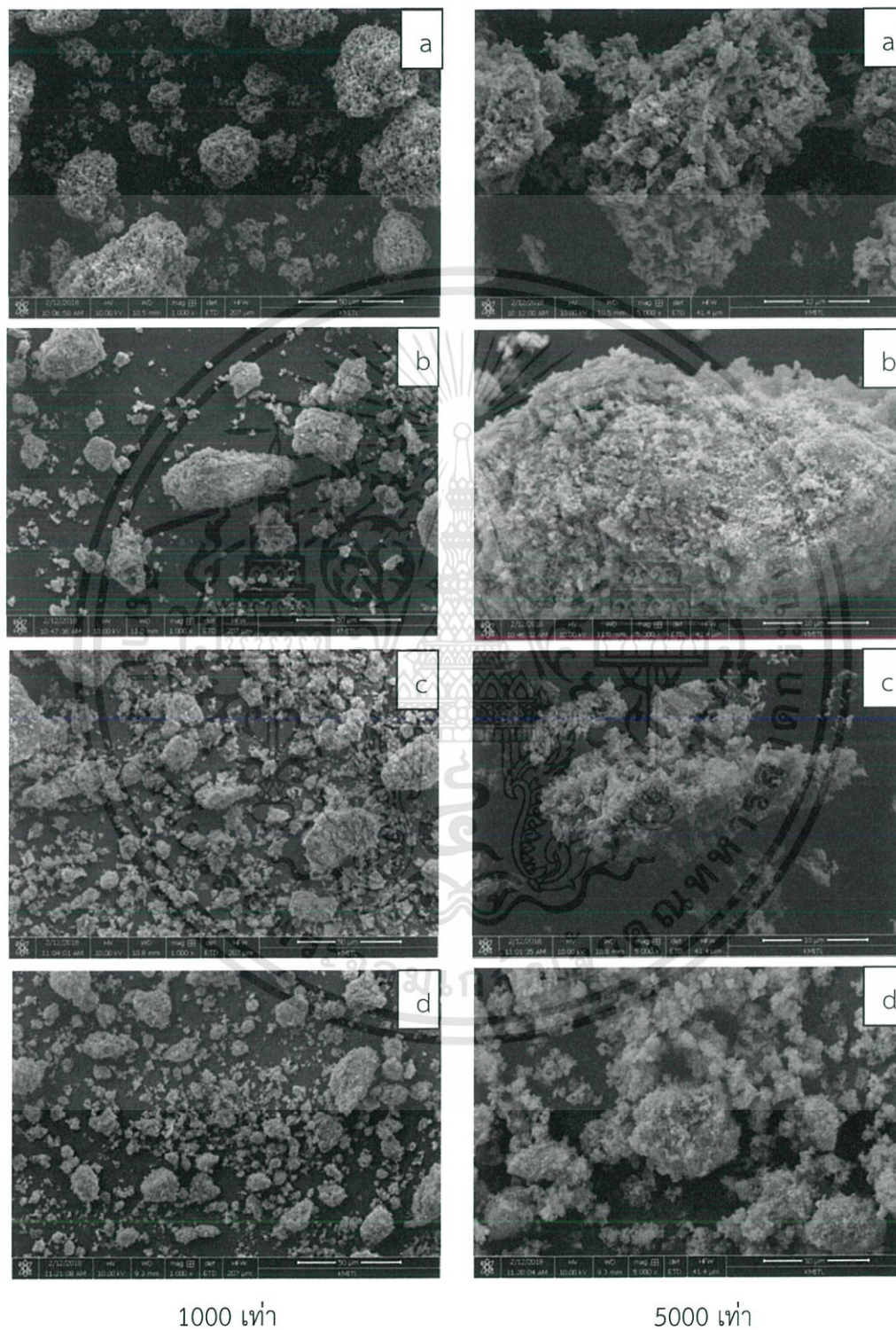
รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของ GO, Cu-Zn-Al (LDH) และ Cu-Zn-Al/GO อัตราส่วน 10:1 20:1 และ 30:1 (a) GO (b) LDH (c) Cu-Zn-Al/GO 10:1 (d) Cu-Zn-Al/GO 20:1 และ (e) Cu-Zn-Al/GO 30:1

จากการวิเคราะห์ผล FT-IR ของตัวดูดซับ Cu-Zn-Al (LDH), GO และ Cu-Zn-Al/GO พบว่าเส้นสเปกตรัมของ GO แสดงหมู่ฟังก์ชันที่ 3300 cm^{-1} (O-H stretching) 1700 cm^{-1} (C=O stretching) 1620 cm^{-1} (C=C stretching) 1050 cm^{-1} (C-O stretching) เส้นสเปกตรัมของ LDH และ Cu-Zn-Al/GO อัตราส่วน 10:1 20:1 30:1 ที่ความยาวคลื่น 3400 cm^{-1} แสดงการสั่นของพันธะ O-H stretching แสดงถึงโมเลกุลของน้ำหรือมีความชื้นของสารตัวอย่างและโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อตรวจวิเคราะห์, ที่ความยาวคลื่น 1510 cm^{-1} 1480 cm^{-1} และ 1380 cm^{-1} แสดงการสั่นของหมู่คาร์บอเนต (CO_3) ที่หลงเหลือจากขั้นตอนการตกตะกอนร่วม, ความยาวคลื่น 1050 cm^{-1} แสดงการสั่นของ O-H bending, ที่ความยาวคลื่น 690 cm^{-1} แสดงการสั่นของ CuO, ที่ความยาวคลื่น 830 cm^{-1} แสดงการสั่นของ Al_2O_3 , และที่ความยาวคลื่น 640 cm^{-1} แสดงการสั่นของ ZnO ซึ่งพีคการดูดกลืนของ Cu-Zn-Al/GO ทั้ง 3 อัตราส่วน ไม่พบพีคเอกลักษณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกราฟีนออกไซด์เนื่องจากปริมาณของกราฟีนออกไซด์มีอัตราส่วนที่น้อยจึงทำให้ไม่พบพีคของกราฟีนออกไซด์ที่ผสมเข้าไปใน Cu-Zn-Al [32]

4.1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)



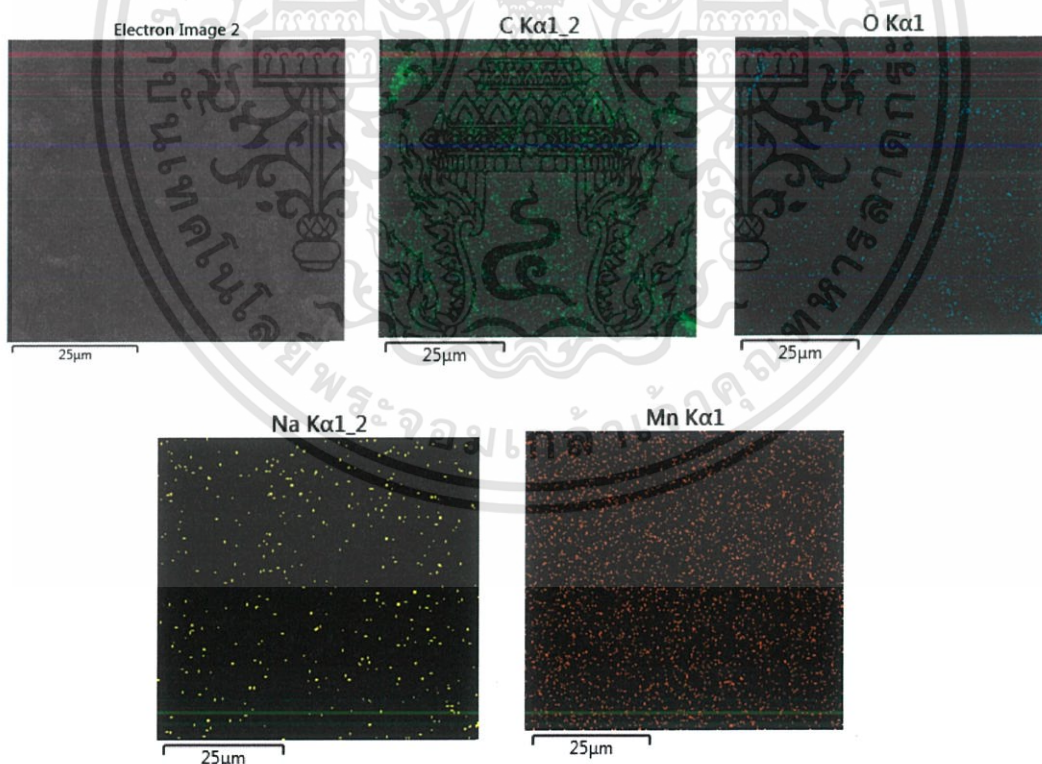
รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ a) LDH b) Cu-Zn-Al/GO 10:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัด
 c) Cu-Zn-Al/GO 20:1 d) Cu-Zn-Al/GO 30:1 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่าและ 5,000 เท่า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำตัวดูดซับโลหะออกไซด์ Cu-Zn-Al (LDH), Cu-Zn-Al ที่ผสมกับกราฟีนออกไซด์ ในอัตราส่วน 10:1, 20:1 และ 30:1 มาวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.3 พบว่าอนุภาคของตัวดูดซับโลหะออกไซด์ Cu-Zn-Al (LDH) มีลักษณะเป็นผลึกแหลมเล็ก มีรูปทรงแบบไม่มีรูปร่าง เกาะตัวรวมกันเป็นกลุ่ม ซึ่งเมื่อนำ Cu-Zn-Al ผสมกับกราฟีนออกไซด์ ในอัตราส่วนต่าง ๆ นั้น พบว่าผลึกมีลักษณะกลมมน ไม่เป็นผลึกแหลม ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากผลของ GO ที่มีลดความเป็นผลึกของ LDH และยังพบการกระจายตัวของตัวดูดซับโลหะออกไซด์อยู่บริเวณขอบหรือพื้นที่ขรุขระของแผ่น GO

4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวและองค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับในระดับจุลภาค (EDS)

การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวและองค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสามารถอธิบายลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคและองค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับ



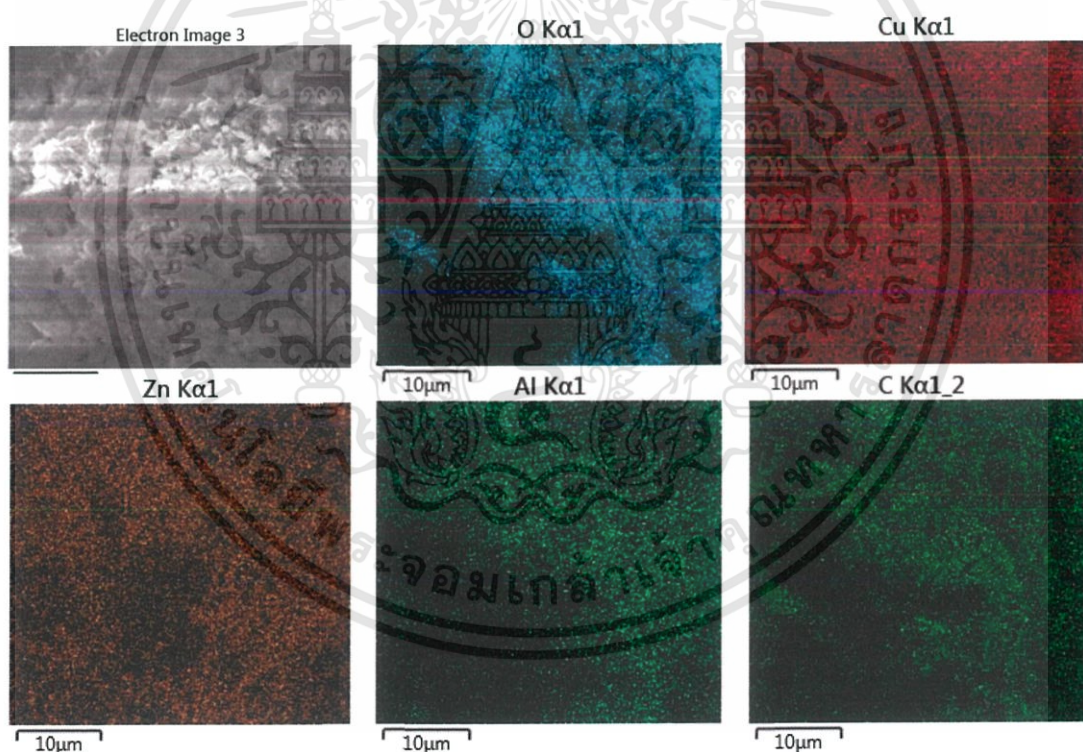
รูปที่ 4.4 ภาพการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ของกราฟีนออกไซด์ (GO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบธาตุของกราฟีนออกไซด์

Element	Wt%
C	26.37
O	71.33
S	0.34
Mn	1.96

จากรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.1 พบองค์ประกอบของธาตุที่สำคัญของกราฟีนออกไซด์ ได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน โดยมีการกระจายตัวของธาตุที่ดีและยังพบซัลเฟอร์และแมงกานีสที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อย



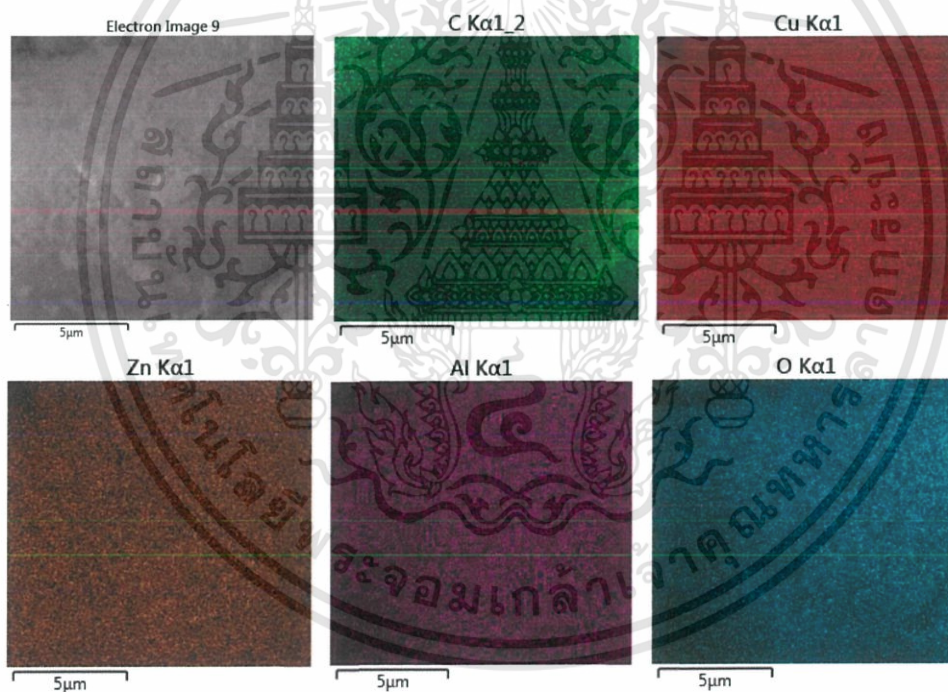
รูปที่ 4.5 ภาพการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ของตัวดูดซับ Cu-Zn-Al (LDH)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับ Cu-Zn-Al (LDH)

Element	Wt%
C	13.71
O	47.33
Al	1.60
Cu	20.00
Zn	16.46

จากรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.2 พบองค์ประกอบของธาตุที่สำคัญของตัวดูดซับ Cu-Zn-Al ได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน อะลูมิเนียม คอปเปอร์ และซิงค์โดยมีการกระจายตัวของธาตุเป็นอย่างดี



รูปที่ 4.6 ภาพการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ของตัวดูดซับ Cu-Zn-Al/GO 20:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับ Cu-Zn-Al/GO 20:1

Element	Wt%
C	15.41
O	50.31
Al	1.02
Cu	21.77
Zn	10.92

จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.3 พบองค์ประกอบของธาตุที่สำคัญของตัวดูดซับ Cu-Zn-Al/GO 20:1 ได้แก่คาร์บอน ออกซิเจน คอปเปอร์ และซิงค์ พบโซเดียมที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาในปริมาณที่น้อยมาก โดยธาตุทั้งหมดมีการกระจายตัวเป็นอย่างดี

4.1.5 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยใช้สมบัติทางความร้อน (Thermal gravimetric Analysis, TGA)

การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของตัวดูดซับโลหะออกไซด์ Cu-Zn-Al และ Cu-Zn-Al ที่ผสมกับกราฟีนออกไซด์ (Cu-Zn-Al/GO) ในอัตราส่วน 10:1 20:1 และ 30:1 ที่เตรียมด้วยวิธีการใช้อัลตราซาวด์ช่วยในกระบวนการตกตะกอนร่วม นั้นทำเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของตัวเร่งในขณะทำการใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ รวมถึงเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวดูดซับโลหะออกไซด์ ที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน อีกทั้งยังเป็นข้อมูลที่สามารถใช้เพื่อช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างตัวดูดซับโลหะออกไซด์ หลังจากผ่านการเตรียมด้วยวิธีการใช้อัลตราซาวด์ช่วยในกระบวนการตกตะกอนร่วม โดยกำหนดช่วงอุณหภูมิการวิเคราะห์ที่ 50-700 °C ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ให้แผนภาพการสลายตัวทางความร้อนของสารตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.7

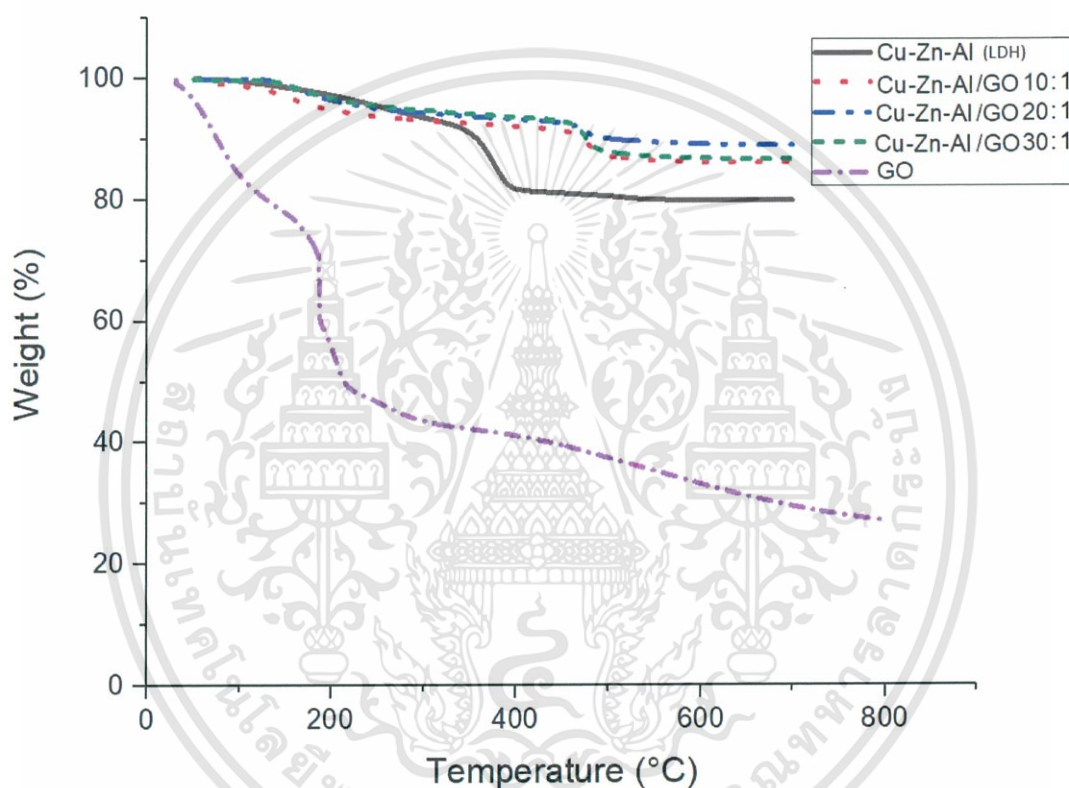
โดยจากการศึกษาลักษณะของแผนภาพการสลายตัวทางความร้อน แสดงข้อมูลที่ได้ดังนี้

1. กราฟีนออกไซด์จะสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่า 100 °C เกิดจากการระเหยของน้ำที่ถูกดูดซับ
2. การสลายตัวทางความร้อนของ Cu-Zn-Al ที่ช่วงอุณหภูมิ 300-420 °C โดยมีการสลายตัวทางความร้อนสูงสุดที่ 375 °C และมีการสูญเสียน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 12.087

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การสลายตัวทางความร้อนของ Cu-Zn-Al/GO อัตราส่วน 10:1 ที่ช่วงอุณหภูมิ 400-550 °C โดยมีการสลายตัวทางความร้อนสูงสุดที่ 483 °C และมีการสูญเสียน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 5.630

โดยที่การสลายตัวทางความร้อนของ Cu-Zn-Al/GO อัตราส่วน 20:1 และ 30:1 มีการสลายตัวทางความร้อนที่คล้ายคลึงกันกับ Cu-Zn-Al/GO อัตราส่วน 10:1



รูปที่ 4.7 การสลายทางความร้อนของ GO และตัวดูดซับ Cu-Zn-Al และ Cu-Zn-Al/GO คอมโพสิต อัตราส่วน 10:1 20:1 และ 30:1

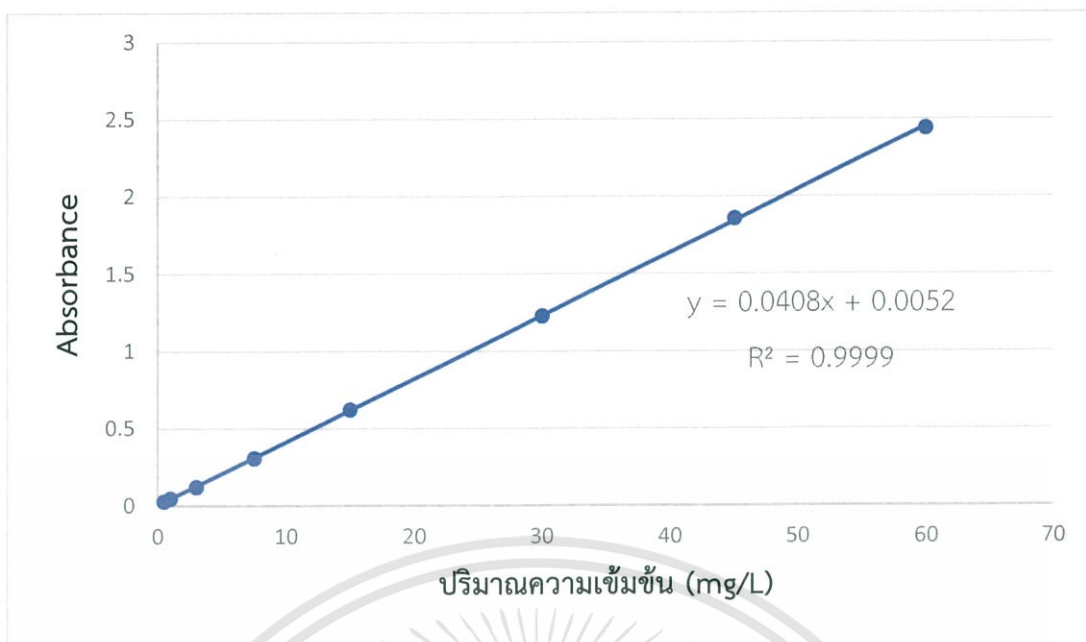
4.2 การทดสอบประสิทธิภาพตัวดูดซับโลหะออกไซด์

4.2.1 การสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสีย้อมอินดิโกคาร์มิน

จากการทดสอบความเป็นเส้นตรง ได้ศึกษาความเข้มข้นของอินดิโกคาร์มินในช่วง 0.5-60 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 610 นาโนเมตร ทำการทดลอง 2 ซ้ำ นำผล

การวิเคราะห์มาสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับหาปริมาณอินดิโกคาร์มิน แสดงดังภาพที่ 4.8

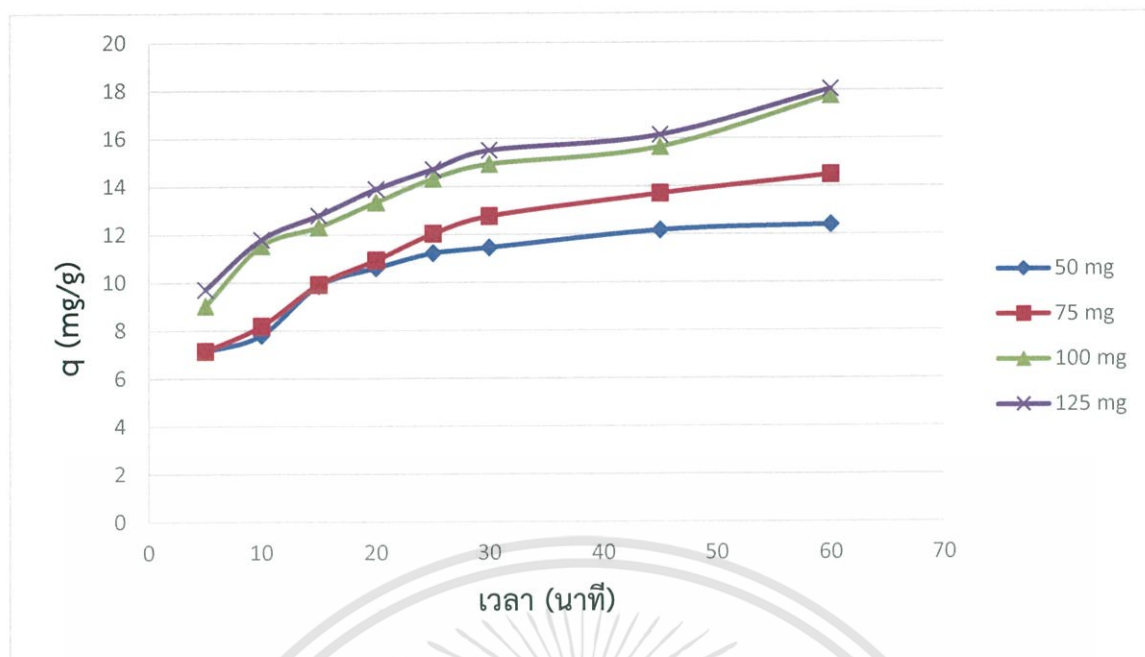
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



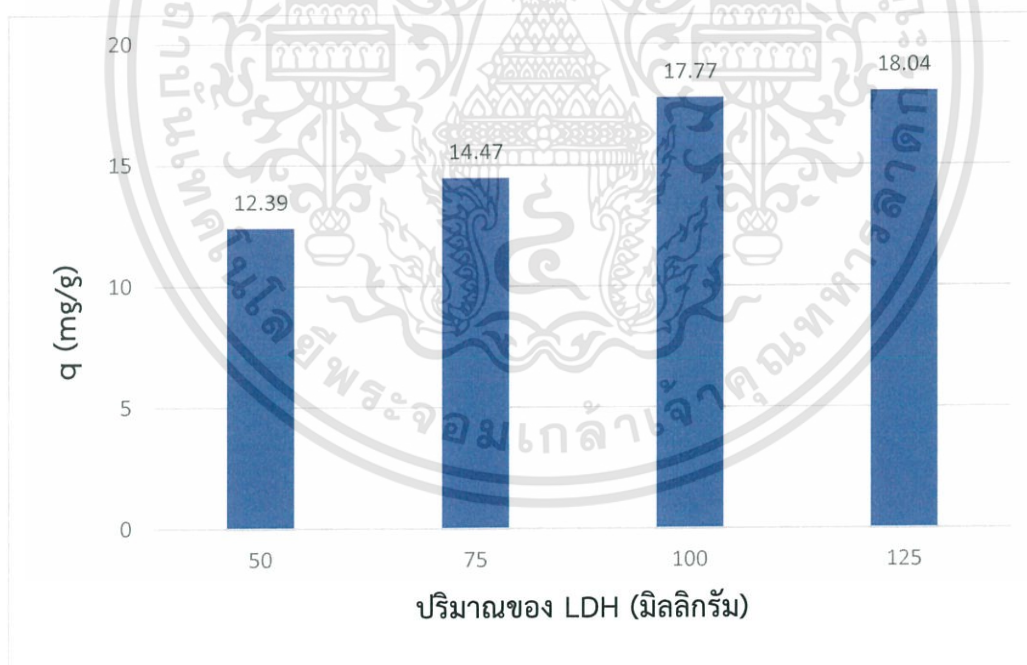
รูปที่ 4.8 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอินดิโก้คาร์มิน (มิลลิกรัม/ลิตร) กับค่าการดูดกลืนแสง

การทดลองเพื่อหาปริมาณและเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับพบว่า เมื่อนำ Cu-Zn-Al (LDH) ปริมาณ 50 75 100 และ 125 มิลลิกรัม ดูดซับอินดิโก้คาร์มิน ที่ความเข้มข้น 125 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูป 4.9 พบว่า ปริมาณของ Cu-Zn-Al (LDH) มีสมมูลการดูดซับอินดิโก้คาร์มินโดยใช้เวลา 30 นาที มีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 15.4951 มิลลิกรัม/กรัม เมื่อลดปริมาณ Cu-Zn-Al เป็น 100 75 และ 50 มิลลิกรัม มีค่าความสามารถในการดูดซับอินดิโก้คาร์มินลดลงเป็น 14.92549 12.756 และ 11.444 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณของ Cu-Zn-Al (LDH) ที่มากขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับอินดิโก้คาร์มิน เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่ม Cu-Zn-Al (LDH) จะทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



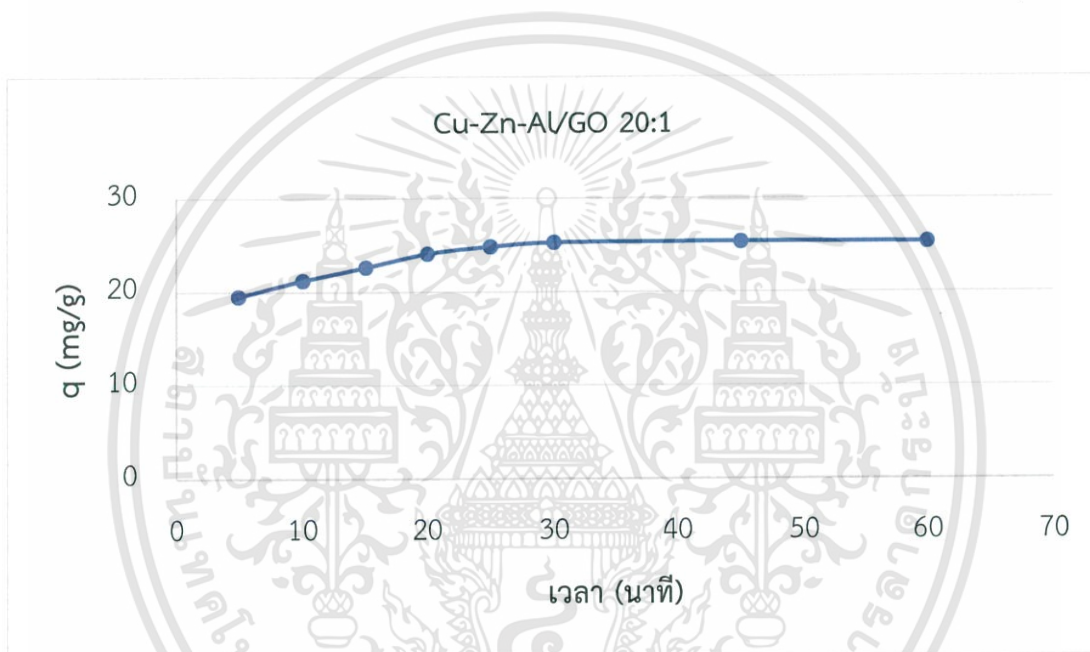
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวดูดซับ Cu-Zn-Al (LDH) ที่ใช้ในปริมาณ 50 75 100 และ 125 มิลลิกรัม



รูปที่ 4.10 กราฟแท่งแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวดูดซับ Cu-Zn-Al (LDH) ที่ปริมาณต่าง ๆ เป็นเวลา 60 นาที

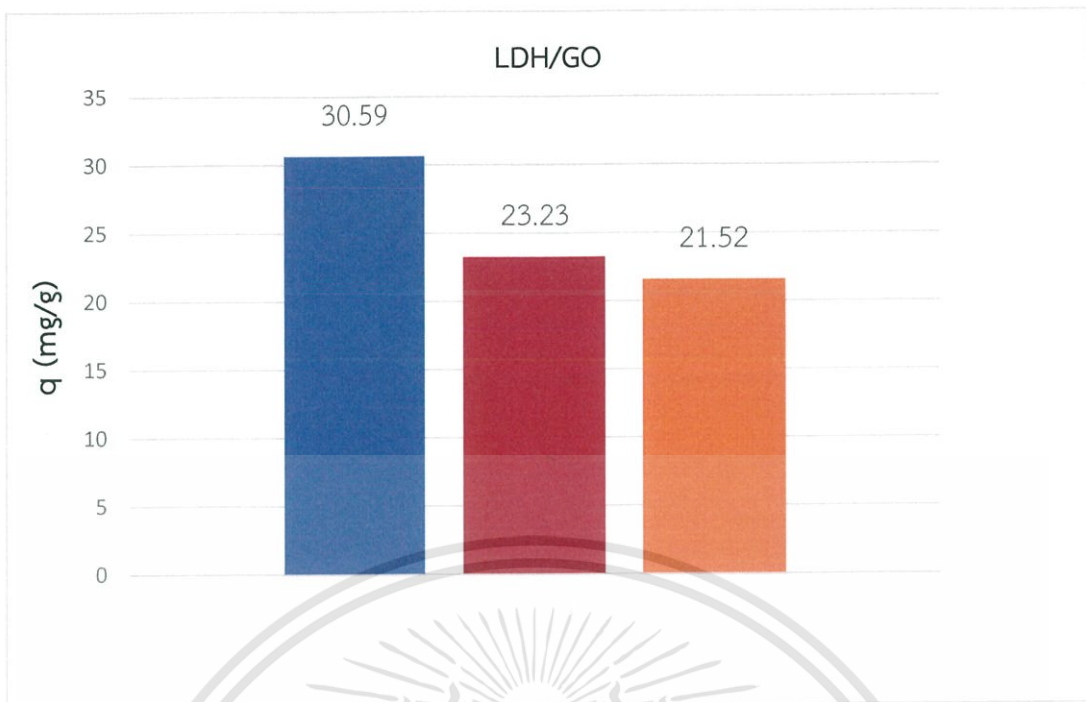
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทดสอบตัวดูดซับ LDH/GO ในอัตราส่วน 20:1 ที่ไม่เผา เพื่อทำการเปรียบเทียบกับตัวดูดซับ Cu-Zn-AI/GO ในอัตราส่วน 10:1 20:1 และ 30:1 ที่เผาแล้ว โดยใช้ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ 45 มิลลิกรัม ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่า สมดุลการดูดซับอินดิโกคาร์มินใช้เวลา 30 นาที ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 25.27451 มิลลิกรัม/กรัม และทำการทดสอบตัวดูดซับ Cu-Zn-AI/GO ในอัตราส่วน 10:1 20:1 และ 30:1 ที่เผาแล้ว โดยกำหนดเวลาที่ 30 นาที พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้คือ 30.59314 23.22794 และ 21.52451 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.11



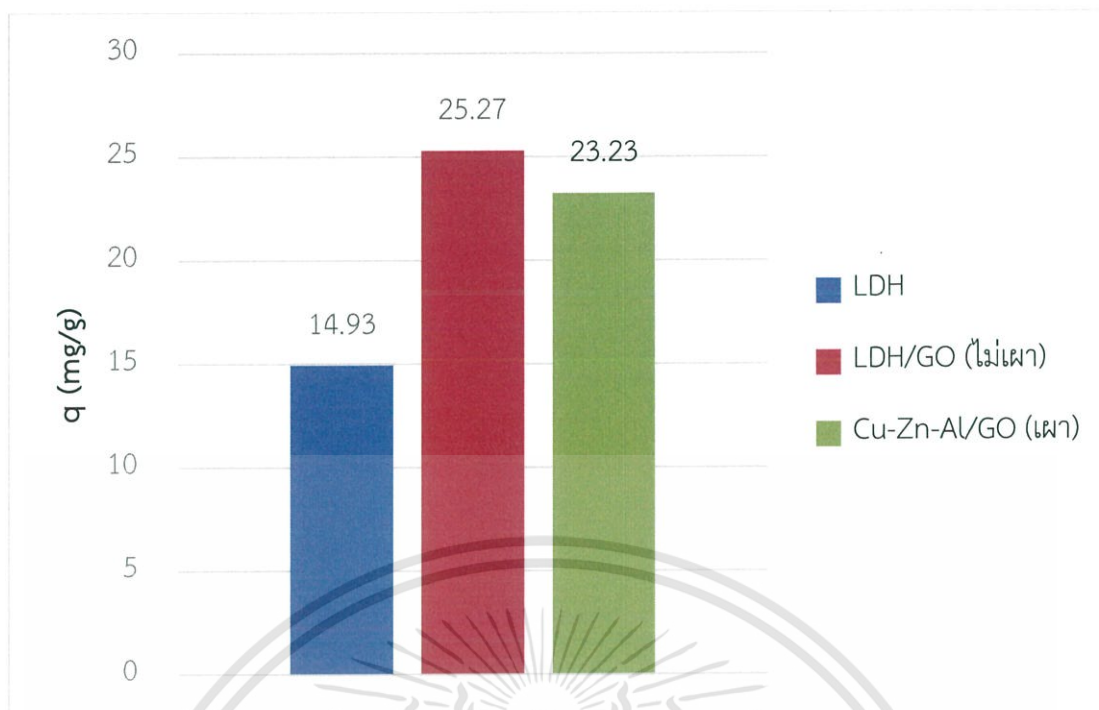
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินโดยใช้ตัวดูดซับ LDH/GO คอมโพสิต ในอัตราส่วน 20:1 ที่ไม่เผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟแท่งแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินโดยใช้ตัวดูดซับ Cu-Zn-Al/GO ในอัตราส่วน 10:1 20:1 และ 30:1 ที่เวลา 30 นาที

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวดูดซับชนิด LDH/GO ในอัตราส่วน 20:1 ที่ไม่เผา กับ ตัวดูดซับชนิด Cu-Zn-Al/GO ในอัตราส่วน 10:1 20:1 และ 30:1 ที่เผาแล้ว โดยเปรียบเทียบที่เวลา 30 นาที พบว่าเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนเดียวกันคือ 20:1 ตัวดูดซับที่ไม่เผาจะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีกว่า



รูปที่ 4.13 กราฟแท่งแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมอินดิโกคาร์มินโดยใช้ตัวดูดซับ LDH, LDH/GO และ Cu-Zn-Al/GO 20:1 ที่เวลา 30 นาที

จากการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโดยใช้ตัวดูดซับ LDH, LDH/GO และ Cu-Zn-Al/GO 20:1 ที่เวลา 30 นาที เมื่อนำผลการทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่างมาเปรียบเทียบกันโดยกราฟแท่งแสดงประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่า LDH/GO 20:1 ไม่เผา มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด เนื่องจากองค์ประกอบและโครงสร้างของตัวดูดซับไม่ได้เสียสภาพหรือถูกทำลายจากการเผา จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีว่า LDH และ Cu-Zn-Al/GO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองในการศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับในการดูดซับอินดิโกคาร์มินและศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับที่ผลิตขึ้นได้ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับโลหะออกไซด์ Cu-Zn-Al พบว่าผลจาก XRD สามารถระบุว่าตัวดูดซับมีความเป็นผลึกแต่เมื่อเติมกราฟีนออกไซด์เข้าไปจึงทำให้ความเป็นผลึกลดลง

5.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับอินดิโกคาร์มิน ได้แก่ ปริมาณที่เหมาะสมของตัวดูดซับ และระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ พบว่าการใช้ Cu-Zn-Al ที่ผสมกับกราฟีนออกไซด์ (Cu-Zn-Al/GO) ในอัตราส่วน 10:1 เป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมต่อการถูกเลือกใช้ เนื่องจากการใช้ปริมาณกราฟีนออกไซด์จำนวนมากเป็นผลให้มีประสิทธิภาพการดูดซับมากขึ้นด้วย และระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับของ Cu-Zn-Al ผสมกราฟีนออกไซด์ พบว่าที่ระยะเวลา 30 นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับอินดิโกคาร์มิน เมื่อใช้ Cu-Zn-Al ผสมกราฟีนออกไซด์เป็นตัวดูดซับ เนื่องจากระยะเวลาดังกล่าวเป็นระยะเวลาที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด และหลังจากผ่านระยะเวลา 30 นาที ไป จะพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับค่อนข้างที่จะคงที่ ดังนั้นการดูดซับอินดิโกคาร์มินด้วย Cu-Zn-Al ผสมกราฟีนออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะต้องใช้อัตราส่วนของ Cu-Zn-Al ผสมกราฟีนออกไซด์ที่ 10:1 และใช้ระยะเวลาการดูดซับที่ 30 นาที เป็นอย่างน้อยที่สุดที่ทำให้การดูดซับเข้าสู่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ เช่น ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ อุณหภูมิของตัวดูดซับ ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ เป็นต้น
2. ทดลองศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับโลหะชนิดอื่นที่ผลิตได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wypch, F. and Satyanarayana, K. G. 2004. "Clay Surface : Fundamentals and application." United State of America : Elsevier Academic Press.
- [2] Carlino, S. 1997. "The intercalation of carboxylic acids into layered double hydroxides : A critical evaluation and review of the different methods." Solid state Ionic 98 (1997) : 73-84.
- [3] He, J. Wei, M. Li, B. Kang, Y. Evans, D.G. and Duan, X. 2005. "Preparation of layered double hydroxides." Structure Bond 119 (2006) : 89-119.
- [4] Li, F. and Duan, X. 2006. "Application of layered double hydroxides." Structure Bond 119 (2006) : 119-223.
- [5] Hoyo, C. D. 2007. "Layered double hydroxides and human health : An overview." Applied Clay Science 36 (2007) : 103-121.
- [6] Newman, S. P. and Jones, W. 1998. "Synthesis, characterization and application of layered double hydroxides containing guest." New Journal of Chemistry (1998) : 105-115.
- [7] H. V. Babu, C. Coluccini, D. Y. Wang. 2017. "8 - Functional layered double hydroxides and their use in fire-retardant polymeric materials." Novel Fire Retardant Polymers and Composite Materials. 201-238.
- [8] MIRIO0921. 2015. Covalent Bond (Summary Part.VI). [online]. เข้าถึงได้จาก : <https://chemju.wordpress.com/2015/08/07/covalent-bond-summary-part-vi/>.
- [9] กรมทรัพยากรธรณี. 2555. งานสำรวจแหล่งวัสดุทางธรณีวิทยาที่ใช้ปรับปรุงพื้นที่ดินเค็มในพื้นที่เลือกสรร. [online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.dmr.go.th/download/Alkaline_soil/53.pdf.
- [10] Radoslaw Debek, Monika Motak, Teresa Grzybek, Maria Elena Galvez and Patrick Da Costa. 2017. "A short review on the catalytic activity of hydrotalcite-derived materials for dry reforming of methane." Journal of Catalysts. 32 : DOI: 10.3390/catal7010032.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] Choy, J.H. and Son and Y. H. 2004. "Intercalation of Vitamer into LDH and Their Controlled Release Properties." Bulletin of the Korean Chemical Society 25 (2004) : 122-126.

[12] Miyata, S. and Kuroda M. 1991. "Method for inhibiting the thermal or ultraviolet degradation of thermoplastic resin and thermoplastic resin composition having stability to thermal or ultraviolet degradation." US patent 4,299,759 (1991).

[13] สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

[14] วีรานุช หลาง, ชมวรรณ เดชมา, วันวิสาข์ บุรณบริรักษ์ และ สาโรจน์ ศิริคันสนียกุล. 2552. "แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับและการคายสารอนินทรีย์ด้วยเส้นใยไรโซวิตที่เจริญและถูกตรึงในเม็ดโคโตะซาน." โครงการจัดตั้งสายวิชาจุลชีววิทยา คณะศิลปะศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[15] วรวิทย์ จันท์สุวรรณ. 2558. "ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายโดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ." งานวิจัยคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

[16] เสาวภา ไวยสุศรี. 2558. "การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่." งานวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

[17] ปรางศิริ ศรีศุภพัชร. 2551. "การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโดยถ่านกัมมันต์และสไลด์จ์ จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเตดสไลด์จ์ที่ย่อยสลายแล้ว." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[18] รัชณี ทรัพย์มากมี. 2548. "การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมละลายน้ำได้ด้วยโคโตะซานชนิดดัดแปร." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[19] สุเมธ เตชะกุลวิโรจน์. 2546. "การใช้เถ้าลอยขานอ้อยมาบำบัดน้ำเสียสีย้อมแล้วนำไปทำคอนกรีตบล็อก." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[20] ณัฐ ดิลกเกียรติ. 2546. “ตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าวหรือกะลาปาล์มเพื่อการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[21] ผศ.ดร. วิชาญ เอียดทอง. 2009. “คราม: สีธรรมชาติจากต้นถั่ว ใช้ย้อมผ้าไหม.” ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[22] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Katsnelson, M. I., Grigorieva, L. V., Dubonos, S. V. and Firsov A. A. 2004. “Electric field effect in atomically thin carbon film.” *Science*. 306, 666.

[23] Cravotto, G. and Cintas P. 2010. “Sonication-assisted fabrication and post-synthetic modifications of graphene-like materials.” *Chem. Eur. J.* 16, 5246.

[24] Velram Balaji Mohan, Reuben Brown, Krishnan Jayaraman, Debes Bhattacharyya. 2015. “Characterisation of reduced graphene oxide: Effects of reduction variables on electrical conductivity.” *Materials Science and Engineering: B*. 193 : 49-60.

[25] โชติมา รัตนศักดิ์ปรากฏ. 2559. “การสังเคราะห์ Cu/Zn/Al โดยใช้คลื่นไมโครเวฟช่วยตกตะกอนร่วมผสมกับ HZSM-5 เจือ Zr เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[26] Ainara Garcia-Gallastegui, Diana Iruretagotena, Veronica Gouvea, Mohamed Mokhtar, Abdullah M. Asiri, Sulaiman N. Basahel, Shaeel A. Al-Thabaiti, Abdulrahman O. Alyoubi, David Chadwick and Milo S. P. Shaffer. 2012. “Graphene oxide as support for layered double hydroxides: Enhancing the CO₂ adsorption capacity.” *Chemistry of Materials*. 24 : 4531-4539.

[27] Muhammad Daud, Muhammad Shahzad Kamal, Farrukh Shehzad and Mamdouh A. Al-Harhi. 2016. “Graphene/layered double hydroxides nanocomposites: A review of recent progress in synthesis and applications.” *Journal of Carbon*. 104 : 241-252.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
[28] นุชนารถ ศิริจัน. 2553. “การสังเคราะห์แมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

สลดแทรกด้วยแอลคอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบส.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[29] Lei Zhang, Junxin Liu and Xuesong Guo. 2017. “Investigation on mechanism of phosphate removal on carbonized sludge adsorbent.” *Journal of Environmental Sciences*. 64 : 335-344.

[30] Zhong Li, Shaowei Yan and Hui Fan. 2013. “Enhancement of stability and activity of Cu/ZnO/Al₂O₃ catalysts by microwave irradiation for liquid phase methanol synthesis.” *Fuel*. 106 : 178-186.

[31] Y. Fernandez, J.A. Menendez, A. Arenillas, E. Fuente, J.H. Peng, Z.B. Zhang, W. Li and Z.Y. Zhang. 2009. “Microwave-assisted synthesis of CuO/ZnO and CuO/ZnO/Al₂O₃ precursors using urea hydrolysis.” *Solid State Ionics*. 180 : 1372-1378.

[32] Yu Xin Zhang, Ming Huang, Fei Li and Zhong Quan Wen. 2013. “Controlled Synthesis of Hierarchical CuO Nanostructures for Electrochemical Capacitor Electrodes.” *International Journal of Electrochemical Science*. 8 : 8645-8661.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

1. วิธีการคำนวณการเตรียมตัวดูดซับออกไซด์

ทำการตกตะกอนตัวดูดซับออกไซด์ ผสมคอปเปอร์ไนเตรต ซิงค์ไนเตรต และอะลูมิเนียมไนเตรตในอัตราส่วน 6:3:1 โดยโมล โดยใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวช่วยตกตะกอน ดังปฏิกิริยา



การคำนวณน้ำหนักสารตั้งต้น

มวลโมเลกุลของคอปเปอร์ไนเตรตไตรไฮเดรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)	241.63 g/mol.
มวลโมเลกุลของซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	297.55 g/mol.
มวลโมเลกุลของอะลูมิเนียมไนเตรตโนนะไฮเดรต ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)	375.19 g/mol.
มวลโมเลกุลของโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)	105.99 g/mol.
มวลโมเลกุลของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)	79.55 g/mol.
มวลโมเลกุลของซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	81.41 g/mol.
มวลโมเลกุลของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	101.96 g/mol.

ตัวดูดซับออกไซด์ Cu/Zn/Al ในอัตราส่วน 6:3:1 โดยโมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การคำนวณน้ำหนักคอปเปอร์ไนเตรตไตรไฮเดรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้น

ธาตุ Cu ที่ต้องการ 6 g จากธาตุองค์ประกอบทั้งหมด

$$\frac{x}{63.55} = \frac{6}{155.94}$$

$$x = 2.4452 \text{ g}$$

คิดเป็นโมล $\text{mol Cu} = \frac{2.4452}{63.55}$

$$\text{mol Cu} = 0.0385 \text{ mol}$$

คำนวณหาปริมาณ CuO จาก Cu

$$0.0385 = \frac{g}{79.55}$$

$$g = 3.0627 \text{ g}$$

คำนวณหาปริมาณ $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ จาก CuO

$$\frac{3.0627}{79.55} = \frac{g}{241.63}$$

$$g = 9.3028 \text{ g}$$

เพราะฉะนั้นต้องชั่ง $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 9.3028 g

2) การคำนวณน้ำหนักซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้น

ธาตุ Zn ที่ต้องการ 3 g จากธาตุองค์ประกอบทั้งหมด

$$\frac{x}{65.41} = \frac{3}{155.94}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{คิดเป็นโมล} \quad \text{mol Zn} = \frac{1.2584}{65.41}$$

$$\text{mol Zn} = 0.0192 \text{ mol}$$

คำนวณหาปริมาณ ZnO จาก Zn

$$0.0192 = \frac{g}{81.41}$$

$$g = 1.5631 \text{ g}$$

คำนวณหาปริมาณ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ จาก ZnO

$$\frac{1.5631}{81.41} = \frac{g}{297.55}$$

$$g = 5.7663 \text{ g}$$

เพราะฉะนั้นต้องชั่ง $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 5.7663 g

3) การคำนวณน้ำหนักอะลูมิเนียมไนเตรตโนนไฮเดรต ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้น

ธาตุ Al ที่ต้องการ 1 g จากธาตุองค์ประกอบทั้งหมด

$$\frac{x}{26.98} = \frac{1}{155.94}$$

$$x = 0.1730 \text{ g}$$

$$\text{คิดเป็นโมล} \quad \text{mol Al} = \frac{0.1730}{26.98}$$

$$\text{mol Al} = 0.0064 \text{ mol}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ชมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
คำนวณหาปริมาณ Al_2O_3 จาก Al
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0.0064 = \frac{g}{101.96}$$

$$g = 0.6525 \text{ g}$$

คำนวณหาปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ จาก Al_2O_3

$$\frac{0.6525}{101.96} = \frac{2g}{375.19}$$

$$g = 1.2005 \text{ g}$$

เพราะฉะนั้นต้องชั่ง $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 1.2005 g

4) เตรียมสารละลาย Na_2CO_3 ในน้ำ 250 ml

โมลของโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ในปฏิกิริยา = โมลของคอปเปอร์ไนเตรด
+ โมลของซิงค์ไนเตรด
+ โมลของอะลูมิเนียมไนเตรด

$$\begin{aligned} \text{Mol Na}_2\text{CO}_3 &= 0.0385 + 0.01921 + 0.0064 \\ &= 0.0641 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณโซเดียมคาร์บอเนต Mol Na}_2\text{CO}_3 = 0.0641 \text{ mol} = \frac{g}{105.99}$$

$$g = 6.7940 \text{ g}$$

เพราะฉะนั้นต้องชั่งโซเดียมคาร์บอเนต 6.7940 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้