

การดูดซับไอออนทองจากสารละลายโดยใช้วัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจีเนต



ปริญญานิพนธ์
ของ
อนุวัติ เหมะพิชัย

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

กรกฎาคม 2561

การดูดซับไอออนทองจากสารละลายโดยใช้วัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจีเนต



ปริญญานิพนธ์
ของ
อนุวัติ เหมะพิชัย

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

กรกฎาคม 2561

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การดูดซับไอออนทองจากสารละลายโดยใช้วัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจีเนต



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์

กรกฎาคม 2561

อนุวัติ เหมะพิชัย. (2561). การดูดซับไอออนทองจากสารละลายโดยใช้วัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต วท.ม. (วัสดุศาสตร์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วลัยกร นิตยพัฒน์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ถนัด จินตโกศล.

ในการศึกษาการนำเกลือคอปเปอร์นารีแอมโมเนียมมาใช้ในการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ วิเคราะห์ผลได้จากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ซึ่งผลการทดลองแสดงค่าตำแหน่งระยะห่างระหว่างระนาบ d_{001} เคลื่อนจาก 14.77 อังสตรอม (มอนต์มอริลโลไนต์) เพิ่มขึ้นเป็น 18.24 อังสตรอม (มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร) โดยนำมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรมาขึ้นรูปเป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ที่ใช้ความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถนำมาดูดซับไอออนทองได้ ผลการทดลองพบว่าการดูดซับไอออนทองโดยใช้วัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต มีประสิทธิภาพในช่วงเวลาที่สมดุล 90 นาที ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด 6 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของมอนต์มอริลโลไนต์ของเม็ดวัสดุเชิงประกอบ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง การดูดซับไอออนทองจากสารละลายสูงสุดคือ 3 ปริมาณสารดูดซับมีค่าสูงสุดคือ 5 กรัม สมดุลในการดูดซับที่นำมาใช้อย่างเหมาะสมสอดคล้องกับทฤษฎีไอโซเทิร์มได้แก่มากแลงเมียร์ ไอโซเทิร์มและฟรุนดลิชไอโซเทิร์ม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับไอออนทองเป็นกระบวนการดูดซับชั้นเดียวและหลายชั้น โดยความสามารถในการดูดซับสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต เท่ากับ 1.49 มิลลิกรัม/กรัม การศึกษาจลนศาสตร์ในการดูดซับสามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมากกว่าสมการปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง และการคายซับของทองในสารละลายเกิดขึ้นที่ความเป็นกรด-ด่าง 3 ที่ 18.6% ในการศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตสามารถกำจัดไอออนทองออกจากสารละลายในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ADSORPTION OF GOLD ION FROM A SOLUTION USING
MONTMORILLONITE/ALGINATE COMPOSITE

AN ARSTRACT

BY

ANUWATI MOURPICHAI

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Science Degree in Material Science
at Srinakharinwirot University

July 2018

Anuwati Mourpichai (2018). *Adsorption of gold ion from a solution using montmorillonite/alginate composite*. Master Thesis, M.Sc. (Material Science).

Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Associate Professor Dr. Walaikorn Nitayaphat, Associate Professor Dr. Thanut Jintakasol.

In this study, quaternary ammonium salt was added to enhance the layer intercalation of the montmorillonite. The modified montmorillonite was characterized by X-ray diffraction (XRD). The shifting of the d_{001} spacing from 14.77 Å (natural sample) increased shift to 18.24 Å (modified sample). The modified montmorillonite was then used to prepare a montmorillonite/alginate composite with a different concentration of montmorillonite in beads, which were evaluated as an adsorption of the gold ion. The results revealed that the adsorption of the gold ion by a montmorillonite/alginate composite was efficient in an equilibrium time of 90 min. The composite adsorbent had the highest adsorption efficiency with 6 percent of the weight of the montmorillonite in the composite. The maximum pH value of the adsorption of the gold solution was 3. The optimum adsorbent dosage was 5 g. The equilibrium data were fit satisfactorily with the Langmuir isotherm and Freundlich isotherm models, which suggested that gold ion adsorption is a monolayer and multi-layer adsorption process. The maximum adsorption capacity of montmorillonite/alginate composite was found to be 1.49 mg/g. The adsorption kinetics study was well described by the pseudo first order model fit the gold ion adsorption data better than the pseudo second order model. The gold solution desorption that occurred at pH 3 was 18.6%. This study indicated that the montmorillonite/alginate composite could more efficiently remove gold ion from an aqueous solution.

ประกาศคุณูปการ

ในการจัดหาปริญญาบัตรฉบับนี้ได้สำเร็จลงด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วลัยกร นิตยพัฒน์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ถนัด จินตโกศล ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ในการแก้ปัญหาและข้อบกพร่องต่าง ๆ และยังช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการทำวิจัยด้วยความเอาใจใส่อย่างสูง ผู้วิจัยซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะพร คามภิรภาพพันธ์ และอาจารย์ ดร.ปณิธาน วนาภมล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นคณะกรรมการในการสอบปากเปล่า (ปริญญาบัตร) รวมทั้งคำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติมทำให้ปริญญาบัตรฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

กราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษาและ ประสิทธิ์ประสาทวิชาตลอดระยะเวลาของการศึกษา จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการทำ ปริญญาบัตรจนสำเร็จ

ขอขอบคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ เพื่อน นิสิตปริญญาโท ที่ได้คอยช่วยเหลือแนะนำอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยและขอขอบคุณที่คอยช่วยเหลือและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ช่วยอำนวยความสะดวกและเป็นกำลังใจในการทำงานตลอดมา

ท้ายที่สุดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของผู้วิจัยที่ส่งเสริมและ สนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง อีกทั้งยังให้ความรักและปรารถนาดีพร้อมทั้งเป็นกำลังใจให้เสมอมา

อนวัติ เหมาะะพิชัย

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
การดูดซับไอออนทองจากสารละลายโดยใช้วัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจีเนต
ของ
อนุวัติ เหมาะะพิชัย

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ที่ปรึกษาหลักประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วลัยกร นิตยพัฒน์) (รองศาสตราจารย์ ดร. ปิยะพร คามภิรภาพพันธ์)

.....ที่ปรึกษาร่วมกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ถนัด จินตโกศล) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วลัยกร นิตยพัฒน์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ถนัด จินตโกศล)

.....กรรมการ
(ดร. ปณิธาน วนากมล)

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
วัตถุประสงค์	3
ขอบเขตของงานวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)	6
โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite structure)	6
ส่วนประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ (Cheical composition of montmorillonite)	7
การดัดแปรแรมมอนต์มอริลโลไนต์ (Modified montmorillonite)	8
ประโยชน์ของแรมมอนต์มอริลโลไนต์ (Advantage of montmorillonite)	10
แอลจีเนต (Alginate)	11
การเกิดเจลของแอลจีเนต (Gelation process of alginate)	12
ประโยชน์ของแอลจีเนต (Advantage of alginate)	13
วัสดุเชิงประกอบ (Composite materials)	13
ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ (Category of composite materials)	13
การประยุกต์ใช้วัสดุเชิงประกอบ (Application of composite materials)	18
อุตสาหกรรมชุบโลหะ (Metal finishing industry)	18
ประเภทอุตสาหกรรมชุบโลหะ (Category of industrial plating)	19
มลพิษและผลกระทบจากอุตสาหกรรม (Pollution and effect of industrial)	24
ทองคำ (Gold)	25
ลักษณะสมบัติเฉพาะของทองคำ (Specific properties of gold)	26
การเกิดแร่ทองคำ (Mineral formation of gold)	27
การใช้ประโยชน์ทองคำในอุตสาหกรรม (Application of gold)	27
การดูดซับ (Adsorption)	28
กลไกการดูดซับ (Mechanism of adsorption)	30
ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (Effective factors of adsorption)	30
สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)	32

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2 (ต่อ)	
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Instrument).....	37
เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer)...	37
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope).....	43
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer).....	44
เครื่องวัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential).....	46
เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review).....	47
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	51
สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	51
อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	52
เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	52
เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	52
ตัวแปรที่ศึกษา.....	52
วิธีดำเนินงานวิจัย.....	55
4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล.....	64
การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์.....	64
ผลวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD).....	64
การวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของ เม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต.....	65
การวิเคราะห์ความเป็นประจุบนพื้นผิวเม็ดวัสดุแอลจิเนตและ เม็ดเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต.....	66
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับของเม็ดวัสดุเชิงประกอบ มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง.....	68
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอัตราส่วนและเวลาต่อความสามารถใน การดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง.....	68
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อความสามารถ ในการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง.....	69

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 (ต่อ)	
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบ	
มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทองต่อความสามารถในการดูดซับ.....	71
การวิเคราะห์ไอโซเทิร์มการดูดซับ (Isotherm adsorption) เม็ดวัสดุเชิงประกอบ	
มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง.....	73
การวิเคราะห์จลนศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic adsorption)	
เม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง.....	76
การวิเคราะห์การคายซับของการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบ	
มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง.....	79
การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของมอนต์มอริลโลไนต์.....	81
ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดวัสดุเชิงประกอบ	
มอนต์มอริลโลไนต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM).....	81
5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	84
การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์.....	84
ผลวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์	
ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD).....	84
การวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของ	
เม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต.....	84
การวิเคราะห์ความเป็นประจุบนพื้นผิวเม็ดวัสดุแอลจิเนตและ	
เม็ดเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต.....	85
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับของเม็ดวัสดุเชิงประกอบ	
มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง.....	85
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอัตราส่วนและเวลาต่อความสามารถใน	
การดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง.....	85
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อความ	
สามารถในการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต	
ในสารละลายทอง.....	85

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 (ต่อ)	
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบ	
มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทองต่อความสามารถในการดูดซับ.....	85
การวิเคราะห์ไอโซเทิร์มการดูดซับ (Isotherm adsorption) เม็ดวัสดุเชิงประกอบ	
มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง.....	86
การวิเคราะห์จลนศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic adsorption) เม็ดวัสดุเชิงประกอบ	
มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง.....	86
การวิเคราะห์การคายซับของการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบ	
มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง.....	86
การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของมอนต์มอริลโลไนต์.....	86
ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดวัสดุเชิงประกอบ	86
มอนต์มอริลโลไนต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	
(Scanning electron microscope: SEM).....	86
ข้อเสนอแนะ.....	87

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ตัวอย่างของโลหะที่ใช้เคลือบชิ้นงานด้วยวิธีการชุบไฟฟ้า (Electroplating).....	21
1 (ต่อ) ตัวอย่างของโลหะที่ใช้เคลือบชิ้นงานด้วยวิธีการชุบไฟฟ้า (Electroplating).....	22
2 การเปรียบเทียบการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี.....	30
3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของ เม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจีเนต.....	66
4 ไอโซเทิร์มของการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจีเนต.....	74
5 จลนศาสตร์ของการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจีเนต.....	76
6 การคายซับของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจีเนต ความเข้มข้น 6% (w/v) ความเข้มข้นของทอง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลา 90 นาที.....	79

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 โครงสร้างเคมีของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite).....	7
2 โครงสร้างอนุภาคของแร่มอนต์มอริลโลไนต์.....	7
3 อนุภาคของโซเดียมไอออน (Na-ion).....	8
4 แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตที่ยึดแผ่นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	9
5 การดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	9
6 ชนิดของวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์.....	10
7 ส่วนประกอบของแอลจีเนต.....	11
8 กลไกการเกิดเจลของแคลเซียมแอลจีเนตแบบ Egg-box model.....	12
9 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์ และลักษณะของสารเสริมแรง.....	14
10 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์.....	15
11 ภาพรวมอุตสาหกรรมชุบโลหะ.....	19
12 การชุบทองแดงโดยใช้น้ำยาชุบคอปเปอร์ซัลเฟต.....	20
13 การชุบโลหะ.....	24
14 การดูดซับระหว่างของแข็งกับของเหลว.....	28
15 ลักษณะกราฟของแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม (Langmuir adsorption isotherm).....	33
16 ลักษณะกราฟของฟรุนดลิชไอโซเทิร์ม (Freundlich adsorption isotherm).....	34
17 ลักษณะกราฟของ ปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order).....	35
18 ลักษณะกราฟของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo-second order).....	36
19 ระดับของพลังงานของอะตอมโซเดียม.....	38
20 แผนภาพองค์ประกอบของเครื่องอะตอมมิคแอนาไลเซอร์สเปกโตรมิเตอร์.....	39
21 Flame atomization process กระบวนการทั้งห้า.....	40
22 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	44
23 เครื่องดีฟแฟรกโทมิเตอร์ตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	45
24 ลักษณะการทำงานของดีฟแฟรกโทมิเตอร์.....	46
25 ภาพสัญญาณการสะท้อนของความเข้มของรังสีจากตัวอย่างของผงทองคำ.....	46
26 เครื่องวัดความต่างศักย์บนผิวอนุภาค (Zetasizer).....	47
27 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	54
28 ผลวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction.....	64

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
29 ค่าศักย์ซีต้าของมอนต์มอริลโลไนต์ เม็ดวัสดุแอลจิเนต และเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต 1% (w/v).....	67
30 การดูดซับเม็ดวัสดุแอลจิเนตและเม็ดวัสดุเชิงประกอบ มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตต่อเวลาในสารละลายทอง (ความเข้มข้นของทอง: 10 มิลลิกรัมต่อลิตร, ความเข้มข้นของ มอนต์มอริลโลไนต์: 6% (w/v), เวลา : 90 นาที, ปริมาตรสารละลาย: 50 มิลลิลิตร).....	69
31 ภาพประกอบที่ 31 การดูดซับของเม็ดวัสดุเชิงประกอบ มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในสารละลายทอง (ความเข้มข้นของทอง: 10 มิลลิกรัมต่อลิตร, ความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์: 6% (w/v), เวลา: 90 นาที, ปริมาตรสารละลาย: 50 มิลลิลิตร).....	71
32 การดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ต่อปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ในสารละลายทอง (ความเข้มข้นของทอง: 10 มิลลิกรัมต่อลิตร, ความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์: 6% (w/v), ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 3, เวลา: 90 นาที, ปริมาตรสารละลาย: 50 มิลลิลิตร).....	72
33 การดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ต่อเวลาคงที่(a) แลงเมียร์ไอโซเทิร์ม (Langmuir adsorption isotherm) (b) และฟรุนดลิชไอโซเทิร์ม (Freundlich adsorption isotherm) (ความเข้มข้น 6% (w/v) มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต).....	75
34 จลนศาสตร์ของการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบ มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต (a) ปฏิกริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) (b) ปฏิกริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo-second-order).....	77
35 การคายซับของการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบ มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต (ความเข้มข้นของทอง: 10 มิลลิกรัมต่อลิตร, ความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์: 6 % (w/v), เวลา: 90 นาที, ปริมาตรสารละลาย: 50 มิลลิลิตร).....	78

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

36 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

(a - c); เม็ดวัสดุแอลจินेट (d - f); เม็ดวัสดุเซิงประกอบ

มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจินेटที่ยังไม่ผ่านกระบวนการดูดซับ

(g - i); เม็ดวัสดุเซิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจินेट

ที่ผ่านกระบวนการดูดซับ..... 82

37 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

เทคนิค Energy Dispersive X-ray: EDX ของเม็ดวัสดุเซิงประกอบ

มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจินेटที่ผ่านกระบวนการดูดซับ..... 83



บทที่ 1

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันอัญมณีและเครื่องประดับในประเทศไทยได้มีการพัฒนาอุตสาหกรรมเรื่อยมาจนสามารถสร้างความน่าเชื่อถือให้กับหลายประเทศอื่น ๆ ทั่วโลก ด้วยการเป็นศูนย์กลางเจียระไนพลอยและเครื่องประดับด้วยมือ โดยอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับมีอยู่หลายส่วนแตกต่างกันออกไป เพื่อให้สะดวกต่อกระบวนการผลิตและตามความต้องการของผู้ผลิตหรือผู้บริโภค เพื่อประดับตกแต่งร่างกายหรือตกแต่งสถานที่ให้มีระดับฐานะ หรือบางส่วนที่ใช้เพื่อเป็นเครื่องรางยึดเหนี่ยวจิตใจ แต่เนื่องจากยุคสมัยมีการเปลี่ยนไป จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบเครื่องประดับให้มีความสวยงามมากยิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มมูลค่าและความสวยงามตามรูปแบบยุคสมัยที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งวัตถุดิบบางชนิดที่นำมาใช้เพื่อเป็นเครื่องประดับ มีน้อยหรือหายาก ทำให้ผู้ผลิตในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับได้นำกระบวนการชนิดหนึ่งที่สามารถใช้วัสดุแทนได้ โดยที่วัสดุนั้นยังมีมูลค่าและประหยัดต้นทุนการผลิต ซึ่งกระบวนการนั้นคือการชุบโลหะ สามารถใช้วัตถุดิบที่เป็นโลหะมีค่าที่มีสมบัติช่วยเคลือบพื้นผิวของวัสดุให้ดียิ่งขึ้น การเลือกใช้วัตถุดิบนั้นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ความต้องการของแต่ละบุคคลที่นำมาใช้สอย ซึ่งโลหะทุกชนิดที่นำมาสู่กระบวนการชุบโลหะส่วนมากเป็นโลหะที่มีค่า เช่น ทองเหลือง ทองแดง เงิน ทองขาวหรือทองคำ เป็นต้น

น้ำยาชุบโลหะแต่ละชนิดเมื่อผ่านการใช้งานจะทำให้คุณภาพของน้ำยาชุบโลหะเสื่อมสภาพลงและจำเป็นต้องทิ้งน้ำยาชุบโลหะ ซึ่งน้ำยาชุบโลหะเหล่านี้มีโลหะมีค่าเป็นปัจจัยหลักในสารละลาย เมื่อทิ้งสารละลายเหล่านั้นทำให้เกิดผลเสียต่อสภาพแวดล้อมและระบบนิเวศเป็นอย่างมาก จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจคือการนำโลหะมีค่าที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยการนำโลหะมีค่ากลับมาใช้ประโยชน์ใหม่นั้น มีวิธีการที่ยุ่งยากและซับซ้อน มีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง ซึ่งวิธีการนำโลหะมีค่าออกจากน้ำยาชุบโลหะนั้นมีหลายวิธี ซึ่งมีทั้งทางกายภาพ ได้แก่ การกรอง (Filtration) การดูดซับ (Adsorption) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เป็นต้น ทางเคมี ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (Precipitation) กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) กระบวนการรีดักชัน (Reduction) เป็นต้น และทางชีวภาพ ได้แก่ การย่อยสลายโดยใช้จุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจน (Biodegradation) เป็นต้น ซึ่งวิธีทางกายภาพด้วยกระบวนการดูดซับเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางวิธีหนึ่ง เนื่องจากเป็นกระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีประสิทธิภาพ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยตัวดูดซับ (Adsorbent) ที่นำมาใช้กันในปัจจุบันมีอยู่หลากหลายชนิด เช่น ผงถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)⁽¹⁾ ซิลิกาเจล (Silica gel)⁽²⁾ ซีโอไลต์ (Zeolite)⁽³⁾ แกลบ (Rice husk)⁽⁴⁾ ไคติน (Chitin)⁽⁵⁾ ไคโตซาน (Chitosan)⁽⁶⁾ และมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)⁽⁷⁾ เป็นต้น

มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) เป็นแร่ดินเหนียวชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นซ้อนทับกัน โครงสร้างของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ หรือ Trioctahedral ประกอบด้วย 2 Tetrahedral sheet กับ Octahedral sheet อยู่ตรงกลาง T-O-T ซึ่งก็เป็นโครงสร้างพื้นฐานของ Pyrophyllite ด้วย แต่ละชั้นจะมีความบางมาก ซึ่งจะมีความหนาน้อยกว่าระดับนาโนเมตร มีสัดส่วนความยาวต่อความหนา (Aspect ratio) สูง ซึ่งเหมาะสำหรับนำมาใช้เสริมแรงวัสดุพอลิเมอร์อย่างมาก ระหว่างชั้นจะมีช่องว่างขนาดเล็กเรียกว่า แกลเลอรี (Gallery) พื้นผิวของชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate) ของมอนต์มอริลโลไนต์จะมีประจุลบและในแต่ละชั้นสามารถยึดเกาะกันด้วยประจุบวก เช่น โซเดียมไอออน (Na^+) หรือแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เป็นต้น ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาและเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) โดยสารอินทรีย์ที่มีประจุบวก (Organic cation) เช่น เกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium salt) หรือเกลือฟอสโฟเนียม (Phosphonium salt) ซึ่งสามารถเข้าไปแทนที่ประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นผลึก โดยมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเรียกว่า ออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) มีลักษณะเด่น คือ มีความชอบสารอินทรีย์อยู่ด้านในระหว่างชั้นซิลิเกตและเกิดการขยายตัวของระยะห่างระหว่างชั้นผลึกมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่มีพื้นที่ผิวสูงมาก มีงานวิจัยพบว่ามอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสามารถดูดซับโลหะมีค่าได้หลายชนิด เช่น แคดเมียม (Cd^{2+})⁽⁸⁾ โครเมียม (Cr^{6+})⁽⁹⁾ ซีเซียม (Cs^+)⁽¹⁰⁾ และทองแดง (Cu^{2+})⁽¹¹⁻¹²⁾ เป็นต้น แต่เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์มีลักษณะที่เป็นผงละเอียดและเมื่อนำมาผ่านกระบวนการดูดซับจะยากต่อการแยกออกจากสารละลาย จึงเป็นข้อจำกัดในการนำมอนต์มอริลโลไนต์ไปใช้ในการดูดซับโลหะที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้

แอลจิเนตเป็นไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ที่สกัดได้จากผนังเซลล์ของสาหร่ายสีน้ำตาล (Brown algae) เช่น *Macrocystis pyrifera*, *Laminaria digitata*, *Laminaria hyperborea* เป็นต้น และผ่านการทำให้แห้งมีลักษณะเป็นผง แอลจิเนตถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด โดยเติมในอาหารกระป๋อง บางชนิดใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด สารเพิ่มความคงตัวทำให้มีลักษณะคงตัว และสารยับยั้งการเกิด Syneresis นอกจากนี้ยังสามารถเป็นสารก่อเจล (Gelling agent) ซึ่งเป็นเจลที่ทนต่อความร้อน (Thermo irreversible gel) หรือสามารถเปลี่ยนไป-มา เมื่อได้รับความร้อน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการแยกชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ให้เป็นออร์กาโนเคลย์ โดยใช้เกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียม แล้วจึงนำออร์กาโนเคลย์ดัดแปรที่ได้ผสมกับแอลจิเนตเพื่อขึ้นรูปให้เป็นวัสดุเชิงประกอบสำหรับเป็นตัวดูดซับโลหะทอง โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผสมกับแอลจิเนต ความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับ เวลาในการดูดซับ ปริมาณของตัวดูดซับ ไอโซเทิร์มของกระบวนการดูดซับ จลนศาสตร์ของการดูดซับ และกระบวนการคายซับของเม็ดวัสดุเชิงประกอบ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมและศึกษาการแยกชั้นของโครงสร้างผลึกมอนต์มอริลโลไนต์
2. เพื่อศึกษาการเตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต สำหรับเป็นตัวดูดซับโลหะทองจากสารละลาย
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการใช้เม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ที่ดูดซับโลหะทองจากสารละลาย

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียม และศึกษาการแยกชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์
2. ศึกษาการเตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ด้วยกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีเกิดเจล
3. ศึกษาการนำเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ไปใช้เป็นตัวดูดซับโลหะทองจากสารละลาย ได้แก่ เวลาของการดูดซับ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายของปริมาณของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต
4. ศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับ, จลนศาสตร์การดูดซับ และการคายซับจากเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตจากสารละลายทอง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ใช้ดูดซับโลหะทองจากกระบวนการชุบโลหะในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ส่วนนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานวิจัยตามหัวข้อต่อไปนี้

2.1 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

2.1.1 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite structure)

2.1.2 ส่วนประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ (Chemical composition of montmorillonite)

2.1.3 การดัดแปรแรมมอนต์มอริลโลไนต์ (Modified montmorillonite)

2.1.4 ประโยชน์ของแรมมอนต์มอริลโลไนต์ (Advantage of montmorillonite)

2.2 แอลจีเนต (Alginate)

2.2.1 การเกิดเจลของแอลจีเนต (Gelation process of alginate)

2.2.2 ประโยชน์ของแอลจีเนต (Advantage of alginate)

2.3 วัสดุเชิงประกอบ (Composite materials)

2.3.1 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ (Category of composite materials)

2.3.2 การประยุกต์ใช้วัสดุเชิงประกอบ (Application of composite materials)

2.4 อุตสาหกรรมการชุบโลหะ (Metal finishing industry)

2.4.1 ประเภทอุตสาหกรรมชุบโลหะ (Category of industrial plating)

2.4.2 มลพิษและผลกระทบจากอุตสาหกรรม (Pollution and effect of industrial)

2.5 ทองคำ (Gold)

2.5.1 ลักษณะสมบัติเฉพาะของทองคำ (Specific properties of gold)

2.5.2 การเกิดแร่ทองคำ (Mineral formation of gold)

2.5.3 การใช้ประโยชน์ทองคำในอุตสาหกรรม (Application of gold)

2.6 การดูดซับ (Adsorption)

2.6.1 กลไกการดูดซับ (Mechanism of adsorption)

2.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (Effective factors of adsorption)

2.6.3 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

2.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Instrument)

2.7.1 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer)

2.7.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

2.7.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer)

2.7.4 เครื่องวัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential)

2.8 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

2.1 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

แรมมอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินเหนียว (Clay mineral) ชนิดหนึ่ง ซึ่งจัดเป็นแร่ทุติยภูมิที่เกิดจากการผุพังของหิน มีสูตรเคมี คือ $(OH)_4Al_4Si_8O_{20} \cdot nH_2O$ โครงสร้างของแรมมอนต์มอริลโลไนต์ประกอบด้วยแอนไฮดรอะลูมิเนียมซิลิเกต (Hydrous aluminum silicates) การจับตัวระหว่างแผ่นค่อนข้างหลวม ทำให้เป็นแร่ธาตุที่ไม่อยู่ตัวโดยเฉพาะเมื่อเปียกโดยมีลักษณะดูดซับน้ำได้มาก หลังจากนั้นจะบวมตัว (Swell) ขยายตัว (Expansion) สูง ในทางตรงกันข้าม เมื่อแห้งจะหดตัวมาก ซึ่งจะเห็นรอยแตกแยกได้ชัดเจน และมีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน ทำให้แรมมอนต์มอริลโลไนต์มีพื้นที่ผิวมาก จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรง มีการนำมาใช้ในงานด้านวิศวกรรม เช่น ผสมน้ำแล้วนำไปอัดในชั้นดินใต้ฐานเขื่อนให้ทับน้ำ นำมาผสมน้ำให้เป็นน้ำโคลนเจาะดิน เจาะบ่อบาดาล เจาะบ่อน้ำมัน เจาะเสาเข็ม เป็นต้น

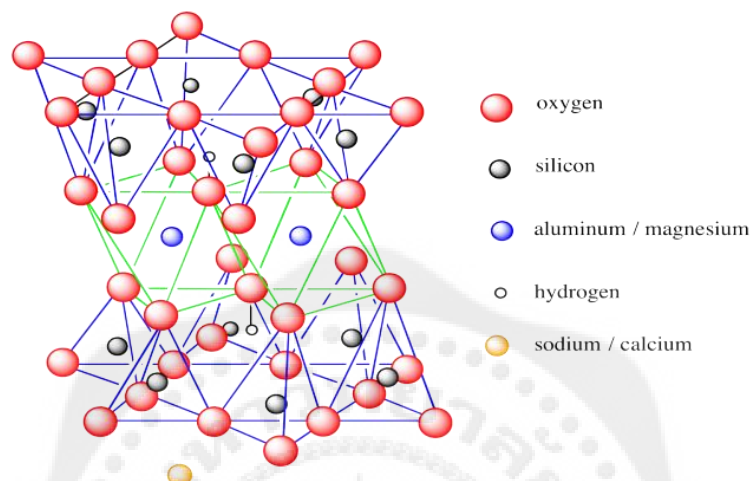
แรมมอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ที่มีโครงสร้างพิเศษแตกต่างจากแร่อื่น ๆ คือ จะมีโครงสร้างเป็นชั้น ๆ ซ้อนกัน คือ ชั้นของแผ่นอะลูมินาและชั้นของแผ่นซิลิกา ซึ่งซ้อนทับกันคล้ายแซนวิช โดยชั้นที่อยู่ตรงกลางเป็นชั้นของแผ่นอะลูมินาที่ประกบบนและล่างด้วยชั้นของแผ่นซิลิกา เรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า 2:1 Phyllosilicate และในระหว่างแผ่นนี้จะมีไอออนบวกของธาตุโลหะ เช่น โซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และเหล็กแทรกอยู่ ดังแสดงในภาพประกอบ 1 แต่ละชั้นจะมีความบางมาก ซึ่งมีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร แต่มีความยาวประมาณ 1000 เท่า ทำให้มีค่า Aspect ratio สูง เหมาะสมอย่างมากที่จะนำไปใช้เสริมแรงวัสดุพอลิเมอร์ ช่องว่างระหว่างชั้นเรียกว่า Gallery พื้นผิวของชั้นอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) จะมีประจุเป็นลบ แต่ชั้นเหล่านี้สามารถยึดเกาะกันได้ด้วยประจุบวก เช่น โซเดียมไอออน และแคลเซียมไอออน

2.1.1 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite structure)

ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของแรมมอนต์มอริลโลไนต์ คือ มีลักษณะเป็นแผ่นหรือเกล็ดขนาดเล็กซ้อนกัน 3 ชั้น มีแผ่นกลางเป็นแผ่นของกลุ่มโมเลกุลอะลูมิเนียมไฮดรอกซิลโมเลกุลแปดระนาบ (Octahedral aluminum hydroxyl) อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นของกลุ่มโมเลกุลซิลิคอนออกไซด์โมเลกุลปิรามิดสี่ระนาบ (Silicon oxygen tetrahedral) โดยที่อะตอมของอะลูมิเนียมบางส่วนจะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของแมกนีเซียมหรืออะตอมของธาตุเหล็ก ซึ่งจะช่วยสร้างประจุลบบนระนาบ ด้านฐานของโมเลกุลซิลิกา ดังแสดงในภาพประกอบ 2 และจะมีการสร้างสมดุลโดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับแผ่นที่อยู่ติดกันในแรมมอนต์มอริลโลไนต์ตามธรรมชาติซึ่งประจุบวกเหล่านี้มักจะเป็นแคลเซียม โซเดียมหรือแมกนีเซียม ขึ้นอยู่กับสภาพดินฟ้าอากาศและสภาวะแวดล้อมในช่วงเวลาที่ก่อตัว และลักษณะการก่อตัวขึ้นของแร่ในทางเคมี

โครงสร้างของแรมมอนต์มอริลโลไนต์ หรือ Trioctaheral ประกอบด้วย 2 Tetrahedral sheet กับ Octahedral sheet อยู่ตรงกลาง T-O-T ซึ่งก็เป็นโครงสร้างพื้นฐานของ Pyrophyllite ด้วยเช่นกัน

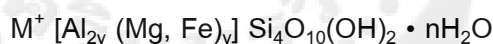
กลุ่มของมอนต์มอริลโลไนต์บางตัวนั้นมีซิลิกาถูกแทนที่ด้วยอะลูมินาใน Tetrahedral และ Al^{3+} ถูกแทนที่ด้วย Mg^{2+} และ Fe^{2+} ใน Octahedral ในกลุ่มนี้แรงยึดกันระหว่างผลึกแร่นั้นค่อนข้างอ่อน เป็นเพียงแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) เท่านั้น จึงสามารถจับน้ำเข้าไปได้ง่าย ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการบวม “Swells out” ซึ่งปริมาตรจะขยายจากเดิมถึง 6 เท่า (13-16,18)



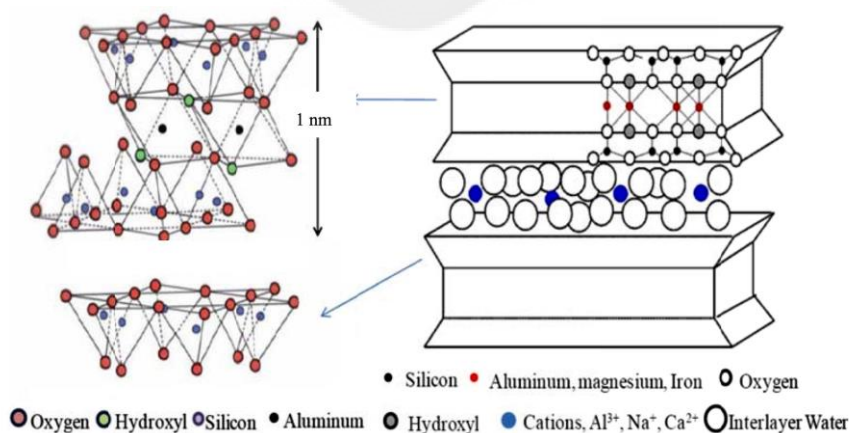
ภาพประกอบ 1 โครงสร้างเคมีของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) (17)

2.1.2 ส่วนประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ (Chemical composition of montmorillonite)

แร่มอนต์มอริลโลไนต์มีสูตรโมเลกุลดังนี้



โดยที่ M^+ หมายถึงประจุบวกที่มาทำการแลกเปลี่ยนประจุกันอาจเป็นได้ทั้งแคลเซียมหรือโซเดียม



ภาพประกอบ 2 โครงสร้างอนุภาคของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (18)

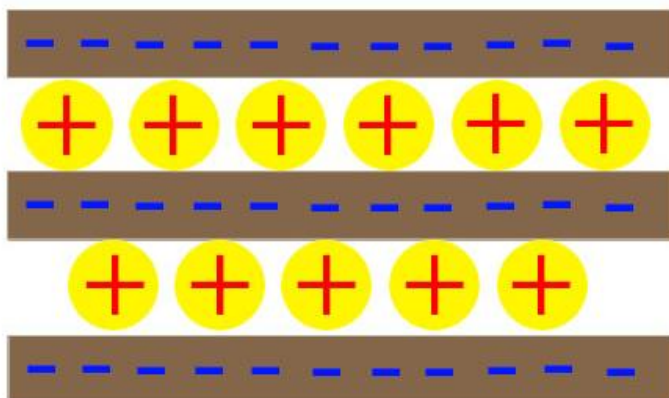
แร่มอนต์มอริลโลไนต์ที่มีไอออนโซเดียมอยู่ในโครงสร้างเป็นปริมาณมากจะมีสมบัติในการดูดซับน้ำ และเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับสิ่งแวดล้อมได้ดีกว่าแร่มอนต์มอริลโลไนต์ที่มีไอออนแคลเซียมอยู่ในโครงสร้าง โดยโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์เมื่อดูดซับน้ำแล้วสามารถพองตัวได้มากกว่า 15-20 เท่าจากปริมาตรเดิม ดังแสดงในภาพประกอบ 3 ⁽¹⁹⁾



ภาพประกอบ 3 อนุภาคของโซเดียมไอออน (Na-ion) (ก) ก่อน และ (ข) หลังจับกับโมเลกุลน้ำ หรือไฮเดรตเตดโซเดียมไอออน (Hydrated Na-ion) ซึ่งมีจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ⁽¹⁹⁾

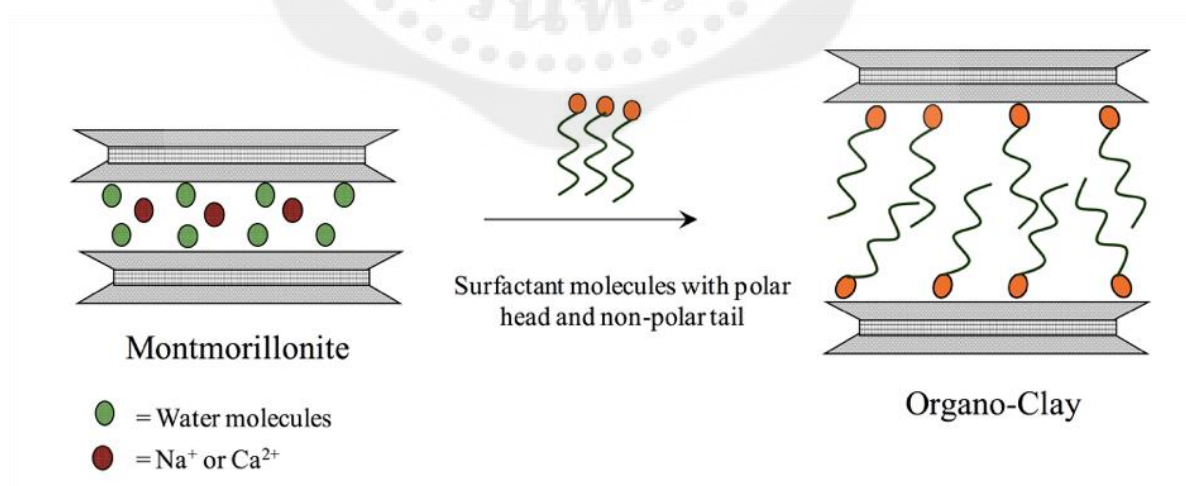
2.1.3 การตัดแปรแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Modified montmorillonite)

แร่มอนต์มอริลโลไนต์และแร่ในกลุ่มของอะลูมิโนซิลิเกตอื่น ๆ โดยธรรมชาติจะมีสมบัติชอบน้ำทำให้แร่ในกลุ่มนี้ยากที่จะนำไปผสมและเกิดปฏิกิริยากับเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งชั้นที่ซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบของแผ่นโครงสร้างของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ยึดกันอย่างแน่นหนาด้วยแรงไฟฟ้าสถิต ดังแสดงในภาพประกอบ 4 คู่ไอออน (Counterions) จะถูกดึงดูดด้วยประจุลบในแผ่นโครงสร้างของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ คู่ไอออนนี้สามารถดึงดูดแผ่นโครงสร้าง 2 แผ่นเข้าไว้ด้วยกัน จึงทำให้ชั้นที่ซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบของแผ่นโครงสร้างของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ยึดกันอย่างหนาแน่นขึ้น



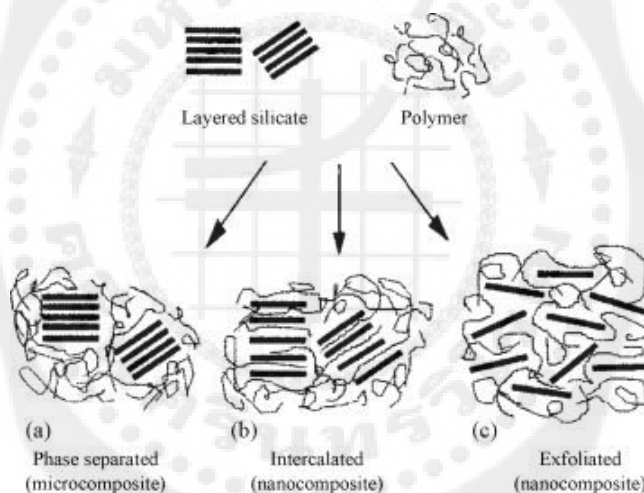
ภาพประกอบ 4 แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตที่ยึดแผ่นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ ⁽²⁰⁾

การนำแรมมอนต์มอริลโลไนต์ทำวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร จึงจำเป็นต้องทำการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ เพื่อให้ชั้นแผ่นโครงสร้างเกิดการแยกชั้น การทำวัสดุเชิงประกอบปราศจากการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ก่อนจะทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่ไม่มีประสิทธิภาพ เพราะมอนต์มอริลโลไนต์ทั้งหมดจะเกาะติดยึดอยู่ภายในเนื้อพอลิเมอร์ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับเนื้อพอลิเมอร์ได้ วิธีการที่นิยมค่อนข้างง่ายในการดัดแปรผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ ทำให้สามารถเข้ากันได้กับเนื้อของสารอินทรีย์มากขึ้น คือ การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchanging) ประจุบวกจะเกิดพันธะที่แข็งแกร่งกับผิวมอนต์มอริลโลไนต์ ดังนั้นประจุบวกโมเลกุลเล็ก ๆ สามารถแทนที่ประจุบวกที่อยู่บนมอนต์มอริลโลไนต์ได้ดังภาพประกอบ 5 ^(18,21-22)



ภาพประกอบ 5 การดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ ⁽¹⁸⁾

ซึ่งการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ในชั้นโครงสร้างสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสามารถจำแนกการกระจายตัวของพอลิเมอร์และมอนต์มอริลโลไนต์คือ พอลิเมอร์ไม่สามารถแยกชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ได้ ทำให้พอลิเมอร์อยู่ระหว่างพื้นผิวภายนอกของชั้นมอนต์มอริลโลไนต์ เรียกว่า การแยกชั้นในระดับไมโคร (Separated micro composite) ลักษณะการแยกชั้นในลักษณะต่อไปคือการแยกชั้นในระดับนาโนเมตร โดยที่พอลิเมอร์เข้าไปแลกเปลี่ยนประจุในช่องว่างระหว่างชั้น (Gallery) ของมอนต์มอริลโลไนต์ ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์ที่ทำการดัดแปรสามารถแลกเปลี่ยนประจุได้มากขึ้น เรียกว่า วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรแบบขยายชั้น (Intercalated nanocomposite) และลักษณะที่มีความต้องการมากที่สุดสำหรับใช้งานในการดูดซับคือการแยกชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ถูกทำลายและสามารถกระจายตัวได้ดี ทำให้มีการแลกเปลี่ยนประจุมากกว่าลักษณะอื่น ๆ เรียกลักษณะนี้ว่า วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรแบบแตกชั้น (Exfoliated nanocomposite) ซึ่งสามารถพบลักษณะการขยายชั้นและการแตกชั้นอยู่ร่วมกัน ดังภาพประกอบ 6⁽¹⁴⁾



ภาพประกอบ 6 ชนิดของวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์⁽²³⁾

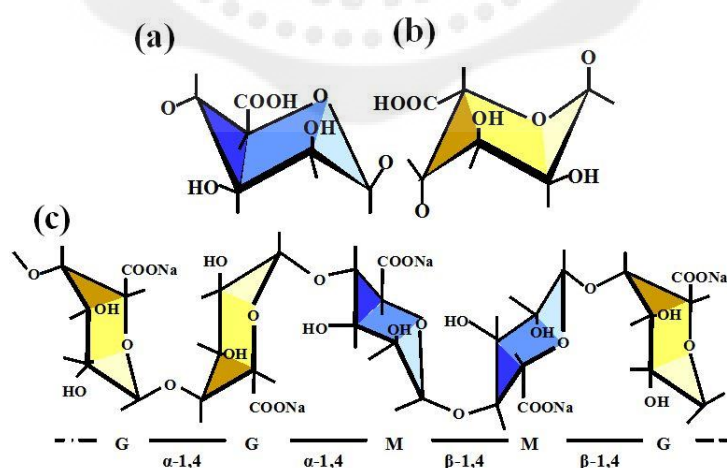
2.1.4 ประโยชน์ของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Advantage of montmorillonite)

แร่มอนต์มอริลโลไนต์ ที่สามารถดัดแปรจนมีขนาดอนุภาคเล็กในระดับนาโนเมตรจนสามารถเข้ากันได้ดีกับเนื้อพอลิเมอร์ ทำให้ปัจจุบันแร่มอนต์มอริลโลไนต์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการนำมาใช้เสริมแรงพลาสติก ได้มีผู้สนใจนำมอนต์มอริลโลไนต์ไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เช่น พอลิยูรีเทน⁽²⁴⁾ ไนลอน⁽²⁵⁾ และพอลิพรอพิลีน⁽²⁶⁾ เป็นต้น เป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรที่เสริมแรงในระดับโมเลกุลทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีระดับที่ดีขึ้น เช่น สมบัติการทนความร้อน สมบัติความแข็งแรง เป็นต้น นอกจากนี้พบว่าแร่มอนต์มอริลโลไนต์วัสดุเชิง

ประกอบระดับนาโนเมตรช่วยเพิ่มความต้านทานสารเคมี ลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ลดความสามารถในการซึมผ่าน และช่วยให้วัสดุมีความสามารถในการหน่วงไฟอีกด้วย (22,27-29)

2.2 โซเดียมแอลจิเนต (Sodium alginate)

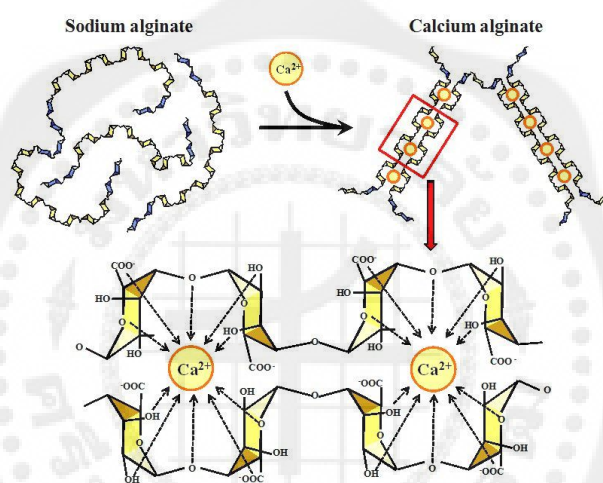
แอลจิเนต (Alginate) หรือแอลจิน (Algin), กรดแอลจินิก (Alginic acid) เป็นสารสกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล (Phaeophyceae) ได้แก่ *Macrocystis pyrifera* มีแอลจิเนตร้อยละ 14 - 19 ส่วน *Laminaria cloustoni* และ *Laminariadigitata* มีแอลจิเนตร้อยละ 15 - 40 ปริมาณที่พบจะขึ้นกับชนิดของสาหร่ายฤดูกาล และแหล่งที่สาหร่ายเจริญเติบโต สาหร่ายเหล่านี้พบได้ทั่วไป และประเทศที่ผลิตแอลจิเนตมากที่สุด ได้แก่ อเมริกา อังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน นอร์เวย์ แคนาดา และญี่ปุ่น เป็นต้น แอลจิเนตเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดประจุลบ (Anionic polysaccharide) มีสูตรโมเลกุล คือ $(C_6H_8O_6)_n$ เป็นพอลิแซ็กคาไรด์สายตรงคล้ายแป้ง (Starch) และเซลลูโลสไม่มีหน่วยย่อยซ้ำ ๆ กัน ซึ่งสมบัตินี้ทำให้แอลจิเนตแตกต่างจากพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ พบแอลจิเนตแพร่กระจายในผนังเซลล์และช่องว่างระหว่างเซลล์ของสาหร่ายสีน้ำตาล โมเลกุลของแอลจิเนตทำให้พืชมีความยืดหยุ่นและความแข็งแรงซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเจริญของพืชในทะเล แอลจิเนตถูกจัดอยู่ในชนิดไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้มาจากธรรมชาติโดยไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloids) คือ พอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) ที่ได้จากพืช สัตว์ จุลินทรีย์ โดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลสูง ที่โมเลกุลประกอบไปด้วย หมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) ของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) จำนวนมาก และพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) อื่น ๆ และแสดงหน้าที่ที่สำคัญในอาหาร เช่น เป็นสารให้ความหนืด ทำให้เกิดเจลเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) และเป็นสารที่ทำให้เกิดความคงตัวได้⁽³⁰⁻³¹⁾



ภาพประกอบ 7 ส่วนประกอบของแอลจิเนต (a) β -D-mannuronic acid (b) α -L-guluronic acid (c) Structural formula of sodium alginate molecule ⁽³²⁾

2.2.1 การเกิดเจลของแอลจิเนต (Gelation process of alginate)

แอลจิเนตเป็นพอลิแซ็กคาไรด์เชิงเส้นซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยของมอนอแซ็กคาไรด์สองตัว คือ 1,4 β -D-manuronic acid (M) และ L-guluronic acid (G) ในโมเลกุลประกอบด้วยบริเวณที่มีพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียวของ G และ M ที่เรียกว่า G-blocks และ M-blocks ตามลำดับ และบางส่วนของโมเลกุลเป็น MG-blocks ดังแสดงในภาพประกอบ 7 สัดส่วนของพอลิเมอร์ร่วมและโครงสร้างที่แตกต่างจะเป็นตัวกำหนดสมบัติของแอลจิเนต เช่น ถ้าในสายโซ่มีพอลิเมอร์ G ในปริมาณสูงจะมีสมบัติเป็นเจลแข็งที่ความเข้มข้นหนึ่ง ๆ ของประจุบวกของโลหะ แต่ถ้าในสายโซ่พอลิเมอร์ M ในปริมาณสูงเจลที่เกิดจะมีแนวโน้มอ่อนนุ่มและมีสภาวะในการเกิดเจลที่กว้างกว่าสายโซ่ที่มีพอลิเมอร์ G ปริมาณสูง



ภาพประกอบ 8 กลไกการเกิดเจลของแคลเซียมแอลจิเนตแบบ Egg-box model ⁽³²⁾

แอลจิเนตบางชนิดไม่มีสมบัติเป็นเจลและจะเกิดเจลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) โครงสร้างของเจลที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายกล่องไข่ (Egg box) โดยมี Ca^{2+} เกาะอยู่กับสายโซ่พอลิเมอร์ ดังแสดงในภาพประกอบ 8 สมบัติที่ดีของแอลจิเนตเมื่อเกิดเป็นเจล คือ เจลที่ได้จะไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) เมื่ออยู่ในน้ำเย็นที่มีแคลเซียมไอออน

แอลจิเนตที่ผลิตและจำหน่ายในเชิงการค้ามีหลายอนุพันธ์ จึงมีสมบัติการละลายน้ำที่แตกต่างกันไป เช่น อนุพันธ์ของเกลือ Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ และยังผลิตในรูปของพอร์พิลีนไกลคอลแอลจิเนต (Propylene glycol alginate) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาของกรดแอลจินิก (Alginic acid) กับพอร์พิลีนออกไซด์ (Propylene oxide) ภายใต้ความดันอนุพันธ์เหล่านี้จะละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น ความหนืดของสารละลายแอลจิเนตที่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้น ประจุบวกของโลหะที่อยู่ในโครงสร้าง รวมถึงความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วย เช่น ความหนืดของสารละลายแอลจิเนตจะคงที่เมื่อมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 5 แต่ความหนืดของสารละลายจะ

เพิ่มขึ้นเมื่อค่าน้อยกว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 4.5 และหากสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 3 จะเริ่มมีผลึกของแอลจิเนตเกิดขึ้น⁽³⁰⁻³¹⁾

2.2.2 ประโยชน์ของแอลจิเนต (Advantage of alginate)

แอลจิเนตถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด โดยเติมในอาหารกระป๋องบางชนิด เพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด สารเพิ่มความคงตัว หรือใช้เป็นสารทำให้เกิดเจล นอกจากนี้ยังใช้แอลจิเนตในอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกด้วย ตัวอย่างของการนำแอลจิเนตไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น

- ในอุตสาหกรรมอาหารใช้เป็นสารข้นหรือสารทำให้เกิดเจลในซूप เครื่องดื่ม ไอศกรีม และเยลลี่
- ใช้เป็นสารข้นในการผลิตเครื่องสำอาง
- แคลเซียมแอลจิเนตใช้ทำเป็นแผ่นปิดแผลไฟไหม้และจะช่วยให้แผลหายเร็วขึ้น และช่วยลดอาการบาดเจ็บได้ดีกว่าแผ่นปิดแผลแบบดั้งเดิม
- ช่วยดูดซึมโลหะที่เป็นพิษจากเลือด
- เอสเตอร์แอลจิเนตใช้เป็นสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) และอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifiers)⁽³³⁾

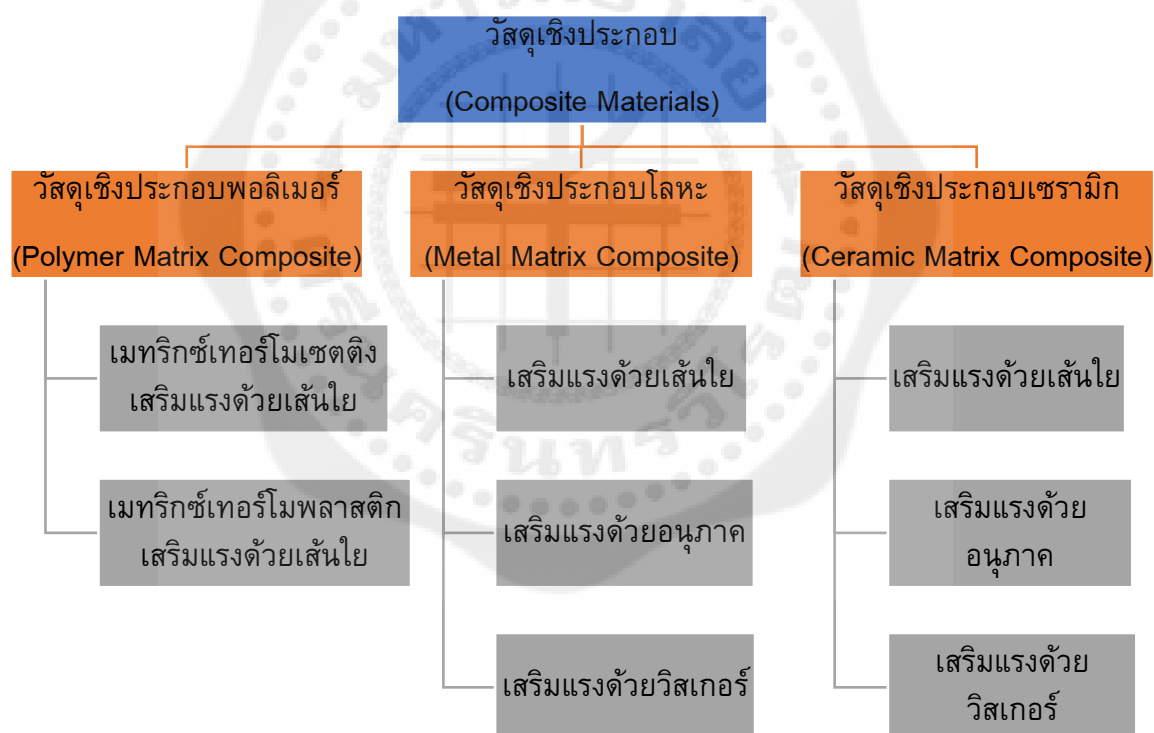
2.3 วัสดุเชิงประกอบหรือวัสดุคอมพอสิต (Composite materials)

วัสดุเชิงประกอบ หรือวัสดุคอมพอสิต (Composite materials) หมายถึง วัสดุที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปแล้วทำให้สมบัติของวัสดุรวมดีขึ้น สำหรับความหมายเชิงวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นการทำนายหรือคาดคะเนสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ จึงไม่สามารถทำนายได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบชนิดใดเพียงชนิดเดียว องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ วัสดุที่เป็นเนื้อหลักและเป็นเฟสต่อเนื่อง เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุส่วนเหลือที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักนั้น เรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcement) โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มสารเสริมแรงและทำให้วัสดุเชิงประกอบเป็นรูปร่างขึ้น ส่วนสารเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมสมบัติให้เมทริกซ์และทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติตามต้องการ⁽³⁴⁻³⁵⁾

2.3.1 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ (Category of composite materials)

วัสดุเชิงประกอบประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ เมทริกซ์และสารเสริมแรง ดังนั้นสามารถจำแนกวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของวัสดุที่เป็นเมทริกซ์จะสามารถจำแนกออกเป็น

3 ประเภท ได้แก่ วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composite) วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal Matrix Composite) และวัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic Matrix Composite) และสามารถจำแนกย่อยต่อไปได้อีกตามลักษณะของสารเสริมแรง ได้แก่ อนุภาค (Particle) เส้นใย (Fiber) และวิสเกอร์ (Whisker) ดังแสดงในภาพประกอบ 9 โดยสารเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบสามารถถูกจำแนกตามลักษณะเป็นอนุภาค เส้นใยและวิสเกอร์ อนุภาคเสริมแรงจะมีลักษณะเป็นเม็ดหรือผง เช่น ผงถ่านดำ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น และถ้าพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมากกว่า 100 ขึ้นไปจะเรียกสารเสริมแรงนั้นเป็นเส้นใย ซึ่งอาจจำแนกตามความยาวเป็นเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous fiber) และเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous fiber) และยังสามารถจำแนกเส้นใยไม่ต่อเนื่องตามอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางได้เป็นเส้นใยยาว (Long fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนมากกว่า 1,000 ขึ้นไป และเส้นใยสั้น (Short fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนน้อยกว่า 1,000 เส้นใยมีทั้งที่เป็นเส้นใยอินทรีย์และเส้นใยอนินทรีย์



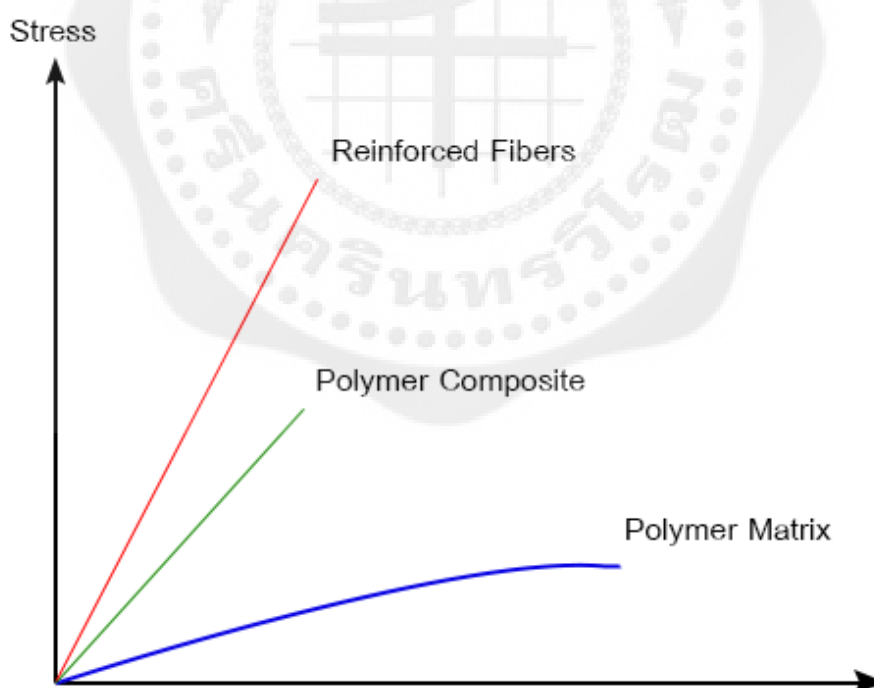
ภาพประกอบ 9 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์และลักษณะของสารเสริมแรง ⁽³⁴⁾

ตัวอย่างเส้นใยอินทรีย์ เช่น เส้นใยอะรามิด เส้นใยเซลลูโลส เป็นต้น ส่วนเส้นใยอนินทรีย์อาจเป็นเส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน หรือเส้นใยโลหะ เช่น เส้นใยโบรอน เส้นใยทองแดง เป็นต้น ส่วนวิสเกอร์

เป็น ลักษณะของเส้นใยขนาดเล็กมากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยไมโครเมตรและความยาวเพียงไม่กี่มิลลิเมตร ซึ่งเกิดจากการก่อตัวทางยาวของผลึกเดี่ยว (Elongated single crystal) จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นผลึกสมบูรณ์ที่ปราศจากการเคลื่อนที่ (Dislocation) ทำให้วิสเกอร์มีความแข็งแรงสูงมาก เช่น วิสเกอร์ซิลิกอนคาร์ไบด์

1. วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์

พอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำ เชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงไม่สูงนัก มีความหนาแน่นต่ำและมีความทนทานต่อการกัดกร่อน การเสริมแรงให้พอลิเมอร์ทำได้โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยทั่วไปเส้นใยเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์มักเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงเพื่อทำหน้าที่ในการรับและกระจายแรงกระทำโดยวัสดุเชิงประกอบจะมีความแข็งแรงสูงที่สุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง การเสริมแรงนี้ทำให้เมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง ดังแสดงภาพในประกอบที่ 10 แสดงถึงสมบัติเชิงกลอย่างง่ายของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เมื่อให้แรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใย



ภาพประกอบ 10 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ ⁽³⁴⁾

สมบัติเชิงกลนี้จะเป็นสมบัติร่วมที่เกิดจากสมบัติของเมทริกซ์พอลิเมอร์และสมบัติของเส้นใยเสริมแรงประกอบกันทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงทำหน้าที่รับแรงกระทำ แต่สำหรับระยะยืดสูงสุด วัสดุเชิงประกอบจะมีความสามารถในการยืดสูงสุดได้ไม่เกินระยะยืดสูงสุดของเส้นใยเสริมแรง สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์ควรมีความเหนียวทนทานมากพอที่จะห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงไว้ สารเสริมแรงในรูปอนุภาคมีส่วนเสริมความแข็งแรงได้ไม่ดีเท่ากับรูปเส้นใย เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของสารเสริมแรงส่งผลต่อการกระจายแรง จึงนิยมเรียกสารเสริมแรงในรูปอนุภาคว่าสารเติม (Filler) วัสดุเชิงประกอบจะมีความแข็งแรงมากขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยทำให้ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้สามารถนำวัสดุเชิงประกอบมาใช้สำหรับงานโครงสร้างบางชนิดที่ต้องรับแรงกระทำที่ไม่สูงมากนักได้ เช่น เฟอโรนเจอร์ต่าง ๆ

สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถแบ่งย่อยออกเป็นเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง (Thermosetting matrix) และเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic matrix) ที่มีความแตกต่างกันในพฤติกรรมเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ โดยเทอร์โมเซตติงเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแหและมีสมบัติแข็งเปราะเมื่อเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุล หรือการบ่มแล้วจะเกิดการคงรูป และไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ส่วนเทอร์โมพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเส้นหรือแบบกิ่ง สามารถหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลว มีสมบัติเหนียวและทนทานต่อสิ่งแวดล้อม พฤติกรรมเชิงความร้อนนี้จะมีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ สำหรับเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบจะเป็นการผสมสารเสริมแรงให้เข้ากับมอนอเมอร์ในแม่พิมพ์ก่อนที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างแบบร่างแห และหลังจากที่ปฏิกิริยาสิ้นสุดวัสดุเชิงประกอบจะเกิดการคงรูปซึ่งจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ในขณะที่การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบที่เมทริกซ์เป็นเทอร์โมพลาสติกนั้น จะใช้หลักการให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลวและขึ้นรูป ก่อนที่จะทำให้เย็นตัวลงเพื่อเกิดการคงรูป โดยถ้าหลังจากคงรูปแล้วได้รับความร้อนอีกครั้ง ส่วนที่เป็นเมทริกซ์ก็จะสามารถหลอมเหลวได้อีก การที่จะเลือกใช้เมทริกซ์ชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติในการประยุกต์ใช้งานเป็นสำคัญ

ไฟเบอร์กลาสหรือไฟเบอร์เป็นตัวอย่าง ของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่มีเมทริกซ์เทอร์โมเซตติงเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วที่ โดยทั่วไปหมายถึงเมทริกซ์พอลิเอสเทอร์หรือไวนิล เอสเทอร์ไฟเบอร์กลาสจะนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงปานกลางน้ำหนักเบา เช่น หลังคาโรงรถ กระเบ เฟอโรนเจอร์ขนาดเล็ก เป็นต้น ส่วนเมทริกซ์อีพอกซีจะถูกใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูงกว่า นอกจากนี้ยังมีการนำเส้นใยเสริมแรงอื่น ๆ ได้แก่ เส้นใยคาร์บอนและเส้นใยอะรามิดและความแข็งแรงสูงกว่าเส้นใยแก้วมาใช้ในงานที่ต้องการสมบัติด้านความแข็งแรงสูงมาก ส่วนวัสดุเชิงประกอบเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติกมักใช้ทำเป็นวัสดุสำหรับตกแต่งภายในที่ต้องการความเหนียว ทนทาน หรือนำไปอัดขึ้นกับวัสดุอื่นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง เป็นต้น

2. วัสดุเชิงประกอบโลหะ

วัสดุเชิงประกอบโลหะได้พัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงความสามารถในการทนทานต่อความล้าของโลหะให้ดีขึ้น โดยเฉพาะอะลูมิเนียมและไทเทเนียมที่เป็นเมทริกซ์โลหะที่ต้องการให้มีสมบัติพิเศษในการใช้งานในอุตสาหกรรมอากาศยาน สารเสริมแรงอาจอยู่ในลักษณะของอนุภาค เส้นใย หรือวิสเกอร์ เป็นต้น นอกจากนี้สารเสริมแรงสำหรับโลหะต้องมีความแข็งแรงสูงและทนความร้อนสูงด้วย เนื่องจากโลหะต้องใช้อุณหภูมิสูงมากในการขึ้นรูปและสารเสริมแรงที่ใช้ต้องไม่เกิดการกัดกร่อนกับเมทริกซ์โลหะ จากข้อจำกัดเหล่านี้ทำให้สารเสริมแรงอนินทรีย์และเส้นใยแก้ว ไม่สามารถใช้เสริมแรงให้กับเมทริกซ์โลหะได้ สารเสริมแรงที่ใช้จึงต้องเป็นสารเสริมแรงเซรามิกหรือสารเสริมแรงโลหะ เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ อะลูมินา เส้นใยโบรอน เป็นต้น การเสริมแรงเป็นการทำให้เมทริกซ์โลหะมีความทนทานต่อความล้าสูงขึ้นมาก และมีอายุการใช้งานนานขึ้นอีกทั้งความหนาแน่นของสารเสริมแรงที่น้อยกว่าโลหะทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบลดลง รวมถึงสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient Temperature Expansion: CTE) ลดลง เพราะสารเสริมแรงเป็นเซรามิกจึงมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำกว่าโลหะ ส่วนกรณีที่สารเสริมแรงมีลักษณะเป็นเส้นใยยาว วัสดุเชิงประกอบที่ได้จะมีความแข็งแรงสูงขึ้นมากอีกด้วย

โดยทั่วไปวัสดุเชิงประกอบโลหะจะนำไปใช้งานในลักษณะเดียวกับโลหะ สารเสริมแรงที่เติมเข้าไปจะเป็นการปรับปรุงสมบัติของเมทริกซ์โลหะให้ดียิ่งขึ้น และมีอายุการใช้งานนานขึ้น อย่างไรก็ตามการนำไปใช้งานยังจำกัดเนื่องจากต้นทุนในการผลิตที่สูงมาก

3. วัสดุเชิงประกอบเซรามิก

เซรามิกเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ไม่นำความร้อน ทนทานต่อการกัดกร่อนและอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เมื่อได้รับความร้อนต่ำมาก เซรามิกจึงนำมาใช้ในงานที่ต้องการความทนทานต่ออุณหภูมิสูงและในสภาวะที่มีการกัดกร่อนสูง แต่ข้อเสียของเซรามิก คือ เปราะและแตกหักง่ายเมื่อเกิดรอยแตกแล้วไม่สามารถซ่อมแซมได้โดยง่าย การเสริมแรงให้กับเมทริกซ์เซรามิกเป็นการปรับปรุงสมบัติให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความเหนียวและทนทานมากขึ้น สารเสริมแรงจะเข้าไปขวางการแพร่ของรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน เมื่อวัสดุเชิงประกอบได้รับแรงจะไม่เกิดการเปราะแตกในทันที เนื่องจากรอยแยกจะถูกหน่วงด้วยสารเสริมแรงเนื่องจากสมบัติที่เรียกว่า ความเหนียวแบบเทียม (Pseudo ductile) สำหรับเมทริกซ์เซรามิกที่ไม่เสริมแรงจะแสดงสมบัติที่เปราะและแตกทันทีเมื่อได้รับแรงกระทำจนถึงจุดจุดหนึ่ง ดังนั้นการใส่สารเสริมแรงเข้าไปจะทำให้วัสดุเชิงประกอบเซรามิกที่ได้มีความเหนียวทนทานมากขึ้น สารเสริมแรงที่ใช้ในการเสริมแรงอาจอยู่ในรูปอนุภาค เส้นใย หรือวิสเกอร์ ได้แก่ อะลูมินา ซิลิกา ซิลิกอนคาร์ไบด์และคาร์บอน เป็นต้น และสำหรับเมทริกซ์เซรามิก ได้แก่ ซีเมนต์ คาร์บอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น

วัสดุเชิงประกอบได้นำมาใช้งานเป็นเวลา นานโดยเฉพาะการใช้เป็นวัสดุโครงสร้างที่ใช้เส้นโลหะและหินกรวดทรายต่าง ๆ เป็นสารเสริมแรงให้แก่เมทริกซ์ซีเมนต์ หรือคอนกรีตสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีคอนกรีตอาจทำได้โดยใช้เส้นใย เสริมแรง เช่น เส้นใยแก้วหรือเส้นใยคาร์บอน

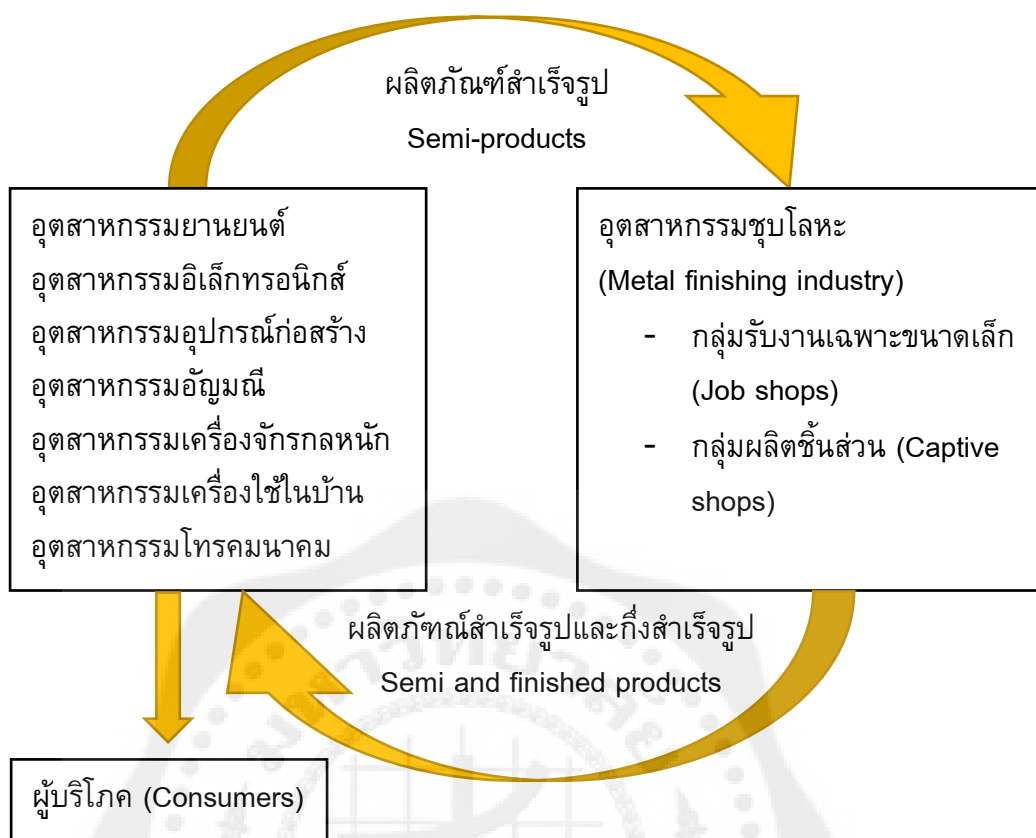
แทนเส้นโลหะเพื่อแก้ปัญหาด้านการกัดกร่อนเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน สำหรับวัสดุเชิงประกอบเซรามิกขั้นสูงที่มีความเหนียวทนทานต่อการกัดกร่อนและสามารถประยุกต์ใช้ในงานที่อุณหภูมิสูงนั้นยังมีการใช้งานอย่างจำกัด เนื่องจากต้นทุนในกระบวนการผลิตที่สูง (34-35)

2.3.2 การประยุกต์ใช้วัสดุเชิงประกอบ (Application of composite materials)

สมบัติของวัสดุเชิงประกอบสามารถออกแบบได้จากวัสดุองค์ประกอบสัดส่วนระหว่างวัสดุองค์ประกอบความแข็งได้ระหว่างวัสดุองค์ประกอบ การเรียงตัวของสารเสริมแรงและการกระจายตัวของสารเสริมแรงในเมทริกซ์ การควบคุมปัจจัยเหล่านี้มีส่วนทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบเป็นไปตามต้องการทำให้วัสดุเชิงประกอบสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายสาขา ครอบคลุมตั้งแต่วัสดุสำหรับการใช้งานทั่วไป จนกระทั่งถึงวัสดุที่ใช้ในงานเฉพาะกิจที่ต้องการสมบัติพิเศษมาก เช่น ด้านอากาศยานและเครื่องยนต์, ด้านยานยนต์ และเครื่องยนต์ และด้านอื่น ๆ เป็นต้น (34-35)

2.4 อุตสาหกรรมการชุบโลหะ (Metal finishing industry)

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการชุบโลหะมีจำนวนมาก เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมสนับสนุนที่ช่วยในการส่งเสริมการผลิตเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับสินค้าส่งออก โดยเฉพาะชิ้นส่วนและผลิตภัณฑ์จากโลหะเหล็ก เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รถยนต์ ท่อและข้อต่อสังกะสี เครื่องสุขภัณฑ์ที่ทำด้วยโลหะ เป็นต้น ทำให้มีความต้องการในการบริโภคที่สูง อุตสาหกรรมการชุบโลหะจัดอยู่ในกลุ่มอุตสาหกรรมตกแต่งผิวโลหะ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมสนับสนุนของอุตสาหกรรมหลักอื่น ๆ จำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ก่อสร้าง อัญมณี เครื่องจักรกลหนัก เครื่องใช้ในบ้าน โทรคมนาคม เป็นต้น ดังภาพประกอบ 11 (36-37)



ภาพประกอบ 11 ภาพรวมอุตสาหกรรมชุบโลหะ⁽³⁵⁾

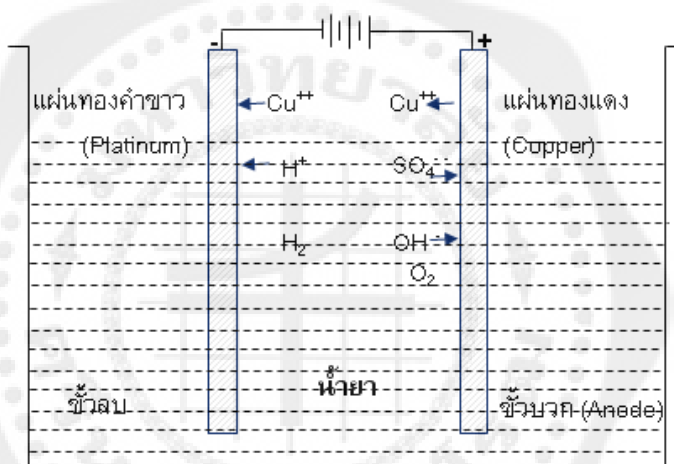
2.4.1 ประเภทอุตสาหกรรมชุบโลหะ (Category of industrial plating)

การชุบโลหะมีวัตถุประสงค์หลัก 3 ประการ คือ

1. เพื่อตกแต่งผลิตภัณฑ์ให้เกิดความสวยงาม แวววาว (Decorating)
2. เพื่อป้องกันการผุกร่อน (Anti-corrosion) และยืดอายุการใช้งานผลิตภัณฑ์
3. เพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะ ได้แก่
 - การนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)
 - การสะท้อนแสง (Reflectivity and Appearance)
 - ทนทานต่อแรงบิด (Torque tolerance)
 - ช่วยในงานเชื่อมประสานโลหะ (Solder ability)
 - ทนทานต่อสารเคมี (Chemical resistance)
 - ความสามารถในการยึดเกาะกับเนื้อยางพารา (Ability to bond to rubber)
 - เพิ่มความแข็ง (Hardness)

การชุบโลหะมีกระบวนการผลิต แบ่งออกได้เป็น 4 แบบ คือ (ภาพประกอบ 13)

1. การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) คือ กระบวนการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายเกลือของโลหะ (Metallic salts) แล้วทำให้ไอออนบวกวิ่งมารับประจุไฟฟ้าลบที่ชิ้นงาน ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วลบ (Cathode) จึงทำให้เกิดเป็นชั้นผิวบางของโลหะเคลือบอยู่บนผิวด้านนอกของชิ้นงาน การชุบทองแดง นิกเกิล โครเมียม (Cu-Ni-Cr Plating) จัดอยู่ในประเภทการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 12 ตัวอย่างการชุบทองแดง โดยใช้น้ำยาชุบคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) เมื่อเอาสารละลายจุนสีหรือคอปเปอร์ซัลเฟตมาทำการแยกสลายด้วยไฟฟ้า โดยใช้แผ่นทองคำขาว (Platinum) เป็นขั้วลบต่อเข้ากับขั้วลบแบตเตอรี่ และใช้แผ่นทองแดงบริสุทธิ์เป็นขั้วบวกต่อเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



ภาพประกอบ 12 การชุบทองแดงโดยใช้น้ำยาชุบคอปเปอร์ซัลเฟต ⁽³⁵⁾

คอปเปอร์ซัลเฟตที่มีอยู่ในน้ำยาจะแยกสลายออกเป็นอนุภาคเล็ก ๆ 2 ส่วน คือ อนุภาคคอปเปอร์ (Cu^+) มีประจุไฟฟ้าบวก (+) และซัลเฟต (SO_4^{2-}) มีประจุไฟฟ้าลบ (-) เมื่อต่อกระแสไฟฟ้าให้ครบวงจรอนุภาคเล็ก ๆ ทองแดงจะวิ่งไปหาทองคำขาว (ขั้วลบ) เกาะติด เป็นผงสีแดงอยู่บนแผ่นทองคำขาว ส่วนอนุภาคซัลเฟตจะวิ่งไปหาแผ่นทองแดง (ขั้วบวก) ทำปฏิกิริยากับทองแดงเป็นเหตุให้ทองแดงละลายเป็นคอปเปอร์ซัลเฟต แทนที่คอปเปอร์ซัลเฟตตัวก่อนที่หมดไป คอปเปอร์ซัลเฟตตัวหลังนี้จะแยกสลายออกเป็น 2 ส่วนอีก คือ อนุภาคคอปเปอร์ (Cu^+) และอนุภาคซัลเฟต (SO_4^{2-}) อนุภาคคอปเปอร์จะวิ่งไปขั้วลบเกาะติดอยู่ที่แผ่นทองคำขาว อนุภาคซัลเฟตวิ่งไปที่ทำปฏิกิริยากับขั้วบวกกลายเป็นคอปเปอร์ซัลเฟตขึ้นมาแทนที่ อีกปฏิกิริยาจะเกิดหมุนเวียนเช่นนี้ตลอดไป ทรายที่ยังคงต่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

จากการค้นพบกฎเกณฑ์อันนี้ จึงได้มีการนำเอามาใช้เป็นประโยชน์ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) หรือการแยกโลหะให้บริสุทธิ์ (Refinery) ตัวอย่างเช่น มีทองแดงไม่บริสุทธิ์อยู่สามารถนำเอาทองแดงนี้ไปทำเป็นแผ่นขั้วบวกแล้วจุ่มในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต เมื่อไฟฟ้าไหลผ่านครบวงจรก็จะเกิดปฏิกิริยาทำให้ทองแดงบริสุทธิ์ไปเกาะติดบนแผ่นขั้วลบ ซึ่งเราก็จะได้ทองแดงบริสุทธิ์ตามต้องการ การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากสามารถนำโลหะและอโลหะหลายชนิดมาทำการเคลือบผิวในขณะเดียวกันก็สามารถเลือกโลหะที่นำมาเคลือบผิวได้ หลากหลายชนิดด้วยดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 ตัวอย่างของโลหะที่ใช้เคลือบชิ้นงานด้วยวิธีการชุบไฟฟ้า (Electroplating) ⁽³⁵⁾

โลหะที่ใช้เคลือบผิวชิ้นงาน (Coating metal)	กลุ่มโลหะที่ใช้ทำชิ้นงาน (Base material group)	วัสดุโลหะชิ้นงาน ¹ (Base material)
ทองแดง (Copper)	โลหะกลุ่มเหล็ก (Most ferrous metals) โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous metals) พลาสติกบางชนิด (Some plastics)	เหล็กกล้า (Steel) สังกะสี (Zinc) พลาสติกทนความร้อน (ABS)
โลหะทองแดงผสม Copper alloy : - ทองสัมฤทธิ์ (Bronze) - ทองแดง-ดีบุก (Copper-Tin) - ทองเหลือง (Brass)	กลุ่มเหล็ก (Ferrous metals) โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous metals)	เหล็ก (Iron) เหล็กกล้า (Steel) ทองแดง (Copper) สังกะสี (Zinc) อะลูมิเนียม (Aluminum)
นิกเกิล (Nickel)	โลหะกลุ่มเหล็ก (Most ferrous metals) โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous metals) พลาสติกบางชนิด (Some plastics)	เหล็ก (Steel) ทองแดง (Copper) พลาสติกทนความร้อน (ABS)
โครเมียม (Chromium)	โลหะกลุ่มเหล็ก (Most ferrous metals) โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous metals)	เหล็ก (Steel) ทองแดง (Copper) ทองเหลือง (Brass) สังกะสี (Zinc)

ตาราง 1 (ต่อ)

โลหะที่ใช้เคลือบผิวชิ้นงาน (Coating metal)	กลุ่มโลหะที่ใช้ทำชิ้นงาน (Base material group)	วัสดุโลหะชิ้นงาน ¹ (Base material)
ดีบุก (Tin)	โลหะกลุ่มเหล็ก (Most ferrous metals) โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous metals)	เหล็ก (Steel) เหล็กหล่อ (Cast Iron) ทองแดง (Copper)
โลหะดีบุกผสม Tin alloy : - ดีบุก-นิกเกิล (Tin-Nickel) - ดีบุก-สังกะสี (Tin-Zinc)	โลหะกลุ่มเหล็ก (Most ferrous metals) โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous metals)	เหล็ก (Steel) ทองแดง (Copper) ทองสัมฤทธิ์ (Bronze)
สังกะสี (Zinc)	กลุ่มเหล็ก (Ferrous metals)	เหล็ก (Steel) ชุบเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้า (Electro galvanized)
โลหะเงิน (Silver)	โลหะกลุ่มเหล็ก (Most ferrous metals) โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous metals)	เหล็ก (Steel) ทองแดง (Copper) นิกเกิล (Nickel)

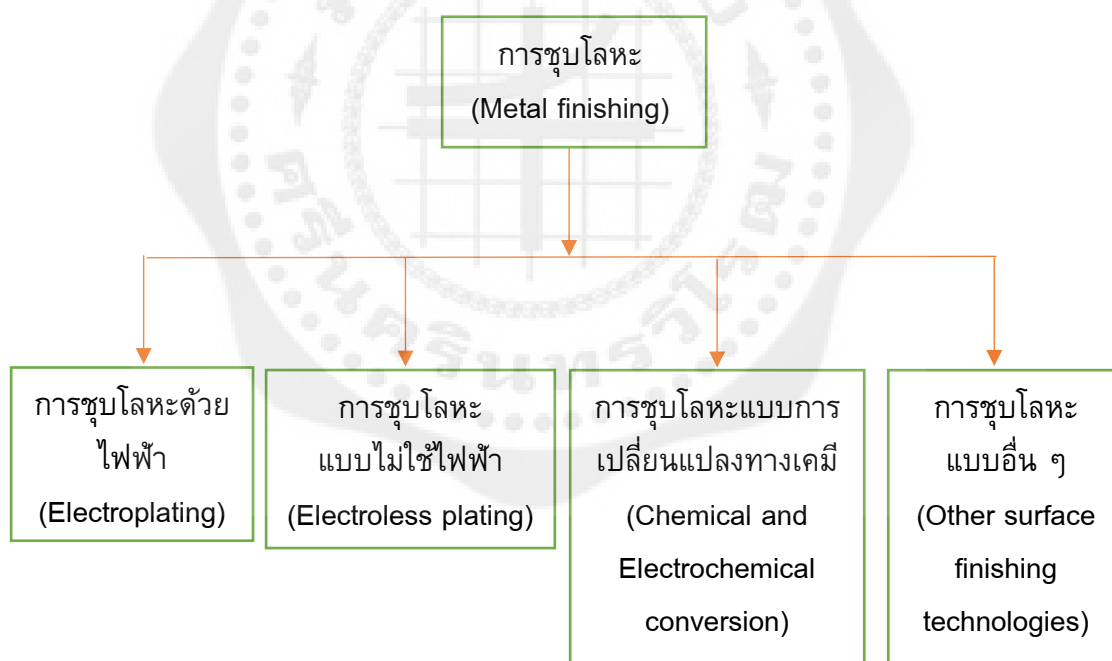
- หมายเหตุ
- ชนิดของวัสดุและโลหะที่ใช้เป็นชิ้นงานก่อนชุบ
 - พลาสติกที่เคลือบด้วยสารตัวนำไฟฟ้า สามารถนำมาชุบโลหะเคลือบที่ผิวชิ้นงานได้
 - การชุบโลหะแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless plating) คือ กระบวนการจับตัวของโลหะที่ผิวหน้าวัตถุที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น การชุบทองแดงและนิกเกิล แบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed circuit boards, PCB)
 - การชุบโลหะแบบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและไฟฟ้าเคมี (Chemical and electrochemical conversion) คือ กระบวนการชุบโลหะที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นที่ผิวหน้าของชิ้นงาน โดยอาจมีการใช้กระแสไฟฟ้าหรือไม่ก็ได้ เพื่อทำให้เกิดชั้น

ป้องกันผิว (Protective coating) และ/หรือเกิดชั้นผิวที่สวยงาม (Decorative coating) ตัวอย่างเช่น

- Chromating คือ การชุบโลหะด้วยโครเมียม
 - Phosphating คือ การเตรียมพื้นผิวหน้าโดยการรองพื้นด้วยฟอสเฟต ซึ่งเป็นกระบวนการที่จะทำการทาสีหรือพ่นสี
 - Anodizing คือ การจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายเกลือโลหะหรือสารละลายกรด เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นออกไซด์ของโลหะ (Metal oxide) ซึ่งมีสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน
 - Passivating คือ กระบวนการจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายกรด เช่น กรดไนตริก (Nitric acid) หรือสารละลายของกรดไนตริกกับเกลือโซเดียมไดโครเมต (Sodium dichromate) ใช้สำหรับการป้องกันการผุกร่อน (Corrosion) และช่วย ยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์
4. การชุบโลหะแบบอื่น ๆ (Other surface finishing technologies) คือ กระบวนการชุบโลหะที่ไม่จัดอยู่ใน 3 กลุ่มข้างต้น ได้แก่
- 4.1. การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน Hot dipped galvanizing คือ กระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน เพื่อเคลือบผิวเหล็ก หรือเหล็กกล้า
 - 4.2. Surface hardening คือ กระบวนการทางด้านวัสดุโลหะ ที่ทำให้ผิวด้านนอกของวัตถุมีความแข็งมากกว่าเนื้อวัตถุที่อยู่ภายใน เป็นวิธีการปรับปรุงผิวโลหะ ให้มีความแข็ง (Hardness) เพิ่มขึ้น เพื่อให้มีความทนทาน (Durable) และสามารถต้านทานการสึกกร่อน (Wear-resistance) ได้ดี เช่น
 - Carburizing คือ การปรับปรุงสภาพผิวของเหล็กกล้าประเภทคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) อบกับสารที่มีปริมาณคาร์บอนสูง โดยคาร์บอนจะแพร่กระจายเข้าไปในผิวเนื้อเหล็กที่อุณหภูมิสูง 845-955 องศาเซลเซียส เกิดเป็นชั้นผิวแข็งหุ้มที่เปลือกนอกของชิ้นโลหะ และมีคาร์บอนเพิ่มขึ้นประมาณ 0.85% สารคาร์บอนที่นำมาอบที่เป็นของแข็งได้แก่ ถ่านไม้ หรือ ถ่านโค้ก ผสมกับแบเรียมคาร์บอเนต เป็นต้น สารที่เป็นก๊าซ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน เป็นต้น
 - Nitriding คือ การปรับปรุงสภาพผิวโลหะภายใต้บรรยากาศของก๊าซแอมโมเนีย เกิดการละลายของไนโตรเจนในเนื้อโลหะและเกิดสารประกอบไนโตรที่ผิวหน้า ทำให้ผิวชิ้นงานมีลักษณะแข็งมาก

4.3. การชุบโลหะอื่น ๆ ได้แก่

- Cladding เป็นการปรับปรุงผิวโลหะเพื่อป้องกันสนิมด้วยการปกคลุมเนื้อโลหะด้วยโลหะอีกชนิดหนึ่ง และยึดติดกันด้วยแรงกล เช่น การอัดบีบ (Pressing) การรีดดึง (Extruding) ภายใต้ความดันสูง
- Vapor deposition คือ การทำให้สารละลายไอหรือมีสถานะเป็นก๊าซแล้วเกิดการกลั่นตัว หรือเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ผิววัตถุ เพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติทางกลไฟฟ้า ความร้อนสะท้อนแสงป้องกันสนิม และต้านทานการสึกกร่อน
- Vacuum coating คือ การเคลือบผิววัตถุในสภาพสุญญากาศหรือมีความกดอากาศน้อยทำให้ผิวเคลือบมีความบริสุทธิ์และไม่มีสารเจือปนเนื่องจากไม่มีก๊าซชนิดอื่นปะปน ส่วนมากใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเวเฟอร์อัญมณี ฟิล์มโลหะ และฟิล์มนำไฟฟ้าชนิดโปร่งใส เช่น แผงป้องกันผ้าที่กระจกฟิล์มป้องกันไฟฟ้าสถิตที่จอภาพ เป็นต้น ⁽³⁶⁻³⁷⁾



ภาพประกอบ 13 การชุบโลหะ ⁽³⁵⁾

2.4.2 มลพิษและผลกระทบจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ (Pollution and effect of industrial)

อุตสาหกรรมเกี่ยวกับโลหะเป็นอุตสาหกรรมประเภทหนึ่ง ที่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ มลพิษทางดิน มลพิษทางน้ำ มลพิษทางอากาศ กากของเสีย และมลพิษทางเสียง

ซึ่งอุตสาหกรรมแต่ละประเภทก่อให้เกิดปัญหามลพิษที่มีระดับความรุนแรงแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและวัตถุดิบที่ใช้แต่ละประเภท ซึ่งมลพิษและผลกระทบของอุตสาหกรรมเกี่ยวกับอุตสาหกรรมชุบโลหะ มีดังนี้

- มลพิษทางอากาศ

ในอุตสาหกรรมชุบโลหะการใช้สารเคมีหลายชนิดส่งผลโดยตรงต่อมลพิษทางอากาศในลักษณะกลิ่นหรือไอระเหยซึ่งโดยส่วนใหญ่จะแพร่กระจายอยู่ในบริเวณพื้นที่ปฏิบัติงานซึ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของพนักงาน ตัวอย่างเช่น กรดโครมิกในน้ำยาชุบสามารถเกิดการระเหยเป็นไอได้ง่ายและมีความเป็นพิษสูง เนื่องจากกรดโครมิกเป็นสารเคมีหลักที่ใช้สำหรับการชุบประเภทนี้ทำให้การแพร่กระจายตัวเกิดขึ้นสูงมาก ซึ่งเป็นอันตรายต่อชุมชนและสิ่งแวดล้อมภายนอกโรงงาน

- มลพิษทางน้ำ

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับขั้นตอนการล้างเพื่อกำจัดไขมันสนิมและน้ำยาชุบ ทั้งนี้น้ำที่ผ่านการใช้ในขั้นตอน ดังกล่าวจะกลายเป็นน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารเคมีประเภทกรดต่างไซยาไนด์ หรือโลหะหนักซึ่งโรงงานต้องบำบัดก่อนระบายทิ้งหรือส่งให้บริษัทเอกชนไปบำบัดแทน นอกจากนี้การใช้น้ำแบบไม่มีประสิทธิภาพ เกิดขึ้นจากวิธีการล้างที่ไม่เหมาะสม เช่น ใช้วิธีตักน้ำราดบนชิ้นงานโดยตรงหรือจุ่มชิ้นงานลงในบ่อหรือถังที่มีการเติมน้ำใหม่และเกิดการล้นอยู่ตลอดเวลา เป็นต้น

- กากของเสีย

การใช้สารเคมีส่งผลกระทบทางอ้อมต่อโรงงานโดยเฉพาะภาชนะหรือบรรจุภัณฑ์สารเคมีที่มีสารเคมีตกค้างอยู่ รวมทั้งกากตะกอนสารเคมีในบ่อชุบและน้ำยาชุบที่เสื่อมสภาพสิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นของเสียอันตรายที่ไม่สามารถนำไปกำจัดรวมกับกากของเสียทั่วไปได้ อีกทั้งกฎหมายในปัจจุบันยังได้กำหนดให้โรงงานต้องแจ้งรายละเอียดเกี่ยวกับของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นและการขออนุญาตนำของเสียดังกล่าวออกนอกบริเวณโรงงาน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โรงงานต้องให้ความสำคัญต่อการลดปริมาณของเสียอันตรายรวมทั้งการจัดการของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นอย่างถูกต้อง ⁽³⁷⁾

2.5 ทองคำ (Gold)

ทองคำเป็นโลหะที่มีค่ามากชนิดหนึ่ง มีสีเหลืองอร่าม มีประกายแวววาว ไม่หมองหรือเป็นสนิมเมื่อเก็บไว้นาน ๆ ทนทานต่อการสึกกร่อน และนำมาแปรรูปเพื่อใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ตามที่ต้องการ นิยมนำมาประดิษฐ์เป็นเครื่องประดับตกแต่งร่างกาย เช่น สร้อยคอ สร้อยข้อมือ แหวน กำไล นอกจากนี้ยังนำไปหล่อเป็นพระพุทธรูป หรือเป็นชิ้นส่วนของสิ่งประดิษฐ์ และเครื่องใช้ต่าง ๆ เช่น ปากกา นาฬิกาข้อมือ กรอบแว่นตา หัวเข็มขัด เป็นต้น

การเกิดของแร่ทองคำมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบปฐมภูมิ เกิดจากการสะสมตัวของแร่ทองคำอยู่ในหินชนิดต่าง ๆ และแบบทุติยภูมิหรือแบบลานแร่ เกิดจากการผุพังของหินที่มีแร่ทองคำสะสมอยู่ โดยอาจสะสมตัวอยู่ในที่เดิม หรืออาจถูกน้ำพัดพาไปสะสมตัวอยู่ตามเชิงเขาหรือลำน้ำในบริเวณ

ใกล้เคียง ซึ่งต้องสำรวจแหล่งแร่แล้วทำเหมืองขุดเจาะนำแร่ทองคำนั้นมาเข้าสู่กระบวนการแต่งแร่ให้ได้ทองคำบริสุทธิ์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ (38-39)

2.5.1 ลักษณะสมบัติเฉพาะของทองคำ (Specific properties of gold)

ทองคำมีชื่อเป็นภาษาอังกฤษโบราณว่า จีโอลู (Geolu) แปลว่า เหลืองอร่าม เปล่งปลั่ง อ่อน ยืดดึงได้ ภาษาอังกฤษในปัจจุบัน คือ โกลด์ (Gold) ซึ่งเป็นคำที่รู้จักกันเป็นอย่างดี ทองคำมักเกิดเป็นธาตุอิสระในธรรมชาติ แต่อาจผสมกับธาตุอื่น ๆ ทองคำเป็นโลหะที่ได้รับความนิยมสูงสุดในวงการเครื่องประดับ หรืออาจเรียกว่า ราชาแห่งโลหะ เพราะเป็นโลหะซึ่งมีสมบัติพื้นฐานที่โดดเด่นแตกต่างจากโลหะชนิดอื่น ๆ หลายประการ ดังนี้

1. ความมั่งคั่ง มันวาว ทองคำบริสุทธิ์ มีสีส้มเหลืองอร่าม มันวาว และความเงางามสม่ำเสมอ งดงามตลอดเวลา หากนำทองคำไปผสมกับโลหะชนิดอื่น จะทำให้โลหะผสมนั้นมีความมั่งคั่ง มันวาว รวมทั้งเพิ่มคุณค่าและมูลค่าให้แก่โลหะผสมนั้น
2. ความเหนียวและความคงทน ทองคำมีความคงทนสูง ไม่สึกกร่อนไปตามกาลเวลา ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีง่าย ทนต่อการกัดกร่อนของกรดและด่าง ไม่ขึ้นสนิม ไม่หมอง มีความเหนียวสูง สามารถดัดโค้ง ดึง รีด ยืด หลอม หรือตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ง่ายโดยไม่แตกหัก
3. ความหายาก ทองคำเป็นแร่ที่หายากมาก การสำรวจการทำเหมืองแร่ และการแต่งแร่ ล้วนแต่เป็นกระบวนการที่ต้องใช้บุคลากรที่มีความชำนาญหลายด้าน ใช้ต้นทุนสูง และใช้เทคโนโลยีขั้นสูง จึงทำให้ทองคำมีราคาสูง
4. การนำกลับมาใช้ประโยชน์ ทองคำเป็นแร่ที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ตลอด ทองคำที่นำมาใช้เป็นเครื่องประดับเป็นส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือเป็นส่วนประกอบในวัตถุอื่น ๆ สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก โดยกระบวนการหลอม การแยกสกัดให้ได้ทองคำบริสุทธิ์ และนำมาใช้ประโยชน์ได้อีกครั้งตามที่ต้องการ
5. มีจุดหลอมเหลวสูง เป็นตัวนำความร้อนและเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี

สมบัติทางกายภาพ

สมบัติทางกายภาพที่เป็นลักษณะเด่นของทองคำประกอบด้วยโลหะธรรมชาติ ซึ่งพบเป็นเกล็ด เม็ด หรือมีรูปร่างคล้ายกิ่งไม้ มีสีเหลืองเข้มหรือเหลืองอ่อน โดยมีลักษณะดังต่อไปนี้

- ความวาว มีสีเหลืองวาวแบบโลหะสี ผงสีเหลือง
- ความแข็ง 2.5-3.0 (มีดขีดได้)
- ความถ่วงจำเพาะ 19.3 (ทองคำบริสุทธิ์)
- ความเหนียว สามารถยืดเป็นเส้นหรือตีแผ่เป็นแผ่นบาง ๆ ได้

สมบัติทางเคมี

โดยธรรมชาติทองคำเป็นธาตุอิสระ แต่อาจเกิดผสมกับธาตุอื่น ๆ เช่น เงิน ทองแดง เหล็ก ซึ่งสมบัติทางเคมีของทองคำประกอบด้วยดังต่อไปนี้

- สูตรเคมี Au
- น้ำหนักอะตอม 196.967
- จุดหลอมเหลว 1,063 องศาเซลเซียส
- มีจุดเดือด 3,080 องศาเซลเซียส
- การละลายละลายได้ในกรดกัดทองเท่านั้น (38-39)

2.5.2 การเกิดแร่ทองคำ (Mineral formation of gold)

มี 2 แบบ คือ แบบปฐมภูมิ และแบบทุติยภูมิ

1. แบบปฐมภูมิ เป็นแหล่งแร่ทองคำที่เกิดจากกระบวนการทางธรณีวิทยา ทำให้เกิดการสะสมตัวของแร่ทองคำในหินชนิดต่าง ๆ อาจฝังประหรือเป็นสายแร่ในหินแหล่งแร่ทองคำที่พบในประเทศไทยที่สำคัญ ได้แก่ แหล่งโตะโมะ จังหวัดนราธิวาส แหล่งชาติรี จังหวัดพิจิตร-เพชรบูรณ์ แหล่งเขาสามสิบ จังหวัดสระแก้ว
2. แบบทุติยภูมิ เรียกอีกอย่างว่า แหล่งแร่ทองคำแบบลานแร่ เกิดจากการผุพัง ของหินที่มีแร่ทองคำเป็นส่วนประกอบ ซึ่งจะเป็นเม็ดกลมหรือเกล็ดเล็ก ๆ อาจพบในที่ใกล้เคียงกับแหล่งปฐมภูมิ โดยการถูกน้ำชะล้างพัดพาไปสะสมในบริเวณที่เหมาะสม เช่น เชนเขา ลำห้วย แหล่งแร่ที่พบในประเทศไทย ได้แก่ บ้านป่าร่อน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ บ้านนาล้อม จังหวัดปราจีนบุรี บ้านทุ่งฮั่ว จังหวัดลำปาง (38-39)

2.5.3 การใช้ประโยชน์จากทองคำ (Application of gold)

ทองคำเป็นโลหะที่มีค่าสูง สามารถนำมาใช้ทำประโยชน์ได้หลากหลาย การใช้ประโยชน์จากทองคำในด้านหลัก ๆ มีดังนี้

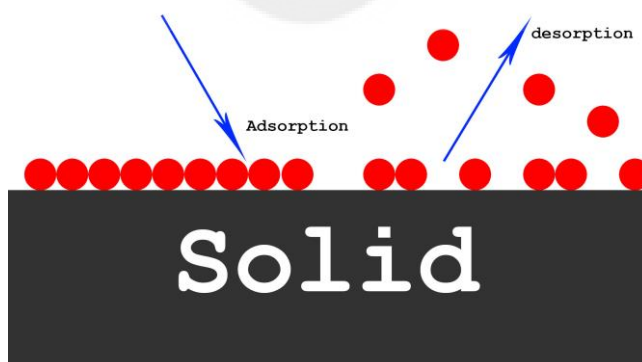
1. ด้านเครื่องประดับ ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับเป็นการใช้ประโยชน์จากทองคำมากที่สุด มนุษย์ได้นำทองคำมาทำเป็นเครื่องประดับตั้งแต่สมัยโบราณ เช่น แหวน สร้อยคอ ต่างหู กำไล ผู้ที่มีทองคำหรือเครื่องประดับทองคำ ไว้ในครอบครองแสดงถึงอำนาจและความมั่งคั่ง ปัจจุบันเทคโนโลยีมีความก้าวหน้า จึงนำทองคำมาทำเป็นเครื่องประดับได้หลากหลายรูปแบบ สามารถซื้อ-ขายและครอบครองได้ง่ายขึ้น
2. ทางด้านอวกาศ เนื่องจากทองคำมีความหนา 0.000001 นิ้ว และมีสมบัติช่วยสะท้อนรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ไม่ทำให้ทำลายหรือลดประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ จึงมีการนำทองคำมาเป็นส่วนผสมของชุดนักบินอวกาศและแคปซูล

เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกับรังสีในอวกาศที่มีพลังงานสูงหรือนำไปเคลือบหมวกเหล็กเกราะบังหน้าและอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในอวกาศ

3. อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และด้านการสื่อสารโทรคมนาคม เป็นการนำทองคำมาใช้เป็นส่วนประกอบในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สวิตช์ โดยการใช้ลวดทองคำขนาดเล็กเชื่อมต่อกับวัสดุกึ่งตัวนำในหลอดสุญญากาศใช้ลวด ทังสเตนและโมลบดีนิ่มเคลือบทองคำ ส่วนประโยชน์ในด้านการสื่อสารโทรคมนาคม เช่น เคลือบผิวเสาอากาศด้วยทองคำและในเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์ มีส่วนประกอบที่ใช้อะลูมิเนียมเคลือบทองคำ
4. ด้านทันตกรรม ทองคำไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้ในการทำฟันปลอม อุดฟัน ครอบฟัน จัด ฟัน และตัดฟัน
5. เป็นหลักประกันความมั่นคงทางการเงิน การคลัง ทองคำถูกเก็บสำรองไว้เป็นทุนสำรองเงินตราระหว่างประเทศ เพราะทองคำมีความมั่นคงในมูลค่าไม่ผันผวนมาก ⁽³⁸⁻³⁹⁾

2.6 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ คือ กระบวนการที่สารดูดซับถูกดึงโมเลกุลเข้ามาติดกับผิวของตัวดูดซับ เช่น ของเหลวกับ ของเหลว หรือของแข็งกับของเหลว ดังแสดงในภาพประกอบ 14 แล้วทำให้ความเข้มข้นของสารในระบบลดลง โมเลกุลตัวถูกละลายที่ไปเกาะเรียกว่า สารถูกดูดซับหรือตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และผิวที่สัมผัสเกาะจับกับสารถูกดูดซับ เรียกว่า วัสดุดูดซับหรือตัวดูดซับ (Adsorbent) ⁽⁴⁰⁾



ภาพประกอบ 14 การดูดซับระหว่างของแข็งกับของเหลว ⁽⁴¹⁾

กระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดิน หรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการที่เกิดขึ้นเองโดยมนุษย์ เช่น การใช้ ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ การใช้ดินเหนียวดูดซับ ยาฆ่าแมลงในดินหรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน โดยกระบวนการดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง สารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) หรือเรียกว่า “Physisorption” เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ เป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) เกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ซึ่งไม่แข็งแรงและต้องไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงพันธะเคมีทั้งตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ มักจะเกิดในสภาวะอุณหภูมิต่ำและพลังงานที่ใช้ในการดูดซับต่ำ นอกจากนี้ตัวดูดซับและสารถูกดูดซับสามารถเกิดแบบหลายชั้น (Multilayers) บนพื้นผิวของตัวดูดซับและโมเลกุลของสารถูกดูดซับสามารถหลุดออกจากผิวได้ นั่นคือ ตัวถูกดูดซับหลุดออกจากตัวดูดซับ ซึ่งกระบวนการย้อนกลับของการดูดซับนี้ เรียกว่า การคายซับ (Desorption)

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) หรือเรียกว่า “Chemisorption” แตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กล่าวคือ เป็นแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับเป็นการสร้างพันธะเคมีระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับกับสารถูกดูดซับปฏิกิริยาการดูดซับไม่สามารถผันกลับได้ โดยพบว่าจะมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Electron Transfer) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (Electron Shear) ทำให้มีความแข็งแรงกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์และโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเกาะบนผิวหน้าของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer) การดูดซับแบบนี้เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิสูงและพลังงานที่ใช้ในการดูดซับค่อนข้างสูง ซึ่งการคายซับของโมเลกุลเกิดขึ้นได้ยาก (40,42-43)

ตาราง 2 การเปรียบเทียบการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี⁽⁴⁴⁾

ปัจจัย	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสาร ถูกดูดซับกับผิวตัวดูดซับ	แรงแวนเดอร์วาลส์	แข็งแรง แรงจากพันธะเคมี
พลังงานในการดูดซับ	ต่ำ (< 85 กิโลจูลต่อโมล)	สูง (> 85 กิโลจูลต่อโมล)
สภาวะที่เกิดการดูดซับ	อุณหภูมิต่ำ (ใกล้เคียงกับสภาวะในการ ควบแน่นของแก๊ส)	อุณหภูมิสูง
ลักษณะการดูดซับ	รวดเร็ว (ไม่มีพลังงานกระตุ้นหลายชั้น)	ช้า (มีพลังงานกระตุ้นชั้นเดียว)
กระบวนการดูดซับ	ผันกลับได้	ผันกลับไม่ได้
การใช้งาน	พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน	จุลนพลศาสตร์

2.6.1 กลไกการดูดซับ (Mechanism of adsorption)

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้าย (Mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายังของแข็งหรือของเหลว การเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับ (Absorbate) ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างสารถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับการเกาะติดในระยะที่ 3 อาจจะเกาะติดบนผิวด้วยแรงทางฟิสิกส์หรือเคมีใน กระบวนการกำจัดน้ำเสียการดูดซับจะพิจารณาเฉพาะการเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์มากกว่าแรงทางเคมี^(40,42-43)

2.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (Effective factors of adsorption)

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ คือ ธรรมชาติของตัวดูดซับและสารถูกดูดซับ

2.6.2.1 ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับธรรมชาติของตัวดูดซับเป็นปัจจัยหลักปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ได้แก่

1. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่พื้นที่ผิวโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบาย

ความสามารถการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น

2. ขนาดของตัวดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ การลดขนาดของตัวดูดซับให้มีขนาดเล็ก ทำให้อัตราในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารที่มีขนาดใหญ่ เคมีที่ผิวหน้าหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมีสมบัติที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์และหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด ความสามารถในการดูดซับจะลดลงด้วย

2.6.2.2 ธรรมชาติของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับธรรมชาติของตัวดูดซับจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับดังนี้

1. ความสามารถในการละลายที่สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลง เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้น ต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายก่อน

2. น้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลมีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อน้ำหนักโมเลกุล และขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น

3. ความมีขั้ว (Polarity) ของโมเลกุล นอกจากธรรมชาติของโมเลกุลของสารแล้วยังขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและตัวดูดซับของสารด้วยซึ่งความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความมีขั้วจะความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

4. ผลของ $[H^+]$ หรือค่า pH ถ้า $[H^+]$ ลดลงอัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เพราะเมื่อ $[H^+]$ เพิ่มขึ้น และยังสามารถเกาะติดผิวคาร์บอน เช่น ถ่านกัมมันต์ได้ดี ทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลางเสมอ เนื่องจากคาร์บอนที่ไม่มีขั้วค่อนข้างจะมีประจุลบเล็กน้อยจึงทำให้โมเลกุลไม่มีขั้ว (Non-polarity) ของสารในน้ำมาเกาะ ที่ผิวคาร์บอนได้ดี ซึ่ง pH มีผลต่อความสามารถดูดซับ

5. ผลของอุณหภูมิถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับที่ผิวจะลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

6. ความดันป่วนอัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ Film diffusion หรือ Pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความดันป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความดันป่วนต่ำฟิล์มน้ำล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนาแน่นมากทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่จะเข้าไปในตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับในทางตรงกันข้าม ถ้ามีความดันป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับความดันป่วนในถังการดูดซับ คือความเร็วของน้ำที่ผ่านถึงต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้นเนื่องจากความดันป่วนสูง (40,42-43)

2.6.3 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

สมดุลการดูดซับ คือ สภาวะที่จำนวนโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) เคลื่อนที่เข้ามาบนผิวของ ตัวดูดซับ (Adsorbent) และออกจากบริเวณผิวของตัวดูดซับมีจำนวนเท่ากัน อัตราการดูดซับและการหลุดออกจะเข้าสู่สภาวะคงที่ (Equilibrium state) หรือเรียกว่า สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium) ที่จุดนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ คือ สารละลายจะมีค่าคงที่ สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของสมดุล แต่ระบบขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดของสารที่ถูกดูดซับ ชนิดของตัวดูดซับ ตัวทำละลาย ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็นต้น ที่จุดสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ สารที่ถูกละลายจะอยู่ใน 2 เฟส คือ สารที่ถูกละลายบนวัสดุดูดซับและสารที่ถูกละลายในสารละลาย ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับและปริมาณสารดูดซับบนตัวดูดซับ เรียกว่า ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ปรากฏการณ์การดูดซับที่เกิดขึ้นนิยมนิยามด้วย ทฤษฎีของทฤษฎีฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm) ทฤษฎีแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และจลนศาสตร์ (Adsorption kinetic) ของการดูดซับ (40,42-43,45-46)

2.6.3.1. แลงเมียร์ไอโซเทิร์ม (Langmuir adsorption isotherm)

ปี ค.ศ. 1916 ศ.เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) และมีความเป็นเนื้อเดียวกันในการดูดซับ (Homogeneous) ภายใต้สมมุติฐานดังนี้ “การดูดซับจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอนและเกิดได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer) ด้วยพลังงานในการดูดซับมีค่าคงที่ (Energy of adsorption is constant) โมเลกุลไม่มีการเคลื่อนย้ายตำแหน่ง (No migration) ทำให้ปริมาณของสารที่ทำการดูดซับถูกจำกัดด้วยพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ” เป็นกระบวนการดูดซับทางเคมีจากสมมุติฐานดังกล่าวสามารถอธิบายสมการแลงเมียร์จากความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับบนตัวดูดซับ ดังแสดงในสมการ 1

$$q_e = \frac{q_m \cdot bC_e}{1 + bC_e}$$

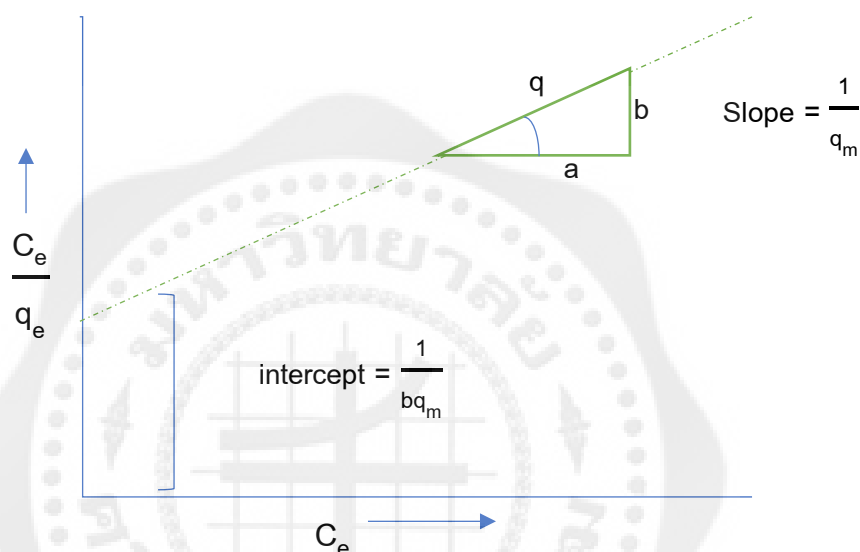
สมการ 1

- เมื่อ q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (mg/g)
 q_m คือ ค่าคงที่ของการดูดซับตามสมการแลงเมียร์
 b คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียว
 C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ สภาวะสมดุล (mg/L)

ความสามารถสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียว (b) และค่าคงที่ของการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ (q_m) คำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ และ C_e โดยค่าความชันคือ $\frac{1}{q_m}$ และ จุดตัดแกน y (Intercept) คือ $\frac{1}{bq_m}$ ตามสมการ 2 และภาพประกอบ 15

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{bq_m}$$

สมการ 2



ภาพประกอบ 15 ลักษณะกราฟของแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม (Langmuir adsorption isotherm) ⁽⁴⁵⁻⁴⁶⁾

2.6.3.2. ฟรอนด์ลิชไอโซเทิร์ม (Freundlich adsorption isotherm)

ในปี ค.ศ. 1909 Finlay Freundlich สามารถอธิบายการดูดซับของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ฟรอนด์ลิชไอโซเทิร์ม เป็นไอโซเทิร์มที่พัฒนาจากแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม พื้นผิวของวัสดุดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous adsorption surface) พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ในสถานะที่การดูดซับบนผิววัสดุดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) ทำให้วัสดุดูดซับสามารถดูดซับสารได้เรื่อย ๆ อย่างไม่มีขีดจำกัดหรือไม่เกิดจุดอิ่มตัวของวัสดุดูดซับ เป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพ สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับบนวัสดุดูดซับแบบหลายชั้น ดังสมการ 3

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}}$$

สมการ 3

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (mg/g)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ สภาวะสมดุล (mg/L)

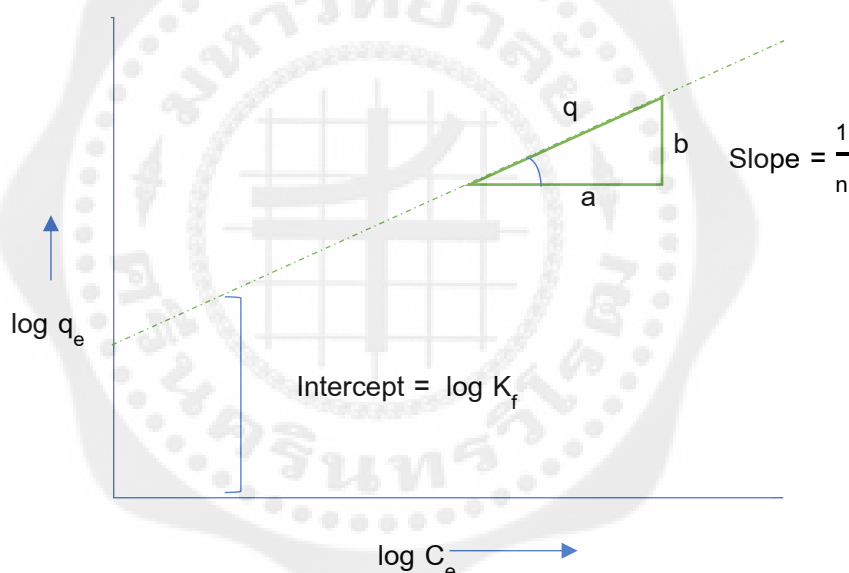
n คือ ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (Freundlich intensity parameter) (L/mg)

K_f คือ ค่าคงที่สมการการดูดซับแบบหลายชั้นของฟรอนด์ลิช

จากสมการ 3 สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเส้นตรงได้ดังแสดงในสมการ 4

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_f \quad \text{สมการ 4}$$

ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (n) และค่าคงที่สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (K_f) คำนวณได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ และ $\log C_e$ โดยความชัน (Slope) คือ และจุดตัดแกน y (Intercept) คือ $\log K_f$ ตามสมการ 4 และภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 ลักษณะกราฟของฟรอนด์ลิชไอโซเทิร์ม (Freundlich adsorption isotherm) ⁽⁴⁵⁻⁴⁶⁾

โดยสามารถสังเกตความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับได้จากลักษณะของกราฟที่ได้จากค่า $\frac{1}{n}$ ได้ดังนี้

ถ้า $\frac{1}{n} = 1$ แสดงว่าไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นเส้นตรง

ถ้า $\frac{1}{n} > 1$ แสดงว่าความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะมากหรือกล่าวได้ว่า บริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีประมาณมากในการดูดซับ

ถ้า $\frac{1}{n} < 1$ แสดงว่าความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของ

ความเข้มข้น C_e หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ ⁽²⁸⁾

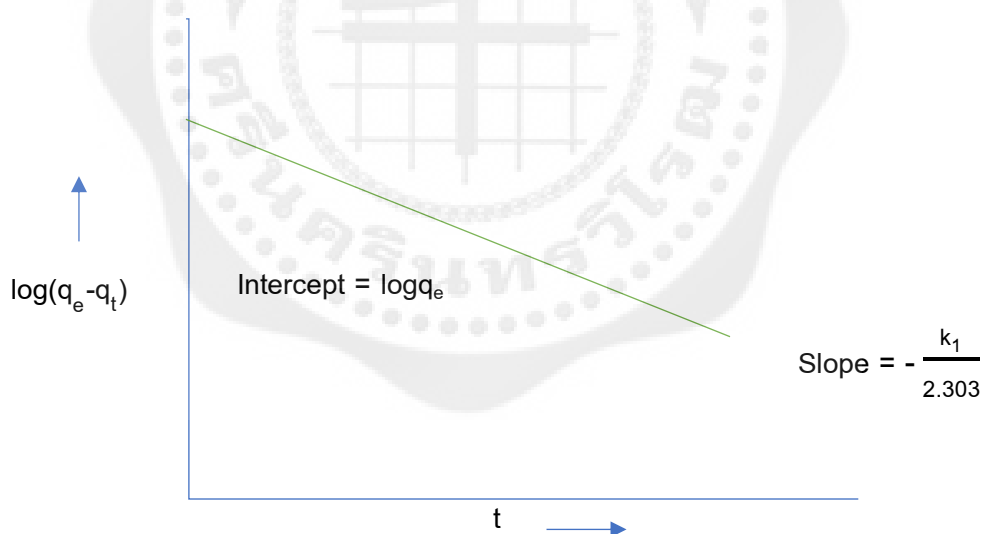
2.6.3.3 จลนศาสตร์การดูดซับ (Kinetic of adsorption)

เป็นการศึกษาอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการดูดซับโดยใช้แบบจำลอง Lagergren's pseudo-first-order และ Ho's pseudo-second-order สมการปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) ดังสมการ 5 และ 6

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad \text{สมการ 5}$$

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad \text{สมการ 6}$$

- เมื่อ q_e คือ ปริมาณในการดูดซับ ณ เวลาสมดุล (mg/g)
 q_t คือ ปริมาณในการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (mg/g)
 k_1 คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order)
 t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)



ภาพประกอบ 17 ลักษณะกราฟของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) ⁽⁴⁵⁻⁴⁶⁾

นำข้อมูลจากการศึกษาผลความเข้มข้นและอุณหภูมิของการดูดซับจากสมการ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t ได้กราฟเส้นตรงแสดงในภาพประกอบ 17 ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) หาได้จากความชัน (Slope) คือ $-\frac{k_1}{2.303}$ และ q_e สามารถหาจุดตัดของเส้นตรงได้ สมการปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo-second order) ดังแสดงในสมการ 7 และ 8

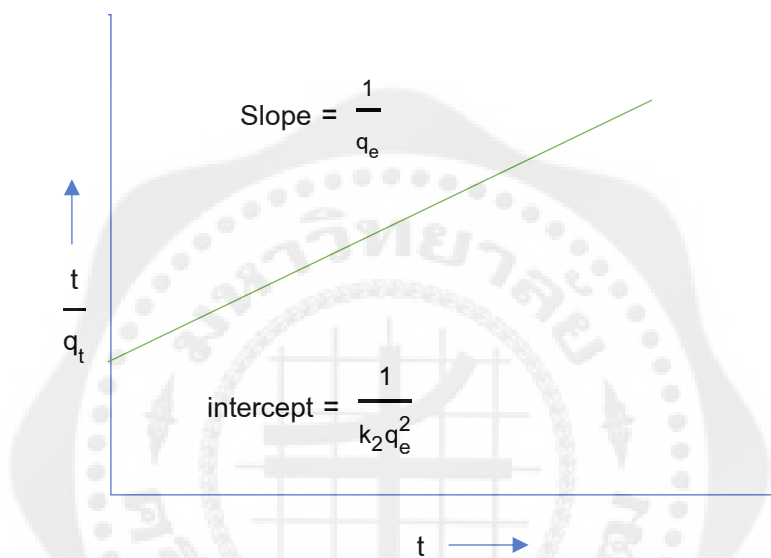
$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)$$

สมการ 7

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

สมการ 8

เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo-second order)



ภาพประกอบ 18 ลักษณะกราฟของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo-second order) ⁽⁴⁵⁻⁴⁶⁾

นำข้อมูลผลความเข้มข้นและอุณหภูมิของการดูดซับจากสมการ 8 มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{t}{q_t}$ กับ t จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในภาพประกอบ 18 ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo-second order) (k_2) สามารถหาได้จากจุดตัดแกนเส้นตรง (Intercept) คือ $\frac{1}{k_2 q_e^2}$

(40,42-43,45-46)

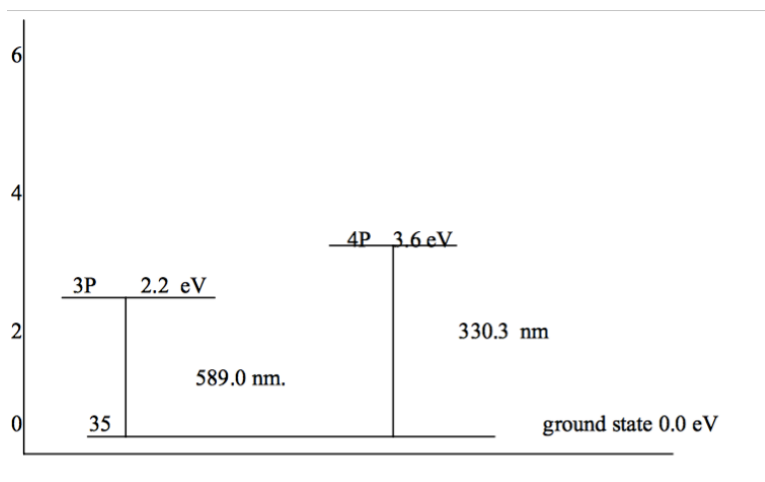
2.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Instrument technique)

2.7.1 เครื่องอะตอมมิกแอสซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer)

การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในสารละลายโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอสซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุอย่างหนึ่งซึ่งสามารถทำได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยเป็นที่นิยมมากวิธีหนึ่ง เพราะเป็นเทคนิคที่สะดวกรวดเร็ว มีความเที่ยง ความแม่นยำต่อปริมาณธาตุโลหะที่ต้องการทดสอบ และเป็นเทคนิคเฉพาะสามารถวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโลหะหนักที่มีจำนวนน้อย ๆ ในน้ำเสียได้ และไม่ต้องผ่านกรรมวิธีหลายขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างน้ำก่อนการวิเคราะห์ และมีค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ไม่สูงมากนัก ดังนั้นห้องปฏิบัติการวิเคราะห์จึงนิยมใช้เทคนิคนี้ ซึ่งเครื่องอะตอมมิกแอสซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์มีความสามารถวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ได้ถึง 67 ธาตุ ทำให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถแบ่งขั้นตอนดังนี้

2.7.1.1. หลักการ

นำตัวอย่างที่เตรียมในรูปของสารละลายมาดูด (Aspirate) เข้าไปในเปลวไฟ Air-Acetylene ของเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer โดยใช้พลังงานความร้อนจากเปลวไฟทำให้สารละลายตัวอย่างเกิดกระบวนการแตกตัว (Dissociation) หรือเปลี่ยนให้เป็นไอ (Vaporization) หรืออาจแตกตัวเป็นอะตอม (Atomization) อยู่ที่สภาวะพื้น อะตอมที่สภาวะ พื้นจะเปลี่ยนสถานะไปสู่สภาวะกระตุ้นโดยการดูดกลืนแสงที่ผ่านมาจากแหล่งกำเนิดภายนอก (Hollow Cathode Lamp) ที่ความยาวคลื่นที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ ธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับของพลังงานแตกต่างกันจึงมีการดูดกลืนพลังงานแตกต่างกัน ซึ่งธาตุแต่ละตัวจะดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นต่างกัน เกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปสู่สถานะกระตุ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 19 จะเห็นได้ว่าที่ความยาวคลื่นเหล่านี้จัดเป็น Spectroscopic line ของอะตอมมิกสเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด สำหรับการวัดตัวอย่าง การดูดกลืนแสงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุที่มีอยู่ในสารละลายตัวอย่าง ซึ่งความเข้มข้นของธาตุในสารละลายตัวอย่าง จะหาได้โดยการวัดเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน



ภาพประกอบ 19 ระดับของพลังงานของอะตอมโซเดียม ⁽⁴⁷⁾

2.7.1.2. ความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดกับความเข้มข้นของสารตัวอย่าง

สรุปได้ว่า Total Absorption ขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมที่สภาวะพื้นโดยไม่ขึ้นอยู่ กับอุณหภูมิและพลังงาน ΔE แต่จะเห็นได้ว่าจำนวนอะตอมทั้งหมด = $N_0 + N_j$ แต่ N_j มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ N_0 ดังนั้น N_0 จึงเป็นปฏิกิริยาต่อจำนวนอะตอมทั้งหมด, ปริมาณของธาตุที่ต้องการหาในสารละลายและความเข้มข้นของสารละลาย

ดังนั้น $\log P_0/P_j$ เป็นปฏิกิริยากับ N_0 หรือ Absorbance เป็นปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log P_0/P_j$ หรือแอมพลิจูดกับ N_0 หรือความเข้มข้นของสารละลายจะได้เส้นตรงแต่ในหลาย ๆ กรณีจะได้กราฟเป็นเส้นโค้ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก Stay light, Line broadening ความไม่สม่ำเสมอหรือคงที่ของ อุณหภูมิและโครงสร้างของเปลวไฟ เป็นต้น

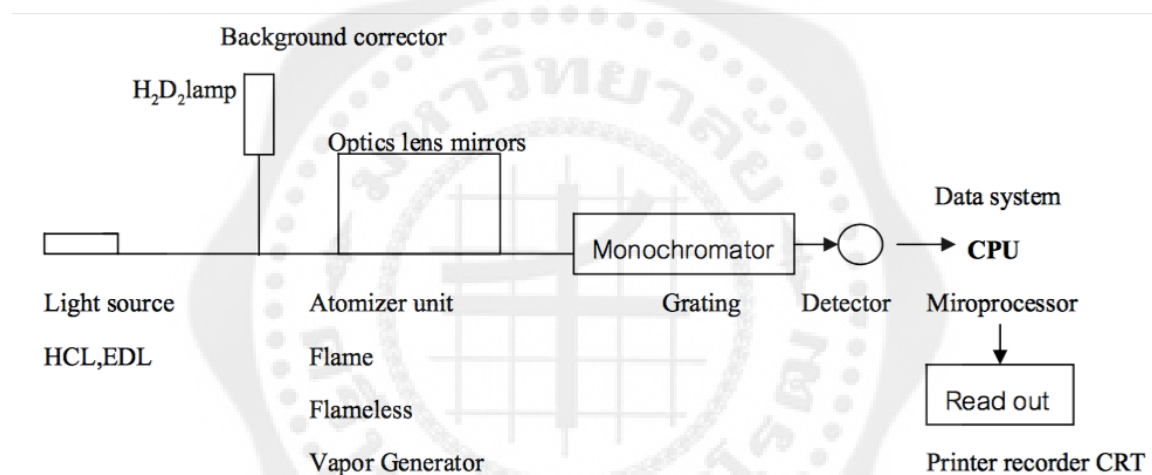
2.7.1.3. เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอมพลิจูดสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer) ได้แก่

- Flame atomization technique เป็นเทคนิคที่ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่าง แตกตัวเป็นอะตอมด้วยเปลวไฟ (Flame) ที่เหมาะสม
- Flameless technique หรือ Non-flame atomization technique เป็นเทคนิคที่ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างสลายตัวเป็นอะตอมได้ด้วยความร้อนจาก กระแสไฟฟ้า (Electrothermal atomizer หรือ Graphite furnace) โดยสามารถ ให้อุณหภูมิของการเผามีค่าต่าง ๆ กัน และใช้เวลาต่าง ๆ กันได้
- hydride generation technique เนื่องจากมีธาตุบางชนิดจะเปลี่ยนให้เป็น อะตอม ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีทำให้ธาตุเหล่านี้กลายเป็นไอได้ง่าย ๆ

ที่อุณหภูมิห้องด้วยการรีดิวซ์ให้เป็นไฮไดรด์ แล้วให้ไฮไดรด์นั้นผ่านเข้าไปในเปลวไฟไฮโดรเจนความร้อนจากเปลวไฟไฮโดรเจนทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมอิสระ เทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ As, Se, Te, Ge, Bi, Sb

- Cold vapor generation technique สำหรับเทคนิคนี้เหมาะที่จะใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นไอได้ง่าย ๆ ซึ่งได้แก่การวิเคราะห์ปรอทที่มีปริมาณน้อยโดยเฉพาะ

เพื่อความเข้าใจถึงขั้นตอนของเทคนิคการวิเคราะห์ทางเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer) ตลอดทั้งหน้าที่ของส่วนต่าง ๆ ของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer) โดยจะอธิบายพอสังเขป (ภาพประกอบ 20) ดังต่อไปนี้



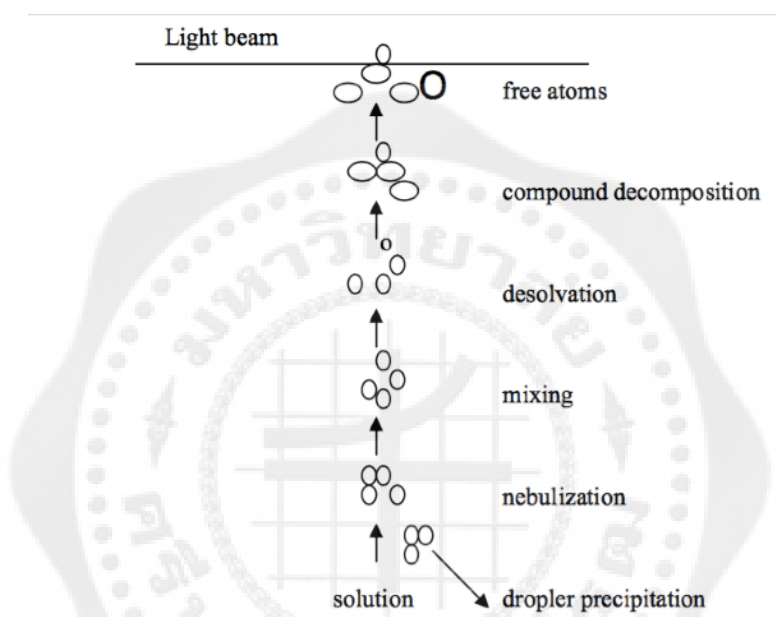
ภาพประกอบ 20 แผนภาพองค์ประกอบของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer) ⁽⁴⁷⁾

2.7.1.4. องค์ประกอบที่สำคัญต่าง ๆ ของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์มี 5 ส่วน

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source) โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดแสงใช้เป็น Hollow cathode lamps (HCL) และ Electrodeless discharge lamps (EDL) ซึ่งมีใช้เฉพาะบางธาตุเท่านั้น ทั้งสองชนิดนี้มีสมบัติและลักษณะเฉพาะแตกต่างกัน
2. ส่วนที่ทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมเสรี (Atomizer) ส่วนที่อะตอมให้เป็นอะตอมเสรี (The atomization process หรือ Atomizer) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS นั้นจะประสบความสำเร็จมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณของอะตอมเสรีของธาตุที่ทำให้เกิดขึ้น โดยเลือกใช้ความยาวคลื่นของแสงที่

เหมาะสมผ่านเข้าไปตั้งนั้นความสำคัญ จึงอยู่ที่การทำให้ธาตุที่มีอยู่ในสารละลายตัวอย่าง แตกตัวเป็นอะตอมเสรีที่สถานะพื้นได้มาก ๆ วิธีที่นิยมใช้ คือ กระบวนการทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมเสรีด้วยเปลวไฟ (Flame atomization) ภาพประกอบ 21

3. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator)
4. ดีเทคเตอร์ (Detector)
5. เครื่องประมวลผลและอ่านผล (Data system and read-out units)



ภาพประกอบ 21 Flame atomization process กระบวนการทั้งห้า ⁽⁴⁷⁾

2.7.1.5. ขั้นตอนของการทำวิเคราะห์ด้วยเทคนิคของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer)

2.7.1.6. การวิเคราะห์สารตัวอย่างนั้นถ้าตัดสินใจที่จะใช้เทคนิคของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer) มีขั้นตอนต่าง ๆ ควรเตรียมความพร้อมดังนี้

1. เตรียมสารตัวอย่างให้อยู่ในรูปสารละลายที่เหมาะสม และพร้อมที่จะใช้กับเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer)
2. พิจารณาว่าจะทำการวิเคราะห์เพื่อหาอะไร และเลือกวิธีการที่เหมาะสมทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์

3. จัดเครื่องมือให้พร้อมที่จะทำงานได้
4. การทำคุณภาพ (qualitative analysis) วิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิก แอ็บซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer) โดยทั่วไปแล้วเทคนิคอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer) นั้นไม่เหมาะสมที่จะใช้สำหรับทำคุณภาพวิเคราะห์ เพราะเสียเวลาไม่สะดวกเนื่องจากต้องเปลี่ยน HCL และต้อง scan ความยาวคลื่นประกอบกับค่าใช้จ่ายสูงจึงไม่นิยมใช้สำหรับตรวจหา อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้สามารถใช้ได้ เช่น ต้องการตรวจสอบว่าสารละลายตัวอย่างมี Ni เป็นองค์ประกอบหรือไม่ เราก็ใช้ HCL เป็น Ni และใช้ Flame (Air/C₂H₂) เป็น Atomizer ใช้ความยาวคลื่นของธาตุ Ni คือ 232 nm สำหรับตรวจวัด หลังจากนำสารละลายตัวอย่างพ่นเข้าไปในเปลวไฟแล้วดูว่าที่ความยาวคลื่น 232 nm มีการดูดกลืนแสงหรือไม่ถ้ามีแสดงว่าสารตัวอย่างมีธาตุ Ni แต่ถ้าไม่มีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นนี้แสดงว่าสารตัวอย่างไม่มี Ni ดังนั้นถ้าต้องการตรวจหาธาตุใดก็สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน

2.7.1.7. การทำคุณภาพ (qualitative analysis) วิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer)สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

1. Calibration method ใช้ในกรณีที่สารตัวอย่างไม่ค่อยมีสิ่งรบกวนและสารตัวอย่าง เจือจางทำการวิเคราะห์ได้โดยเทียบกับสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนแล้ว เป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่ว ๆ ไป โดยปรับสัญญาณที่ได้จาก Blank ให้เป็นศูนย์แล้วจึงวัดค่าแอ็บซอร์เบ้นซ์ของสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (4-5 ความเข้มข้น) เมื่อใช้ Flameless atomization technique อาจใช้วัด Peak area หรือความสูงของพีค (Peak height) แล้วนำผลมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายจะได้ Calibration curve ซึ่งอาจเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งก็ได้ การเขียนกราฟอาจใช้เครื่องคอมพิวเตอร์หรือเครื่องคำนวณทำงานให้ถ้าเป็นเส้นตรง Least squares fit แต่ถ้าเป็นเส้นโค้งอาจให้เครื่องลากเส้นโค้งให้ได้ Calibration curve ใช้ได้เฉพาะการวิเคราะห์แต่ละครั้งเท่านั้นเพราะ Parameter ต่าง ๆ ที่ใช้อาจเปลี่ยนแปลงได้
2. ใช้ Factor method วิธีนี้ใช้ได้เมื่อ Calibration curve เป็นเส้นตรงโดยนำสารละลาย มา 2 ส่วน เท่า ๆ กัน (X และ Y) และมีปริมาตร V_x นำส่วน X มาเติมสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นเป็น C_s ลงไป ปริมาตร V_s สำหรับส่วน Y นำมาเติมสารละลาย (อาจเป็นน้ำหรือกรด) ลงไปในปริมาตร V_s แล้วนำสารละลายทั้ง 2 ส่วนไปวัดค่าแอ็บซอร์เบ้นซ์ ได้เป็น A_x และ A_y

ตามลำดับ ถ้าให้ความเข้มข้นสารละลาย เป็น C_u จะคำนวณหาความเข้มข้นได้จากสมการ

$$C_u = A_y V_s C_s / (A_x - A_y) V_z \quad \text{สมการ 9}$$

วิธีนี้ต้องควบคุมสภาวะต่าง ๆ ดังนี้

- 2.1. Calibration curve จะต้องเป็นเส้นตรง
- 2.2. ค่าแอมพลิจูดที่วัดได้ คือ ควรจะต้องเป็นประมาณ 2 เท่าของ A
- 2.3. V_s ควรน้อยกว่า V_z มาก ๆ เพื่อมิให้เกิดการเจือจางของสารละลายตัวอย่างมากเกินไป เนื่องจากการเติมสารมาตรฐาน
- 2.4. ความเข้มข้นของสารมาตรฐาน C_s ควรมากกว่าความเข้มข้นของสารตัวอย่าง C_u มาก ๆ
3. ใช้ Standard addition method เป็นวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับ Matrix effects และ Interferences เพราะว่า Calibration curve ในการวิเคราะห์สารนั้นสัญญาณที่วัดได้ไม่ใช่เป็นแต่เพียงสารที่ทำการวิเคราะห์เท่านั้น แต่มันรวมถึงสัญญาณต่าง ๆ จากสารอื่นที่มีอยู่ในตัวอย่างด้วยทำได้โดยแบ่งสารละลายตัวอย่างออกเป็น 4-5 ส่วนนำแต่ละส่วนมาเติมสารมาตรฐานที่มีความเข้มข้นเท่ากัน นำไปวัดค่าแอมพลิจูดและเขียนกราฟกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมลงไปด้วย Least-square fit ความเข้มข้นของสารตัวอย่างหาได้จากการ Extrapolating
4. ใช้วิธีทำให้เจือจาง Dilution method วิธีนี้ใช้กับสารตัวอย่างที่มี Interferences โดยเฉพาะกรณีที่เกิด Enhancement คือค่าแอมพลิจูดจะวัดได้มากกว่าปกติ เนื่องจากเกิดไอออไนเซชัน ทำได้โดยการเติมสารละลายที่ประกอบด้วยธาตุที่ไอออไนส์ง่าย ๆ ลงไปในสารละลายตัวอย่างและสารละลายมาตรฐาน
5. ใช้วิธี Internal standard method วิธีนี้อาศัยหลักการเติมสารมาตรฐาน (Reference element) ซึ่งเป็นคนละธาตุกับสารที่จะวิเคราะห์ลงไปในตัวอย่างและ Blank หลังจากวัดค่าแอมพลิจูดแล้วหาอัตราส่วนของแอมพลิจูดระหว่างสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน (A_x / A_y) จากนั้นเขียนกราฟกับความเข้มข้นของธาตุที่จะทำการวิเคราะห์จะได้ Calibration curve เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง
 - 5.1. สารตัวอย่างต้องไม่มีธาตุที่ใช้เป็นมาตรฐาน (Reference element)
 - 5.2. ทั้งสารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะต้องมีลักษณะและสมบัติทางเคมีเหมือนกัน

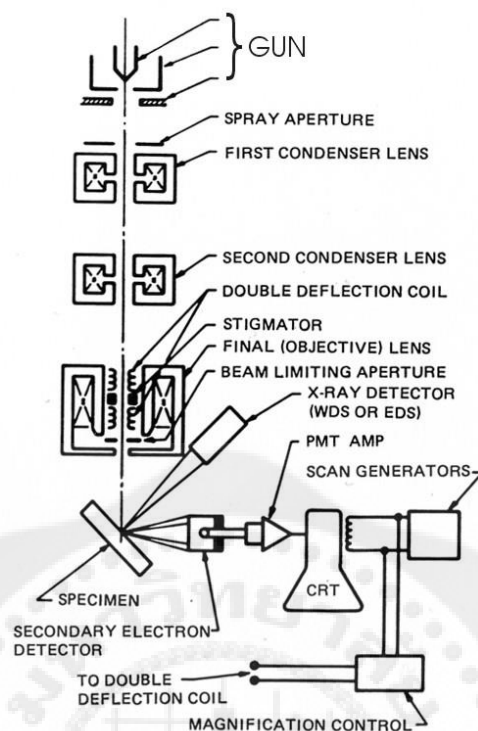
2.7.1.8. ผลกระทบของสิ่งรบกวนต่อการวิเคราะห์ (Interference Effects) ถึงแม้ว่าเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างเฉพาะมากทั้งแหล่งกำเนิดและการดูดกลืนแสง แต่ก็มีโอกาสที่สเปกตรัมของธาตุอื่นที่ปนอยู่มารบกวนได้ทำให้ค่า Absorbance วัด ได้มากหรือน้อยกว่าปกติ สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลวิเคราะห์ผิดพลาดได้ จะช่วยทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาดน้อยที่สุด สิ่งรบกวนสามารถจำแนกได้ ดังนี้

1. Physical effects เป็นผลเนื่องจากสมบัติทางกายภาพของสารละลายที่จะวิเคราะห์ ซึ่งไปเกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของสารละลายเข้าไปใน nebulizer ขนาดของหยดสารละลาย (Drop size) ได้แก่ Volatility ของตัวสารละลาย Surface tension, Viscosity ซึ่งสามารถแก้ไขได้คือทำให้สารละลายเจือจางลงหรือเติม Organic solvents หรือเตรียมสารละลายให้มี Matrix อย่างเดียวกับสารตัวอย่าง
2. Chemical effects ได้แก่ แอนไอออน เช่น ฟอสเฟต ซัลเฟต อะลูมิเนียม ซิลิเกตทำให้ผลการหาปริมาณของพวก Alkaline earth metals ได้น้อยกว่าปกติเมื่อใช้ Air-CH flame หรือ Flame temperature ต่ำ เพราะมีการเกิดสารประกอบที่อยู่ตัวบางชนิด เรียกว่า Refractory compound จึงทำให้การแตกตัวเป็นอะตอมของธาตุที่จะวิเคราะห์น้อยกว่า⁽⁴⁷⁻⁴⁸⁾

2.7.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบให้ได้ข้อมูลลักษณะพื้นผิวปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรืออาจบันทึกภาพที่บนแผ่นฟิล์มภาพที่ถูกบันทึกเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ กำลังขยาย 20 - 80,000 เท่า โดยหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบโดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงาน จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น สัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ แล้วถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอมอนิเตอร์ และสามารถบันทึกภาพได้⁽⁴⁹⁾

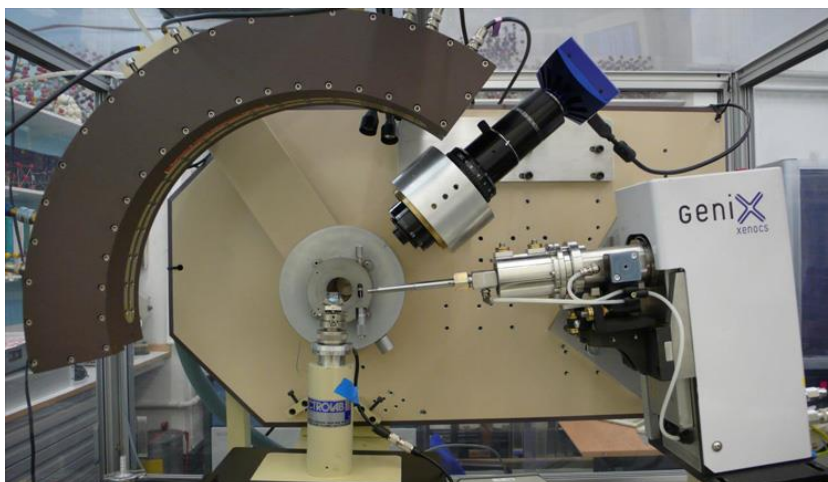
ดังแสดงในภาพประกอบ 22



ภาพประกอบ 22 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ⁽⁵⁰⁾

2.7.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD)

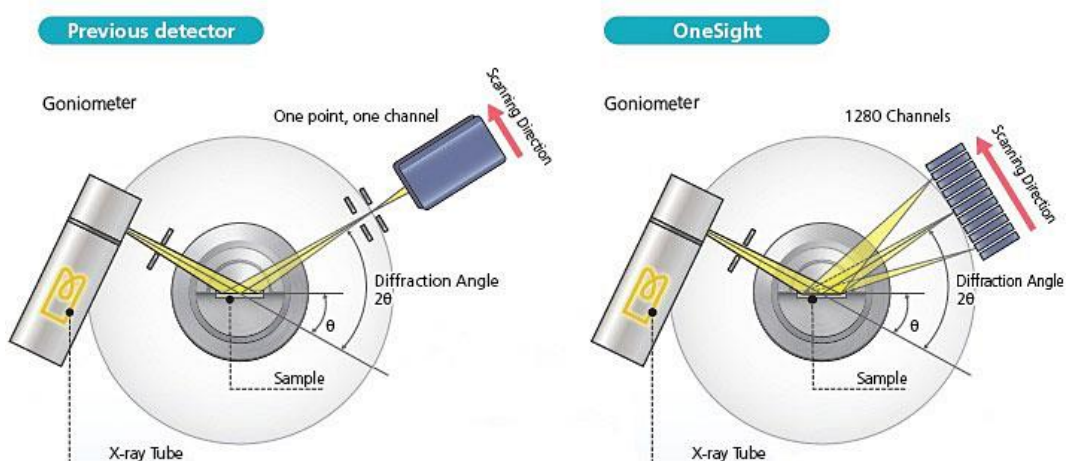
เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) หรือที่เรียกสั้น ๆ ว่า XRD เป็นการศึกษาโครงสร้างผลึกของสารและวัสดุโดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เนื่องจากความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์มีขนาดในช่วงเดียวกันกับระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมของสารแทบทุกชนิด ในกรณีที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกรูปแบบการเรียงตัวที่ซ้ำ ๆ กันของผลึกจะทำหน้าที่เหมือนกับเป็นเกรตติง ให้งกับรังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไปทำให้ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นพื้นฐานในการศึกษาทางด้านผลึกศาสตร์⁽⁵¹⁾



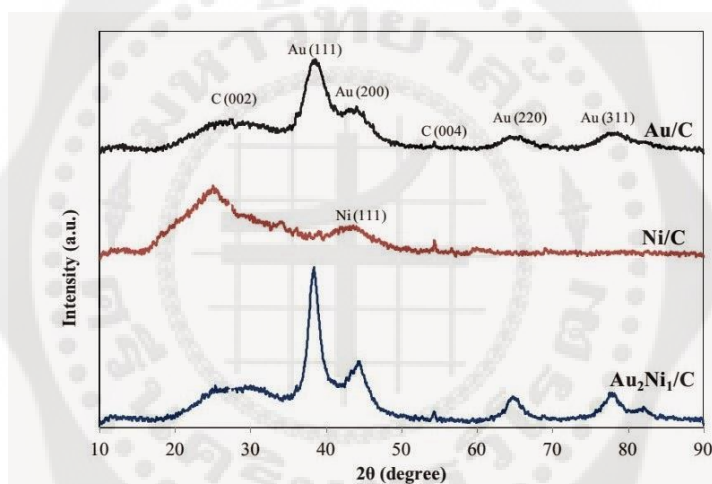
ภาพประกอบ 23 เครื่องดิฟแฟรกโทมิเตอร์ตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์⁽⁵²⁾

วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้กันทั่วไปของเทคนิคทาง XRD คือ วิธีผงวัสดุ (Power method) เทคนิคนี้สารตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์จะถูกบดให้ละเอียดเป็นผง (Power) และใช้ได้อย่างดีกับสภาวะที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) เครื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์เรียกว่า เอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer) ดังแสดงในภาพประกอบ 24 ที่มีหัวจับสัญญาณ (Detector) รังสีเอกซ์ เพื่อหาค่ามุมเลี้ยวเบนและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมา ดังแสดงในภาพประกอบ 25 จากนั้นจะมีอุปกรณ์บันทึกที่ทำหน้าที่พล็อตความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาเทียบกับมุมที่เลี้ยวเบน (2θ) แบบอัตโนมัติ ดังแสดงในภาพประกอบ 26 ซึ่งเป็นภาพสัญญาณสะท้อนของตัวอย่างที่เป็นทองคำ

การแปลความหมายของข้อมูลจากเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ที่ได้จากการตรวจสอบนั้นจะต้องมีความรู้พื้นฐานทางผลึกวิทยาอย่างดี โดยตัวอย่างโลหะที่มีโครงสร้างผลึกซึ่งผ่านการตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟแฟรกโทมิเตอร์แล้วได้ข้อมูลของสัญญาณรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนที่จุดสูงสุด (Peaks) ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้ต้องนำไปทำการคำนวณหาค่าตามสูตรแล้วจึงแปลผลเป็นระบบผลึกแต่ละชนิดอีกครั้ง⁽⁵¹⁾



ภาพประกอบ 24 ลักษณะการทำงานของดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (51)



ภาพประกอบ 25 ภาพสัญญาณการสะท้อนของความเข้มของรังสีจากตัวอย่างของผงทองคำ (52)

2.7.4 เครื่องวัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential)

ค่าศักย์ซีต้า คือ ค่าความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวอนุภาคกับศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลาย โดยสามารถทดสอบหาค่าศักย์ซีต้าของสารคอลลอยด์ ที่มีค่าศักย์ซีต้าอยู่ในช่วง -150 ถึง $+150$ มิลลิโวลต์ และวัดขนาดของอนุภาคระดับนาโนเมตรได้ในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 30 ไมครอน ซึ่งค่าศักย์ซีต้าที่ได้สามารถทำนายค่าความคงตัวของการกระจายตัวของอนุภาคได้ อนุภาคที่มีค่าศักย์ซีต้าเป็นบวกหรือลบมากจะเกิดการหักล้างต่อกันเกิดเสถียรภาพการกระจายตัว แต่ถ้าอนุภาคมีค่าเป็นบวกหรือลบน้อยทำให้ไม่มีแรงป้องกันอนุภาคอื่นที่เข้ามา ดังนั้นจึงไม่เกิดเสถียรภาพการกระจายตัวหรือเกิดการรวมตัว โดยหลักการทำงานของเครื่องวัดค่าศักย์ซีต้าคือการวัดอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อทำให้อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าโดยใช้ Laser doppler

velocimetry (LDV) ค่าศักย์ซีต้าขึ้นกับค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ ซึ่งอนุภาคแขวนลอยจะเสถียรเมื่อ ศักย์ซีต้ามีค่ามากกว่า +30 มิลลิโวลต์ หรือ น้อยกว่า -30 มิลลิโวลต์ สภาวะที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่ำ (กรด) จะให้ค่าศักย์ซีต้าสูงกว่าสภาวะที่ค่าพีเอชสูง (เบส) ถ้าศักย์ซีต้ามีค่าอยู่ในช่วง -30 ถึง 30 มิลลิโวลต์ หรือประมาณศูนย์ สารแขวนลอยจะไม่เสถียรจะมีการเกาะกันเป็นก้อนและตกตะกอน เรียก จุดที่ศักย์ซีต้าเท่ากับศูนย์ว่า “Isoelectric point” ⁽⁵³⁾



ภาพประกอบ 26 เครื่องวัดความต่างศักย์บนผิวอนุภาค (Zetasizer) ⁽⁵⁴⁾

2.8 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

Ray; & Okamoto. 2006 ได้ศึกษาการดูดซับเหล็ก (Fe(III)) ในสารละลาย ไอโซเทิร์มของการดูดซับ จลนศาสตร์ในการดูดซับ และเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Interaction) โดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับ ซึ่งสามารถสรุปผลได้ว่าการศึกษาการดูดซับใน สารละลายมีความเป็นกรด-ด่าง (pH) น้อยกว่า 4 โดยใช้เวลาดั้งแต่ 30 - 300 นาที ไอโซเทิร์มของ การดูดซับสอดคล้องกับทฤษฎีแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และจลนศาสตร์ในการดูด ซักสอดคล้องกับจลนศาสตร์การดูดซับในปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (Pseudo-second order) และ การศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ค่าพลังงานเสรีของกิบส์ (Gibbs free energy) มีค่าลดลง⁽⁶⁰⁾

Jiao; et al. 2009 ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับซีซีเยียม โดยใช้ แร่ มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร โดยใช้สารดัดแปรต่าง ๆ กัน ดังนี้ Saline solution, Suspended solution และดัดแปรด้วยอนุภาคนิวทรีน 450 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการทดสอบด้วยเครื่อง XRD เมื่อได้ผล จึงนำมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมาทำการดูดซับซีซีเยียมและพบว่าการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ ที่นำมาใช้ดูดซับซีซีเยียมดีที่สุดคือการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ที่อุณหภูมิสูง โดยการดูดซับซีซีเยียม เพิ่มขึ้นจาก 63.5% ถึง 98.0% ช่วง pH 1-3 ใช้เวลาในการติดตามผล 1 ชั่วโมง⁽¹⁰⁾

Zhao; et al. 2010 ได้ทำการศึกษาการดูดซับและการคายซับแอนติโมนี อะซิเตต (Antimony acetate) ด้วยโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Sodium montmorillonite) โดยทำการศึกษาความแตกต่างของความเข้มข้นของแอนติโมนี อะซิเตตระหว่างการดูดซับ ศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับ ได้แก่ ทฤษฎีของฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) ทฤษฎีแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และทฤษฎี D-R (D-R isotherm) เป็นต้น ศึกษาจลนศาสตร์ในการดูดซับ ได้แก่ จลนศาสตร์ในการดูดซับปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (Pseudo-first order) จลนศาสตร์การดูดซับในปฏิกิริยาแบบเทียมอันดับที่ 2 (Pseudo-second order) และ การแพร่ภายในรูพรุน (intraparticle diffusion) เป็นต้น และทำการศึกษาการคายซับที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 180° C ซึ่งสามารถสรุปผลได้ว่าการดูดซับแอนติโมนี อะซิเตต ของโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์สอดคล้องกับทฤษฎีแลงเมียร์ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้ 1 มากกว่า การศึกษาจลนศาสตร์ในการดูดซับสอดคล้องกับทฤษฎีจลนศาสตร์การดูดซับในปฏิกิริยาแบบเทียมอันดับที่ 2 (Pseudo-second order) และการศึกษาการแพร่ในรูพรุนที่เวลา 30 นาที การศึกษาการคายซับสามารถคายซับได้ดีที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 180° C⁽⁵⁹⁾

เกษรา จิตนิยม; อัญชลี สุทธิประการ; และ เอิบ เขียวรีนรมย์. 2012 ได้ศึกษาการดูดซับตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ของสเมกไทต์ โดยใช้ตัวอย่างของดินเหนียวในชั้นดินซึ่งมีสเมกไทต์เป็นองค์ประกอบหลัก โดยศึกษาสภาวะต่าง ๆ เช่น ความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นในสารละลายที่มีโลหะหนัก โดยปริมาณการดูดซับที่สเมกไทต์ดูดซับได้สูงสุดที่ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีการดูดซับแบบชั้นเดียวที่สอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ ไอโซเทิร์ม และปริมาณของ ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียมที่ถูกดูดซับมีค่าสูงสุดเท่ากับ 49.56, 42.37, 42.43 และ 22.17 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งองค์ประกอบของดินเหนียวสามารถลดการแพร่กระจายของโลหะหนักได้ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง ชนิดและความเข้มข้นของโลหะหนัก⁽⁵⁵⁾

Wei; et al. 2013 ได้ศึกษาการนำแร่เบนโทไนต์มาขึ้นรูปด้วยแอลจิเนตใช้ในการดูดซับทองแดง โดยศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับในสภาวะความเป็นกรด เวลา และความเข้มข้นของสารละลายทองแดง ซึ่งใช้แอลจิเนตละลายในน้ำกลั่นแล้วนำเบนโทไนต์ผสมเพื่อปั้นกวนจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำสารละลายที่ทำการปั้นกวนมาบีบลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) ที่ความเข้มข้น 3%w/v เพื่อขึ้นเม็ดแล้วนำเม็ดไปทำการดูดซับสารละลายทองแดงได้ผลดังนี้ เม็ดแอลจิเนตสามารถดูดซับทองแดงได้ 114.7 และ 94.04 มิลลิกรัม สมดุลเวลาอยู่ที่ 6 ชั่วโมงในสภาวะที่เป็นกรด pH 4 และ 5 ของการดูดซับ⁽¹¹⁾

Barreca; et al. 2014 ได้ศึกษาการนำมอนต์มอริลโลไนต์ขึ้นรูปด้วยวิธีเกิดเจลจากแอลจิเนต โดยให้เป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบเพื่อนำไปใช้ในการดูดซับ พอลิคโลโรไลเนตไบฟีนิล (Polychlorinated biphenyl) ซึ่งนำเม็ดวัสดุเชิงประกอบทดสอบโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR spectrometer ทดสอบไอโซเทิร์มของการดูดซับและจลนศาสตร์ในการดูดซับ โดยศึกษาไอโซเทิร์มในการดูดซับของทฤษฎีของแชปแมน (Chapman sigmoidal equation) ทฤษฎีฟรอนด์ลิช

(Freundlich adsorption isotherm) และทฤษฎีแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าสูงเข้าใกล้หนึ่งทุกค่า จึงสรุปได้ว่าการดูดซับมีความสอดคล้องทั้ง 3 ทฤษฎี และการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 2 (Pseudo-second order)⁽⁵⁸⁾

Chongmin; et al. 2015 ได้ศึกษาการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารลดแรงตึงผิวแอมโฟลิก ใช้ดูดซับแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟต โดยหาประสิทธิภาพในการดูดซับในสภาวะความเป็นกรด เวลา และความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมซัลเฟต โดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์ใส่ลงในสารละลายที่ทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความเข้มข้นต่าง ๆ ได้ผลดังนี้คือ ประสิทธิภาพในการดูดซับในความเป็นกรด-ด่าง อยู่ที่ pH 4 เวลาที่ดูดซับดีที่สุดคือ 5 นาที และทำการดูดซับต่อใช้เวลาที่ 24 ชั่วโมง⁽⁸⁾

Ma; et al. 2015 ได้ทำการศึกษาการดูดซับของฟีนอล (Phenol) และทองแดง (Cu II) โดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วย Switterionic surfactant และ Cationic surfactant ซึ่งได้ออร์กาโนมอนต์มอริลโลไนต์ (Organo-montmorillonites) นำไปดูดซับฟีนอลและทองแดงในสารละลาย และได้สรุปผลจากการนำออร์กาโนมอนต์มอริลโลไนต์ศึกษาด้วยลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis หรือ TGA) ทดสอบโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR spectrometer วิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในออร์กาโนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วย X-ray Fluorescence (XRF) และนำมาวิเคราะห์การดูดซับฟีนอล และทองแดงในสารละลายสอดคล้องกับทฤษฎีแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) ซึ่งในการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วย Cationic surfactant สามารถดูดซับฟีนอลได้สูงสุดที่ความเป็นกรด-ด่าง (pH) 5 และการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วย Switterionic surfactant สามารถดูดซับทองแดงในสารละลายได้สูงสุดที่ความเป็นกรด-ด่าง (pH) 5⁽¹²⁾

Guifang; et al. 2016 ได้ศึกษาการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารลดแรงตึงผิว dodecyl trimethyl ammonium chloride (DTAC) และ dodecyl amine (DA) จากนั้นทำการทดสอบด้วยเครื่อง XRD และใช้ดูดซับโครเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟต โดยหาประสิทธิภาพในการดูดซับในสภาวะความเป็นกรด เวลา และความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมโครเมต พบว่าการดูดซับในช่วงความเป็นกรด-ด่างที่ดีที่สุด pH 2 เวลาในการดูดซับดีที่สุด 2 ชั่วโมง และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่ดูดซับดีที่สุด คือ dodecyl amine ในสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์⁽⁹⁾

Xia; et al. 2017 ได้ศึกษาการดูดซับซีซีเอ็มด้วยการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยลิเทียมและซีซีเอ็มด้วยวิธีเกิดเจลด้วยแคลเซียมแอลจิเนตเป็นเม็ควัสดุเชิงประกอบ ซึ่งในการทดลองได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ โครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ ตรวจสอบโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR spectrometer การวิเคราะห์ชนิดและสถานะทางเคมีบริเวณพื้นผิวของสารด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) เป็นต้น และศึกษาสภาวะที่มีผลต่อการดูดซับ เช่น ความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์ต่อแอลจิเนต ความเป็นกรด-ด่าง เวลาในการดูดซับ และความเข้มข้นของซีซีเอ็มในสารละลาย เป็นต้น โดยผลการดูดซับของเม็ควัสดุเชิงประกอบที่ดูดซับได้

สูงสุดคือ 100.25 มิลลิกรัม/กรัม การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับในปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 2 (Pseudo-second order) ดีกว่าปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (Pseudo-first order) และเป็นปฏิกิริยาการดูดซับแบบชั้นเดียวสอดคล้องกับทฤษฎีแลงเมียร์⁽⁵⁶⁾

Zhu; et al. 2018 ได้ศึกษาการดูดซับวาเนเดียมจากแร่ดินเดี่ยวธรรมชาติ ได้แก่ แร่กาเลิไนท์ (Kaolinite) และมอนต์มอริลโลไนต์ โดยศึกษาความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่อการดูดซับสูงที่ 4-10 ซึ่งแสดงผลการทดลองของแร่กาเลิไนท์ คือ เวลาในการดูดซับที่ 240 นาที ไอโซเทิร์มการดูดซับสอดคล้องกับทฤษฎีฟรุนดลิชไอโซเทิร์ม (Freundlich adsorption isotherm) จลนศาสตร์การดูดซับปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 2 (Pseudo-second order) และมีค่าการดูดซับไอออนวาเนเดียมที่ 0.98 มิลลิกรัม/กรัม จากนั้นผลการทดลองของมอนต์มอริลโลไนต์ดูดซับได้ดีที่เวลา 360 นาที เป็นปฏิกิริยาการดูดซับแบบชั้นเดียวสอดคล้องกับทฤษฎีแลงเมียร์ จลนศาสตร์การดูดซับปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 2 (Pseudo-second order) และมีค่าการดูดซับไอออนวาเนเดียมที่ 0.78 มิลลิกรัม/กรัม⁽⁵⁷⁾



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือ ขั้นตอนการเตรียมวัสดุดูดซับ การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุดูดซับ การดัดแปรแร่มอนต์มอริลโลไนต์ การวิเคราะห์สมบัติกายภาพและสมบัติเชิงเคมีของการดูดซับ ซึ่งรายละเอียดของวิธีดำเนินงานวิจัยประกอบไปด้วย

- 3.1. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย
- 3.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
- 3.3. เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย
- 3.4. เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย
- 3.5. ตัวแปรที่ศึกษา
- 3.6. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1 กรดแอซิกติก (Acetic acid: CH_3COOH)
- 3.1.2 เกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium salt)
- 3.1.3 แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride: CaCl_2)
- 3.1.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide: NaOH)
- 3.1.5 ผงแอลจีเนต (Sodium alginate powder) ยี่ห้อ Sigma-aldrich
- 3.1.6 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)
- 3.1.7 โกลด์ (III) คลอไรด์ (Gold (III) chloride: AuCl_3)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.2.1 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร
- 3.2.2 กระบอกลวด
- 3.2.3 ช้อนตักสาร
- 3.2.4 ตะแกรงร่อน (Sieve)
- 3.2.5 แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร (Magnetic bar)
- 3.2.6 ปีกเกอร์
- 3.2.7 บีเปด
- 3.2.8 หลอดฉีดยา (Syringe)
- 3.2.9 ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.3.1 กรองกรวยระบบสุญญากาศ (Buchner funnel)
- 3.3.2 กระดาษวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Indicator strips)
- 3.3.3 ขวดพิคโนมิเตอร์ (Pycnometer)
- 3.3.4 เครื่องเขย่าสาร ยี่ห้อ Orbital Shaker รุ่น GS-20
- 3.3.5 เครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ Sartorius Model BSA224S-CW 220g / 0.1mg
- 3.3.6 เครื่องชั่งยี่ห้อ Mattles type BDI20I 1200g xlg
- 3.3.7 เครื่องผสมสาร (Stirrer) ยี่ห้อ M TOPS รุ่น MS-300HS
- 3.3.8 เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer)
- 3.3.9 เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ (Vernier Calipers)

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 3.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)
- 3.4.2 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตริเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer)
- 3.4.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD)
- 3.4.4 เครื่องวัดความต่างศักย์บนผิวอนุภาค (Zetasizer)

3.5 ตัวแปรที่ศึกษา

การทดลองวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรดังนี้

3.5.1. ตัวแปรต้น

1. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะทองจากสารละลาย ได้แก่
 - อัตราส่วนระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์: แอลจินต
 - เวลา
 - ความเข้มข้นของสารละลายทอง
 - ความเป็นกรด-ด่าง (pH)
 - ปริมาณของตัวดูดซับ
2. ศึกษาไอโซเทิร์มของกระบวนการดูดซับ
3. ศึกษาจลนศาสตร์ของกระบวนการดูดซับ
4. ศึกษาการคายการดูดซับโลหะด้วยวัสดุดูดซับ

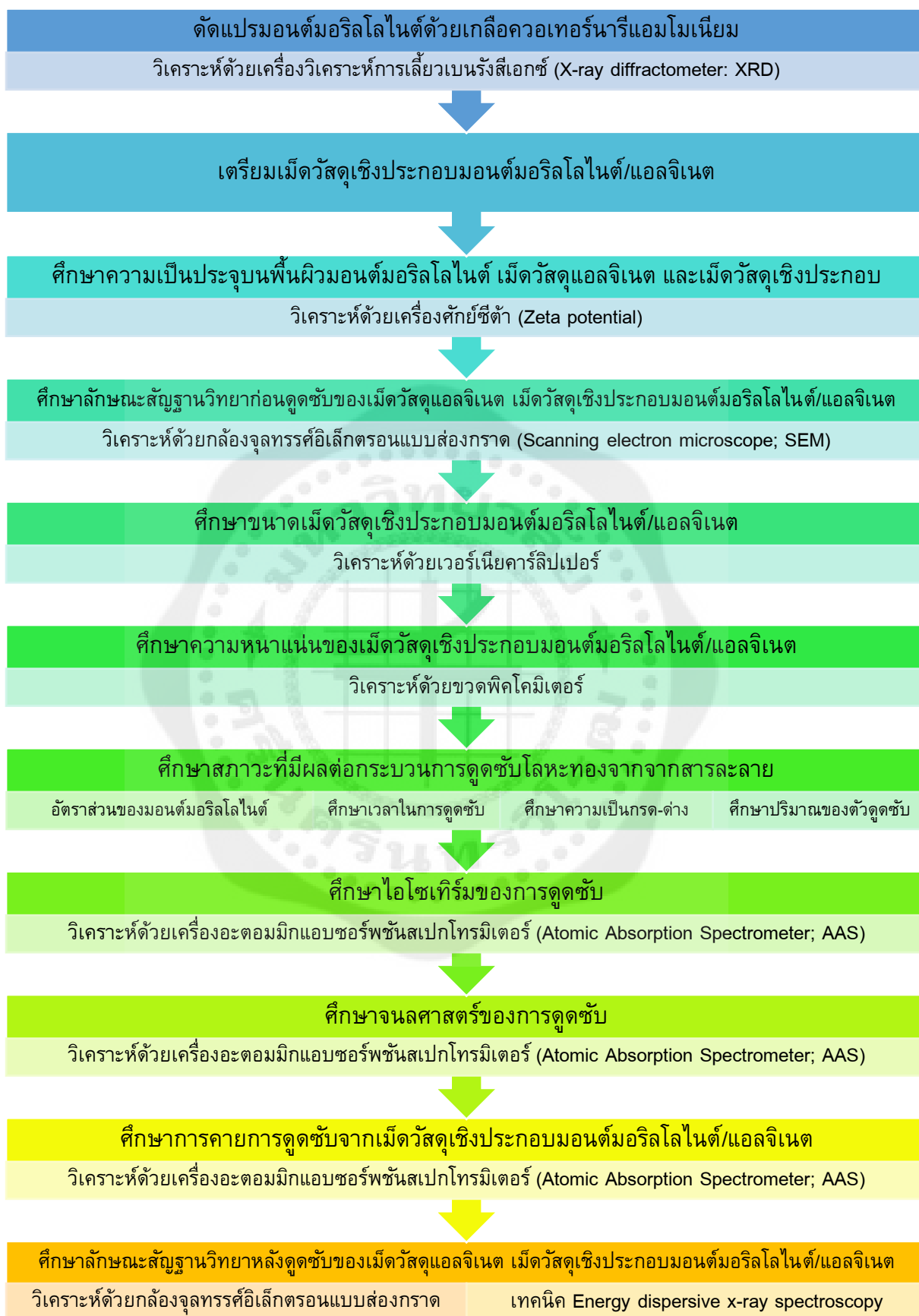
3.5.2. ตัวแปรตาม

ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองจากสารละลายด้วยวัสดุเชิงประกอบ

3.5.3. ตัวแปรควบคุม

1. ดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียม
2. การเตรียมวัสดุดูดซับด้วยวิธีการเกิดเจล





3.6 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.6.1 การดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียม

1. เตรียมสารละลายกรดแอซิดิกที่ความเข้มข้น 2 % (v/v) โดยใช้กรดแอซิดิกเข้มข้น 2 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
2. นำเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมจำนวน 1 กรัม ละลายลงในสารละลายแอซิดิก 30 มิลลิลิตร กวนสารจนเป็นเนื้อเดียวกัน
3. นำมอนต์มอริลโลไนต์ 2.5 กรัม ละลายลงในสารละลายแอซิดิก 70 มิลลิลิตร
4. นำสารละลายทั้ง 2 ลงในบีกเกอร์สำหรับปั่นกวนสารด้วยเครื่องผสมความเร็วสูงที่ 2,500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. นำสารผสมไปกรองเพื่อทำการแยกตะกอนของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยน้ำกลั่นจนมีสภาพเป็นกลางด้วยเครื่องกรองสาร
6. นำมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรบดให้ละเอียด และกรองด้วยตะแกรงร่อน (Mesh)
7. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร โดยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction)

3.6.2 การเตรียมเม็ดวัสดุแอลจิเนต

1. เตรียมแอลจิเนต 2 % (w/v)
2. ผสมผงแอลจิเนตด้วยวิธีเกิดเจล (Gelation process) ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร โดยเครื่องผสมสารเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
3. หยดสารละลายแอลจิเนตด้วยหลอดฉีดยา (Syringe) ลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่ความเข้มข้น 1 % (w/v)
4. เก็บเม็ดวัสดุแอลจิเนตไว้ในน้ำกลั่น ก่อนนำไปใช้ในการดูดซับของการทดลองต่อไป

3.6.2 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต

1. เตรียมแอลจิเนต 2 % (w/v) และมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณ 1%, 2%, 3%, 4%, 5% และ 6 % (w/v) ตามลำดับ แต่ละอัตราส่วน
2. เตรียมผสมมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ด้วยวิธีเกิดเจล (Gelation process) ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร โดยเครื่องผสมสารเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
3. หยดสารละลายมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตด้วยหลอดฉีดยา (Syringe) ลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่ความเข้มข้น 1 % (w/v)

4. เก็บเม็ควัสตุเชิงประกอบไว้ในน้ำกลั่น ก่อนนำไปใช้ในการดูดซับของการทดลองต่อไป

3.6.3 การวัดขนาดของเม็ควัสตุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต

1. เตรียมเม็ควัสตุแอลจิเนต และเม็ควัสตุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ที่ความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์เท่ากับ 1%, 2%, 3%, 4%, 5% และ 6 % (w/v) ตามลำดับ แต่ละอัตราส่วน
2. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ควัสตุเชิงประกอบด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ อย่างละ 5 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของเม็ควัสตุเชิงประกอบ
3. นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยของเม็ควัสตุแอลจิเนต และเม็ควัสตุเชิงประกอบ มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต

3.6.4 การหาความหนาแน่นของเม็ควัสตุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต

1. เตรียมเม็ควัสตุแอลจิเนต และเม็ควัสตุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ที่ความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์เท่ากับ 1%, 2%, 3%, 4%, 5% และ 6 % (w/v) ตามลำดับ แต่ละอัตราส่วน
2. จากนั้นนำไปวัดความหนาแน่นของเม็ควัสตุ โดยใช้ขวดพิกโนมิเตอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร ซึ่งสูตรที่ใช้ในการคำนวณความหนาแน่นของเม็ควัสตุ คือ

$$G = \frac{(W)}{(W_1 + W) - W_2}$$

สมการ 10

เมื่อ W = น้ำหนักของขวดพิกโนมิเตอร์+ตัวดูดซับ

W_1 = น้ำหนักของขวดพิกโนมิเตอร์+น้ำ

W_2 = น้ำหนักของขวดพิกโนมิเตอร์+ตัวดูดซับ+น้ำ

3.6.5 การศึกษาค่าความเป็นประจุบนพื้นผิววัสตุดูดซับ

1. เตรียมแอลจิเนต มอนต์มอริลโลไนต์ และเม็ควัสตุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต 1%(w/v)
2. นำเม็ควัสตุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต 1%(w/v) ตากให้แห้ง จากนั้นนำเม็ควัสตุเชิงประกอบมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดสาร และนำไปเก็บไว้ในที่มืดชื้นจากฝุ่นละออง
3. เตรียมนำผงแต่ละชนิดใส่ลงในเซลล์วัดประจุที่ผิว (Flow cell)

4. นำเซลล์วัดประจุที่ผิวที่บรรจุสารตัวอย่างลงในเครื่องวัดความศักย์ซีต้า (Zeta potential)
5. ปรับสภาวะให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระหว่าง 4-10 โดยใช้สารละลาย NaOH เมื่อต้องการปรับให้อยู่ในสภาวะที่เป็นด่าง และใช้สารละลาย HCl เมื่อต้องการปรับให้อยู่ในสภาวะที่เป็นกรด ลงไปในเครื่องวัดความศักย์ซีต้า (Zeta potential)
6. วิเคราะห์ผลการทดลองและเก็บผลการทดลองใช้กับการทดลองครั้งต่อไป

3.6.6 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

1. การหาอัตราส่วนผสมของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต และเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ

- 1.1. เตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต 6 อัตราส่วน ดังนี้

- มอนต์มอริลโลไนต์ 1 %w/v : สารละลายแอลจิเนตความเข้มข้น 2 %w/v
- มอนต์มอริลโลไนต์ 2 %w/v : สารละลายแอลจิเนตความเข้มข้น 2 %w/v
- มอนต์มอริลโลไนต์ 3 %w/v : สารละลายแอลจิเนตความเข้มข้น 2 %w/v
- มอนต์มอริลโลไนต์ 4 %w/v : สารละลายแอลจิเนตความเข้มข้น 2 %w/v
- มอนต์มอริลโลไนต์ 5 %w/v : สารละลายแอลจิเนตความเข้มข้น 2 %w/v
- มอนต์มอริลโลไนต์ 6 %w/v : สารละลายแอลจิเนตความเข้มข้น 2 %w/v

- 1.2. ชั่งเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต แต่ละอัตราส่วน ปริมาณ 1 กรัม จำนวนเท่ากับช่วงเวลาที่ต้องการในการทดลอง ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ (อัตราส่วนละ 6 ขวด)

- 1.3. เตรียมสารละลายทองเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งหมด 1,800 มิลลิลิตร แบ่งเป็นส่วนละ 50 มิลลิลิตร เพื่อใช้ในการดูดซับ และเก็บไว้วิเคราะห์ผลด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)

- 1.4. นำขวดรูปชมพู่ใส่ลงในเครื่องเขย่าสาร (Shaker)

- 1.5. นำสารละลายทองลงในขวดรูปชมพู่พร้อม ๆ กัน โดยใช้ขวดปริมาตร 50 มิลลิลิตร

- 1.6. เปิดเครื่องเขย่าสาร (Shaker) เขย่าในอัตราความเร็ว 100 รอบต่อนาที

- 1.7. ทำการจับเวลา คือ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที เมื่อครบช่วงเวลาที่กำหนด นำขวดรูปชมพู่ออกจากเครื่องเขย่าสาร (Shaker)

- 1.8. นำเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ออกจากขวดรูปชมพู่อย่างรวดเร็ว และเก็บสารละลายที่ได้หลังจากการดูดซับไว้ เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย

เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)

2. การวิเคราะห์ผลเพื่อหาอัตราส่วนผสมของมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต และเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ

2.1. ทำการวิเคราะห์สารละลายทองที่ไม่ผ่านการดูดซับมาก่อนด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS) โดยใช้ความยาวคลื่น 242.8 นาโนเมตร และความหนาแน่นกระแส 15 จูล

2.2. นำสารละลายทองที่ผ่านการดูดซับจากการทดลองที่ 1 ของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต จากนั้นนำไปตรวจหาปริมาณไอออนของทองที่เหลืออยู่ โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS) โดยใช้ความยาวคลื่น 242.8 นาโนเมตร และความหนาแน่นกระแส 15 จูล

2.3. คำนวณผลที่ได้

$$\% \text{ การดูดซับไอออนโลหะทอง} = \left(\frac{A_0 - A_1}{A_0} \right) \times 100 \quad \text{สมการ 11}$$

เมื่อ A_0 = ความเข้มข้นก่อนดูดซับของสารละลายทอง
 A_1 = ความเข้มข้นหลังดูดซับของสารละลายทอง

2.4. นำข้อมูลที่ได้แสดงผลในรูปกราฟ

2.5. วิเคราะห์ผลหาตัวดูดซับอัตราส่วนของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตที่ดีที่สุด และช่วงเวลาการดูดซับที่เข้าสู่สมดุล

2.6. นำเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตที่มีค่าการดูดซับดีที่สุด และช่วงเวลาที่ค่าการดูดซับที่เข้าสู่สมดุลไปใช้ในการทดลองต่อไป

3. การศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีผลต่อการดูดซับ

3.1. เตรียมสารละลายทองความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

3.2. ทำการปรับสภาวะสารละลายทองให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระหว่าง 1-10 โดยใช้สารละลาย NaOH 0.1 โมลต่อลิตร เมื่อต้องการปรับให้อยู่ในสภาวะที่เป็นด่าง และใช้สารละลาย HCl เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ลิตร เมื่อต้องการปรับให้อยู่ในสภาวะที่เป็นกรด

3.3. ชั่งเม็ดวัสดุแอลจิเนต และเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ปริมาณการที่มีค่าดูดซับที่ดีที่สุด (จากผลการทดลองที่ 2) อย่างละ 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่อย่างละ 10 ขวด

3.4. นำสารละลายทองเหลืองในขวดรูปชมพู่พร้อม ๆ กัน โดยใช้ขวดปริมาตร 50 มิลลิลิตร

3.5. ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์

3.6. นำขวดรูปชมพู่ใส่ลงในเครื่องเขย่าสาร (Shaker)

3.7. เปิดเครื่องเขย่าสาร (Shaker) ให้เขย่าในอัตรา 100 รอบต่อนาที

3.8. ทำการจับเวลา เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด (จากผลการทดลองที่ 2) นำตัวดูดซับออกจากสารละลายทองอย่างรวดเร็ว

3.9. กรองตัวดูดซับออก และทำการเก็บสารละลายทองที่ผ่านการดูดซับไว้เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไอออนโลหะทอง

3.10. นำสารละลายทองที่ผ่านการดูดซับ ตรวจหาปริมาณไอออนของโลหะทองที่เหลือนด้วยเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)

3.11. นำผลที่ได้จากเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS) มาคำนวณ แสดงผลในรูปกราฟและสรุปผล

3.12. นำผลวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีผลต่อการดูดซับไปใช้ในการทดลองต่อไป

4. การศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับสมมูล

4.1. เตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต อัตราส่วนผสมที่มีค่าการดูดซับได้มากที่สุด (จากผลการทดลองที่ 2) ซึ่งใส่ขวดรูปชมพู่ปริมาณ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 กรัม ตามลำดับ

4.2. เตรียมสารละลายทองความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1,800 มิลลิลิตร

4.3. ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายทองที่เตรียมไว้ เป็นค่าที่ทำให้ดูดซับได้มากที่สุด (จากผลการทดลองที่ 3)

4.4. นำสารละลายทองเหลืองในขวดรูปชมพู่พร้อม ๆ กัน โดยใช้ขวดปริมาตร 50 มิลลิลิตร

4.5. ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์

4.6. นำขวดรูปชมพู่ใส่ลงในเครื่องเขย่าสาร (Shaker)

4.7. เปิดเครื่องเขย่าสาร (Shaker) ให้เขย่าในอัตรา 100 รอบต่อนาที

4.8. ทำการจับเวลา เมื่อครบช่วงเวลาที่กำหนดแล้ว จึงนำขวดรูปชมพู่ออกจากเครื่องเขย่าสาร (Shaker) ซึ่งเวลาที่กำหนดไว้ (จากผลการทดลองที่ 2)

4.9. กรองตัวดูดซับออก และเก็บสารละลายทองที่ผ่านการดูดซับแล้ว วิเคราะห์หาปริมาณไอออนโลหะทอง ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)

4.10. นำสารละลายทองที่ผ่านการดูดซับ ไปตรวจหาปริมาณไอออนโลหะทองที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)

4.11. นำผลที่ได้จากเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS) มาคำนวณ แสดงผลในรูปกราฟ และสรุปผล

3.6.7 การศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับ

1. เตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต อัตราส่วนที่มีค่าการดูดซับได้มากที่สุด (จากผลการทดลองที่ 2) ซึ่งใส่ขวดรูปชมพู่ ปริมาณขวดละ 1 กรัม
2. เตรียมสารละลายทองที่มีความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายทองที่เตรียมไว้ เป็นค่าที่มีค่าดูดซับได้มากที่สุด (จากผลการทดลองที่ 3)
4. นำสารละลายทองเทลงในขวดรูปชมพู่พร้อม ๆ กัน โดยใช้ขวดปริมาตร 50 มิลลิลิตร
5. ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์
6. นำขวดรูปชมพู่ใส่ลงในเครื่องเขย่าสาร (Shaker)
7. เปิดเครื่องเขย่าสาร (Shaker) ให้เขย่าในอัตรา 100 รอบต่อนาที
8. ทำการจับเวลา เมื่อครบตามระยะเวลา แล้วจึงนำขวดรูปชมพู่ออกจากเครื่องเขย่าสาร (Shaker)
9. กรองเอาตัวดูดซับออก และเก็บสารละลายทองที่ผ่านการดูดซับแล้วไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)
10. นำสารละลายทองที่ผ่านการดูดซับ ไปตรวจหาปริมาณไอออนโลหะทองที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)
11. นำผลที่ได้จากเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS) มาคำนวณตามสมการของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช

3.6.8 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ

1. เตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต อัตราส่วนที่มีค่าการดูดซับได้มากที่สุด (จากผลการทดลองที่ 2) ซึ่งใส่ขวดรูปชมพู่ ปริมาณขวดละ 1 กรัม
2. เตรียมสารละลายทองที่มีความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายทองที่เตรียมไว้ เป็นค่าที่มีค่าดูดซับได้มากที่สุด (จากผลการทดลองที่ 3)
4. นำสารละลายทองเทลงในขวดรูปชมพู่พร้อม ๆ กัน โดยใช้ขวดปริมาตร 50 มิลลิลิตร
5. ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์
6. นำขวดรูปชมพู่ใส่ลงในเครื่องเขย่าสาร (Shaker)
7. เปิดเครื่องเขย่าสาร (Shaker) ให้เขย่าในอัตรา 100 รอบต่อนาที
8. ทำการจับเวลา เมื่อครบตามระยะเวลา แล้วจึงนำขวดรูปชมพู่ออกจากเครื่องเขย่าสาร (Shaker)
9. กรองเอาตัวดูดซับออก และเก็บสารละลายทองที่ผ่านการดูดซับแล้วไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)
10. นำสารละลายทองที่ผ่านการดูดซับ ไปตรวจหาปริมาณไอออนโลหะทองที่เหลือนด้วยเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)

3.6.9 การศึกษาการคายไอออนโลหะทองหลังการดูดซับ

1. เตรียมน้ำกลั่นปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 1-10 โดยใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร เมื่อต้องการปรับสารละลายให้อยู่ในสภาวะต่าง และใช้สารละลาย CH_3COOH เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร เมื่อต้องการปรับสารละลายให้อยู่ในสภาวะกรด
2. นำเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ที่ผ่านการดูดซับแล้ว ใส่ลงไปในขวดรูปชมพู่ ซึ่งต้องคำนวณปริมาณไอออนโลหะทองที่ถูกดูดซับไว้ในตัวดูดซับไว้ก่อน (ทำเหมือนจากการทดลองที่ 2 และผลการทดลองที่ 3)
3. เทน้ำกลั่นที่ทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) แล้วลงในขวดรูปชมพู่ ขวดละ 50 มิลลิลิตร
4. ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์
5. นำขวดรูปชมพู่ใส่ลงในเครื่องเขย่าสาร (Shaker)
6. เปิดเครื่องเขย่าสาร (Shaker) เขย่าในอัตรา 100 รอบต่อนาที

7. ทำการจับเวลา เมื่อครบตามระยะเวลา แล้วจึงนำขวดรูปชมพู่ออกจากเครื่องเขย่าสาร (Shaker)
8. นำน้ำกลั่นที่ผ่านการคายไอออน ไปตรวจหาปริมาณไอออนโลหะทองด้วยเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)
9. นำผลที่ได้จากเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS) มาคำนวณ และสรุปผล

$$\% \text{ การคายไอออนโลหะทอง} = \left(\frac{A_2}{A_0 - A_1} \right) \times 100$$

สมการ 12

เมื่อ A_0 = ความเข้มข้นก่อนดูดซับของสารละลายทอง
 A_1 = ความเข้มข้นหลังดูดซับของสารละลายทอง
 A_2 = ความเข้มข้นหลังคายของทองจากตัวดูดซับ

3.6.10 การศึกษาลักษณะสัณฐานทางวิทยาของเม็ควัสตุแอลจิเนต และเม็ควัสตุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต

1. เตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 50%, 60%, 70%, 80% และ 90% (w/v) อย่างละ 10 มิลลิลิตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักต่อปริมาตร
2. เตรียมเม็ควัสตุแอลจิเนต และเม็ควัสตุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ที่ผ่านและยังไม่ผ่านการดูดซับ โดยนำไปแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์
3. ทำการเปลี่ยนความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ให้มีความเข้มข้นขึ้นเรื่อย ๆ และทำการแช่เม็ควัสตุแอลจิเนต และเม็ควัสตุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ดังกล่าว โดยแช่แต่ละความเข้มข้นที่ระยะเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง หรือจนกว่าเม็ควัสตุแอลจิเนต และเม็ควัสตุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต จะแข็งตัว
4. นำเม็ควัสตุที่แข็งตัวแล้ว ทิ้งไว้ให้แห้ง และเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น
5. นำเม็ควัสตุวางบนภาชนะรองรับตัวอย่างของเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) เพื่อที่สามารถเคลือบผิววัสดุด้วยทอง
6. นำเม็ควัสตุที่ได้ไปดูลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) แล้วถ่ายภาพ จากนั้นวิเคราะห์ต่อไปด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS) เพื่อทำ X-ray mapping

บทที่ 4

ผลการวิจัย และวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการแยกชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ให้เป็นออร์กาโนเคลย์ โดยใช้เกลือควอเตอร์นารีแอมโมเนียม แล้วจึงนำเอามอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่ได้ผสมกับแอลจิเนต เพื่อเตรียมเป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบด้วยการเกิดเจล สำหรับใช้เป็นตัวดูดซับทองจากสารละลาย โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผสมกับแอลจิเนต ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณของตัวดูดซับ เวลาในการดูดซับ ไอโซเทิร์มของกระบวนการดูดซับ จลนศาสตร์ของกระบวนการดูดซับ และการคายซับจากเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต

4.1 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์

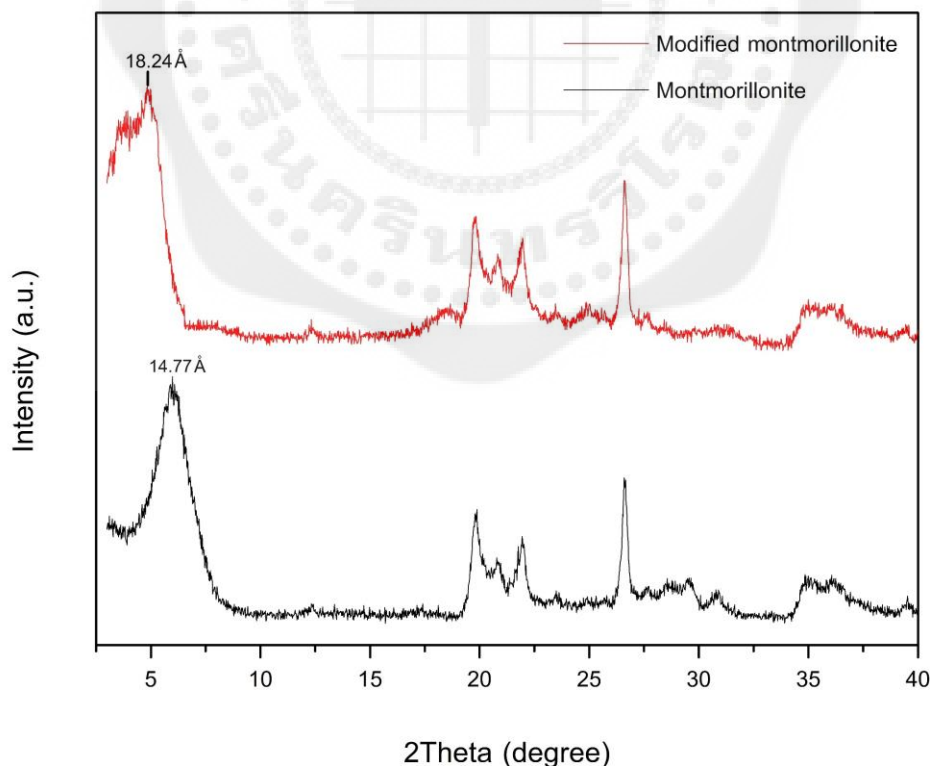
4.1.1 ผลวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD)

การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ในครั้งนี้ผ่านกระบวนการดัดแปรด้วยเกลือควอเตอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium salt) เพื่อให้ทราบการจัดเรียงของชั้น (Layers) และลักษณะโครงสร้างว่าเกิดการแยกชั้น โดยสามารถวิเคราะห์ผลได้จากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer) ด้วยการพล็อตกราฟด้วยค่าความหนาแน่น (Intensity) เป็นแกน Y และ ค่ามุม 2θ เป็นแกน X ดังภาพประกอบ 28 และเปรียบเทียบว่าลักษณะของโครงสร้างผลึก

ผลการวิเคราะห์มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ในระนาบ 001 ค่ามุมตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 5.98° มีค่ามีระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing) 001 ของมอนต์มอริลโลไนต์ เท่ากับ 14.77 อังสตรอม (Å) และเมื่อเทียบกับมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (mMMT) ด้วยเกลือควอเตอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium salt) ในระนาบ d_{001} ค่ามุมตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 4.84° มีค่ามีระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing) 001 ของมอนต์มอริลโลไนต์ เท่ากับ 18.24 อังสตรอม (Å) แสดงให้เห็นว่าค่ามุมตำแหน่งของผลึก 2θ และระยะห่างระหว่างระนาบ d_{001} เปลี่ยนไป ซึ่งคาดว่าเกิดจากโมเลกุลของเกลือควอเตอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium salt) เข้ามาแทรกตัวอยู่ในช่องว่าง (Gallery) ระหว่างชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Meng (Meng; at el. 2018: 271-280)⁽⁵⁶⁾ ได้ทำการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยลิเทียมเพื่อให้มีลักษณะโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์แยกชั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับมากขึ้น โดยนำมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมาขึ้นรูปเป็นเม็ดด้วยกระบวนการเกิดเจลของแอลจิเนต และใช้ดูดซับซีเซียม (Cs^+) ออกจากสารละลาย งานวิจัยของ Sinha⁽⁶⁰⁾ (Sinha, Okamoto. 2000:

1-63) และงานวิจัยของ Alexxandre⁽⁶¹⁾ (Alexxandre, Dubois. 2003: 1539-1641) ได้อธิบายผลที่สอดคล้องของการแยกชั้นด้วยการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งบอกได้ว่าการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์แต่ละชนิดสามารถวิเคราะห์ได้จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างได้ดังนี้ วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรแบบขยายชั้น (Intercalated nanocomposite) มีค่ามีระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing) 001 ตั้งแต่ 7-17 อังสตรอม (Å) และวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรแบบแตกชั้น (Exfoliated nanocomposite) มีค่ามีระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing) 001 ตั้งแต่ 18 อังสตรอม (Å) ขึ้นไป เป็นต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่างานวิจัยมีผลโดยตรงต่อกระบวนการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ และงานวิจัยนี้สามารถสรุปผลได้ว่าลักษณะโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสอดคล้องกับลักษณะของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรแบบแตกชั้น (Exfoliated nanocomposite)

ดังนั้นจึงสามารถสรุปผลได้ตามผลการวิเคราะห์ข้างต้นว่าโมเลกุลของเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมเข้าไปแทรกตัวในช่องว่าง (Gallery) ระหว่างชั้นผลึกมอนต์มอริลโลไนต์ ส่งผลให้ค่ามุมที่ตำแหน่ง 2θ เปลี่ยนไป และระยะห่างระหว่างระนาบ d_{001} ของมอนต์มอริลโลไนต์มีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรแบบแตกชั้น (Exfoliated nanocomposite)



ภาพประกอบ 28 ผลวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction

4.2 การวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต

ผลการวิเคราะห์ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเกิดจากการวัดขนาดของเม็ดวัสดุ โดยใช้เครื่องมือวัดเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ (Vernier Calipers) และวิเคราะห์ความหนาแน่นด้วยการใช้ขวดพิคโนมิเตอร์ (Pycnometer) ซึ่งการวิเคราะห์ในครั้งนี้เพื่อที่สามารถนำเม็ดวัสดุแอลจิเนต และเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากทำให้กระบวนการการดูดซับมีประสิทธิภาพในแต่ละครั้งของการทดลองและสามารถดูดซับได้ในอัตราส่วนเท่าๆ กันได้ ซึ่งแสดงข้อมูลของขนาดและความหนาแน่นดังตาราง 3

จากตารางพบว่าเม็ดวัสดุแอลจิเนต และเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตที่ 1%, 2%, 3%, 4%, 5% และ 6% (w/v) มีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางคือ 4.86 ± 0.29 , 5.03 ± 0.53 , 5.05 ± 0.45 , 5.12 ± 0.64 , 5.18 ± 0.33 , 5.20 ± 0.58 และ 5.23 ± 0.31 มิลลิเมตร ตามลำดับ และความหนาแน่นเฉลี่ยของเม็ดวัสดุแอลจิเนตและเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตที่ความเข้มข้น 1%, 2%, 3%, 4%, 5% และ 6% (w/v) มีค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นคือ 1002.55, 1001.75, 1002.48, 1002.63, 1004.61, 1004.95 และ 1005.08 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตที่ 6% (w/v) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและความหนาแน่นเฉลี่ยมากที่สุด เนื่องจากมีปริมาตรของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมากกว่าเม็ดวัสดุทั้งหมดที่ศึกษา จากการทดลองการเพิ่มอัตราส่วนของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมากกว่า 6% (w/v) ส่งผลให้เม็ดของวัสดุไม่สามารถขึ้นรูปให้มีลักษณะทรงทรงกลมได้ และในส่วนของความหนาแน่นของเม็ดวัสดุแอลจิเนตและเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต พบว่า ในทุก ๆ อัตราส่วนของเม็ดวัสดุและเม็ดวัสดุแอลจิเนตจมน้ำในการทดลองหาความหนาแน่น ซึ่งหมายความว่าเม็ดวัสดุแต่ละชนิดมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ (น้ำมีความหนาแน่นเท่ากับ 1000 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

ดังนั้นสรุปได้ว่าปริมาตรของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสามารถเพิ่มนำมามีขึ้นรูปได้สูงสุดที่ปริมาตร 6 % (w/v) ให้เม็ดวัสดุเชิงประกอบมีลักษณะทรงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นต่อการเพิ่มปริมาตรของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรและความหนาแน่นมากกว่าน้ำ จึงเหมาะสำหรับที่จะนำมาใช้งานให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนทองจากสารละลายได้

ตาราง 3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต

อัตราส่วน มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต (%w/v)	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
2% แอลจิเนต	4.86 ± 0.29	1002.55
1% มอนต์มอริลโลไนต์-2% แอลจิเนต	5.03 ± 0.53	1001.75
2% มอนต์มอริลโลไนต์-2% แอลจิเนต	5.05 ± 0.45	1002.48
3% มอนต์มอริลโลไนต์-2% แอลจิเนต	5.12 ± 0.64	1002.63
4% มอนต์มอริลโลไนต์-2% แอลจิเนต	5.18 ± 0.33	1004.61
5% มอนต์มอริลโลไนต์-2% แอลจิเนต	5.20 ± 0.58	1004.95
6% มอนต์มอริลโลไนต์-2% แอลจิเนต	5.23 ± 0.31	1005.08

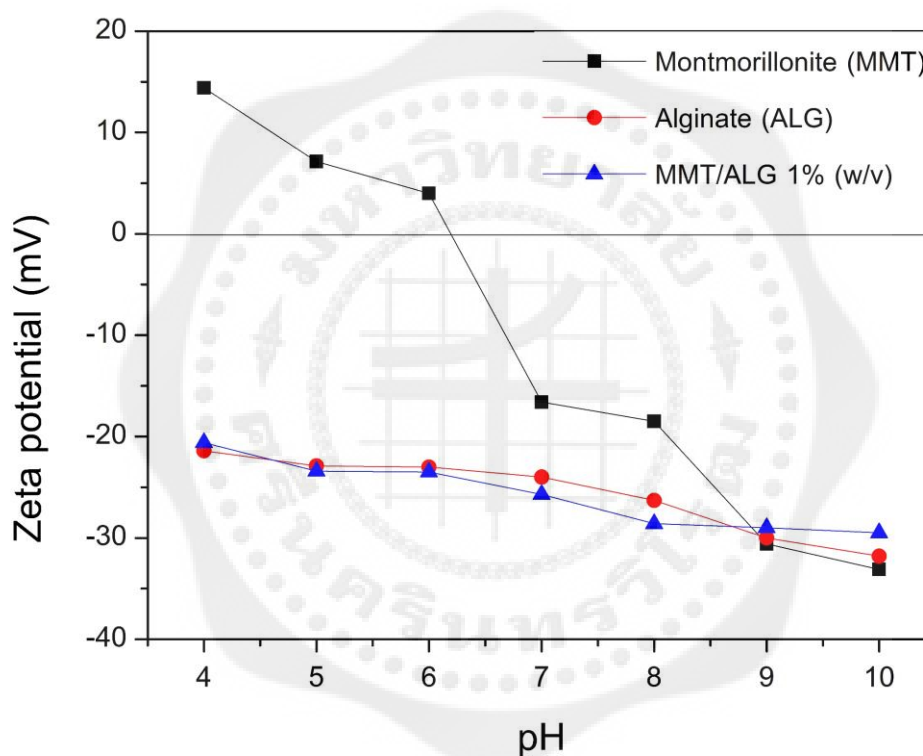
4.3 การวิเคราะห์ความเป็นประจุบนพื้นผิวเม็ดวัสดุแอลจิเนตและเม็ดเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต

การวิเคราะห์ผลด้วยการหาค่าความเป็นประจุบนพื้นผิวของเม็ดวัสดุแอลจิเนตและเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต เพื่อศึกษาเม็ดวัสดุแต่ละชนิดสามารถใช้ทำนายค่าความคงตัวของการกระจายตัวของอนุภาคที่มีค่าความเป็นบวกหรือเป็นลบ ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การวัดความต่างศักย์บนผิวอนุภาค (Zeta potential) โดยการนำมอนต์มอริลโลไนต์ เม็ดวัสดุแอลจิเนตและเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตที่ความเข้มข้น 1% (w/v) หาค่าความเป็นประจุบนพื้นผิวที่ความเป็นกรด-ด่าง (pH) 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ตามลำดับ ซึ่งแสดงผลการทดลองดังภาพประกอบ 29

การวิเคราะห์ผลการทดลองของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ศึกษาในสภาวะความเป็นกรด-ด่าง (pH) 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 มีค่าของประจุตามศักย์คือ 14.4, 7.14, 4.0, -16.6, -18.5, -30.6 และ -33.1 มิลลิโวลต์ (mV) ตามลำดับ ผลการทดลองของเม็ดวัสดุแอลจิเนตที่ศึกษาในสภาวะความเป็นกรด-ด่าง (pH) 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 มีค่าของประจุตามศักย์คือ -21.4, -22.9, -23.0, -24.0, -26.3, -30.0 และ -31.8 มิลลิโวลต์ (mV) ตามลำดับ และผลการทดลองของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตความเข้มข้น 1% (w/v) ที่ศึกษาในสภาวะความเป็นกรด-ด่าง (pH) 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 มีค่าของประจุตามศักย์คือ -20.6, -23.4, -23.5, -25.7, -28.6, -29.0 และ -29.5 มิลลิโวลต์ (mV) ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามีค่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alshameri (Alshameri; et al. 2018: 83-93)⁽⁶²⁾ ได้ทำการศึกษาการดูดซับแอมโมเนียม (Ammonium) ด้วยแร่ดินเหนียว

ธรรมชาติ ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite), แร่กาฬไนท์ (Kaolinite), แร่เวอร์มิคูไลต์ (vermiculite), แร่ปาลิโกรซไกต์ (palygorskite), แร่ซีพิโอไลต์ (Sepiolite) และแร่ฮาลอยด์ไซต์ (Halloysite) เป็นต้น โดยได้นำแร่แต่ละชนิดทดสอบความเป็นประจุบนพื้นผิวด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การวัดความต่างศักย์บนผิวอนุภาค (Zeta potential) แสดงให้เห็นว่าแร่ทุกชนิดที่นำมาศึกษามีลักษณะของพื้นผิวเป็นประจุลบทั้งหมด ซึ่งสามารถนำมาดูดซับแอมโมเนียมที่มีประจุบวกได้

ดังนั้นจึงสรุปผลการทดลองได้ว่าพื้นผิวของวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ มีประจุลบบนพื้นผิววัสดุ ซึ่งเป็นสมบัติที่เหมาะสมแก่การนำมาใช้ในการทดลองการดูดซับไอออนทองจากสารละลาย



ภาพประกอบ 29 ค่าศักย์ซีต้าของมอนต์มอริลโลไนต์ เม็ดวัสดุแอลจิเนต และเม็ดวัสดุเชิงประกอบ มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต 1% (w/v)

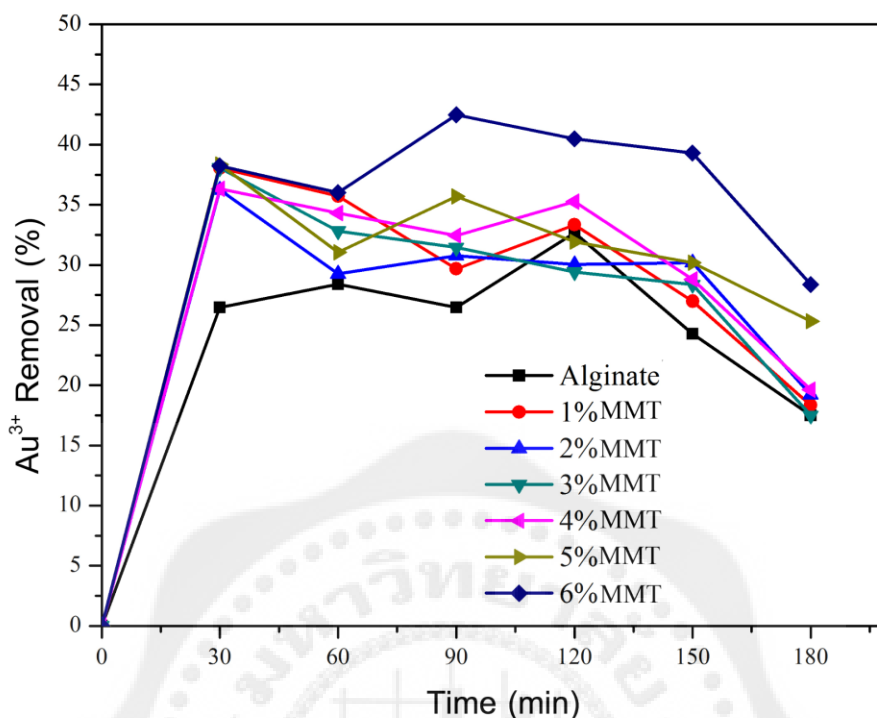
4.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง

4.4.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอัตราส่วนและเวลาต่อความสามารถในการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับของเม็ดวัสดุแอลจิเนตและเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต 1%, 2%, 3%, 4%, 5% และ 6% (w/v) ในสารละลายทอง โดยการทดลองได้แบ่งเวลาเป็น 6 ช่วงเวลา คือ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ความเข้มข้นของทองในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปริมาตรสารละลาย 50 มิลลิลิตร ซึ่งสามารถวิเคราะห์อิทธิพลของการดูดซับได้ดังภาพประกอบ 30

จากการทดลองประสิทธิภาพของพื้นผิววัสดุด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การวัดความต่างศักย์บนผิวอนุภาค (Zeta potential) ทำให้ทราบว่าเม็ดวัสดุทุกชนิดเหมาะสมแก่การนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ ซึ่งในการดูดซับในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์ สามารถบอกปริมาณการดูดซับได้ดีตั้งแต่เวลา 0 - 30 นาที จากนั้นที่เวลา 60 ถึง 90 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับยังคงสูง โดยที่เม็ดวัสดุมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต 6% (w/v) การดูดซับเข้าสู่สมดุลมีค่าสูงกว่าเม็ดวัสดุชนิดอื่น ๆ ซึ่งมีค่าสูงสุดในการดูดซับทองอยู่ที่ร้อยละ 42.48 ของการดูดซับทองในสารละลาย และหลังจากเวลา 90 ถึง 180 นาที ปริมาณการดูดซับของเม็ดวัสดุทุกชนิดมีปริมาณการดูดซับลดลง เนื่องจากว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณอยู่มาก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดวัสดุที่อัตราส่วนชนิดอื่นและเม็ดวัสดุแอลจิเนต เมื่อถึงจุดสมดุลการดูดซับความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

ดังนั้นจากการวิเคราะห์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตขึ้นอยู่กับระยะเวลา ซึ่งที่ปริมาณการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต 6% (w/v) ในสารละลายทองมีค่าร้อยละ 42.48 ที่เวลา 90 นาที โดยที่วัสดุอื่น ๆ มีระยะเวลาเข้าสู่สมดุลที่เวลาใกล้เคียงกัน เมื่อเวลาผ่านจุดสมดุลประสิทธิภาพการดูดซับลดลง



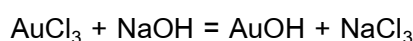
ภาพประกอบ 30 การดูดซับเม็ดวัสดุแอลจิเนตและเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตต่อเวลาในสารละลายทอง (ความเข้มข้นของทอง: 10 มิลลิกรัมต่อลิตร, ความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์: 6% (w/v), ปริมาตรสารละลาย: 50 มิลลิลิตร)

4.4.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อความสามารถในการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง

การดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต 6% (w/v) ในความเข้มข้นของทองในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปริมาตรสารละลาย 50 มิลลิลิตร โดยทำการทดลองของความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยมีค่าตั้งแต่ 1 - 10 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากภาพประกอบ 31

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ (adsorption efficiency) โดยสามารถอธิบายได้จากการทดลอง เมื่อทำการทดลองจากค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 1 - 2 มีปริมาณการดูดซับที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ และเมื่อถึงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 3 มีปริมาณการดูดซับสูงสุดที่ร้อยละ 39.29 ของการดูดซับทองในสารละลาย ซึ่งภายใต้สภาวะเป็นกรดที่มีโปรตอน (H^+) เกิดการแข่งขันกันของโปรตอนและไอออนทอง (Au^{3+}) เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับจะถูกเติมโปรตอนกับให้กับไอออน (Protonate) เกิดการยึดเกาะกับไอออนลบ (Anion) ของพื้นผิวเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต จากนั้นปริมาณการดูดซับที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง

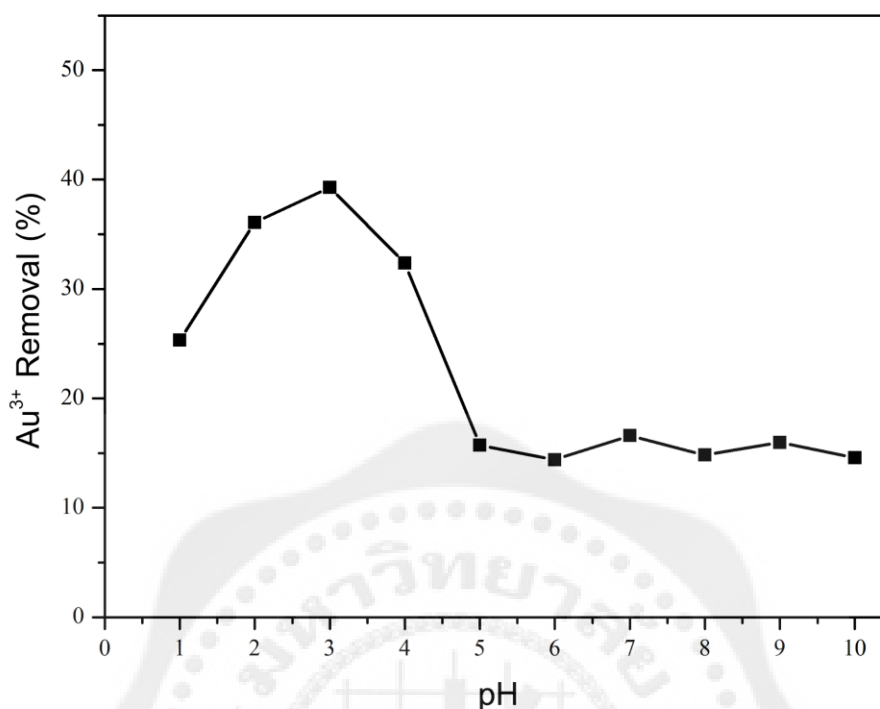
(pH) 5 โปรตอนในสารละลายมีสถานะความเป็นกรดลดลงประสิทธิภาพการดูดซับจึงเกิดได้น้อย เนื่องจากเกิดการแข่งกันกันน้อยลงของประจุบวก (Cation) จนเมื่อสถานะของสารละลายมีความเป็นด่างประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มคงที่ เนื่องจากในสารละลายมีไฮดรอกไซด์ (OH⁻) ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามสภาวะความเป็นด่างในสารละลายที่เพิ่มขึ้น ทำให้ไอออนบวกของทอง (Au³⁺) จับกลุ่มกับไฮดรอกไซด์ของหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH⁻) เกิดเป็น Au₂O₃ และทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับบนพื้นผิวเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตลดลง ดังสมการ 13



สมการ 13

ผลการวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่างมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gladysz-Plaska (Gladysz-Plaska; at el. 2012: 140-150)⁽⁶⁴⁾ โดย Gladysz-Plaska ทำการศึกษาแร่ดินเหนียวสีแดง (Red clay) ดัดแปรด้วย Hexadecyltrimethylammonium bromide (HDTMA) ซึ่งนำมาใช้ดูดซับโครเมียม (Cr⁶⁺) จากสารละลายและฟีนอล (Phenol) พบว่าปริมาณการดูดซับในสภาวะเป็นกรดของโครเมียมมีค่าการดูดซับมากกว่าสภาวะความเป็นด่าง สามารถวิเคราะห์ได้ว่างานวิจัยของ Gladysz-Plaska มีความสอดคล้องกันว่าในสภาวะความเป็นกรดมีผลต่อปริมาณการดูดซับของทองในสารละลายได้ ซึ่งเมื่อสภาวะความเป็นกรดลดลงทำให้ปริมาณการดูดซับของไอออนลดลงเช่นกัน

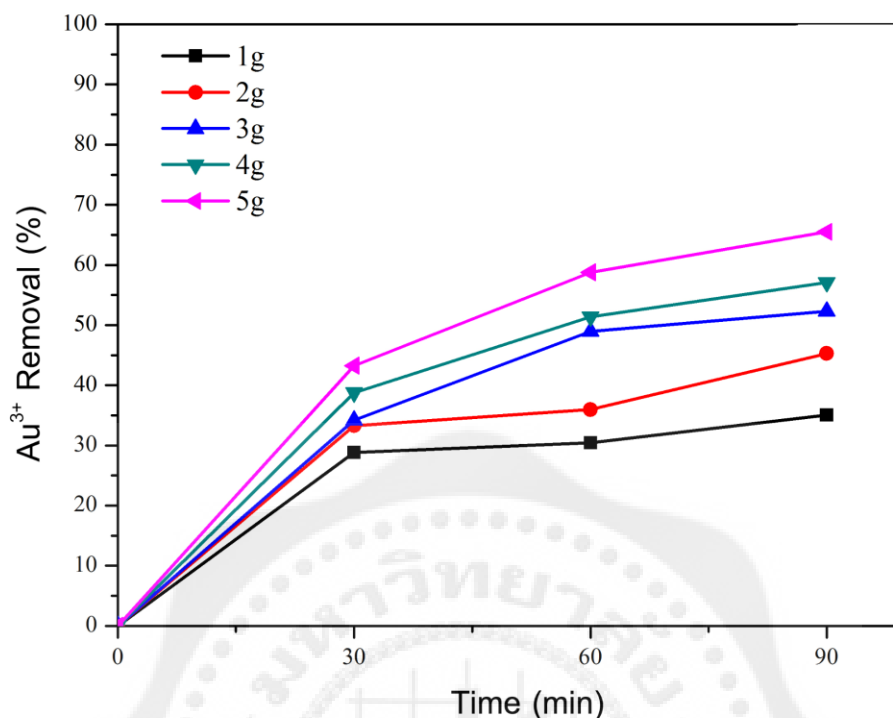
ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ที่ความเข้มข้น 6% (w/v) มีความเข้มข้นของทองในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปริมาตรสารละลาย 50 มิลลิตร โดยปริมาณการดูดซับสูงสุดของความเป็นกรด-ด่าง (pH) 3 และมีค่าการดูดซับร้อยละ 39.29 ของการดูดซับทองในสารละลาย เนื่องจากเกิดการแข่งกันของประจุบวก (Cation)



ภาพประกอบ 31 การดูดซับของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในสารละลายทอง (ความเข้มข้นของทอง: 10 มิลลิกรัมต่อลิตร, ความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์: 6% (w/v), เวลา: 90 นาที, ปริมาตรสารละลาย: 50 มิลลิลิตร)

4.4.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทองต่อความสามารถในการดูดซับ

การดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต 6% (w/v) ในความเข้มข้นของทองในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปริมาตรสารละลาย 50 มิลลิลิตร โดยทำการทดลองด้วยการเพิ่มปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต 6% (w/v) ปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 การดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตต่อปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง (ความเข้มข้นของทอง: 10 มิลลิกรัมต่อลิตร, ความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์: 6% (w/v), ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 3, เวลา: 90 นาที, ปริมาตรสารละลาย: 50 มิลลิลิตร)

จากการวิเคราะห์ภาพประกอบ 32 โดยทำการทดลองของความเป็นกรด-ด่าง (pH) 3 ที่เวลาในการดูดซับ 30 - 90 นาที และมีการเพิ่มปริมาณของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต จากปริมาณ 1 – 5 กรัม พบว่าปริมาณการดูดซับมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับ และมีค่าการดูดซับสูงสุดคือ 5 กรัม ร้อยละ 64.92 ของการดูดซับ ต่อเวลา 90 นาที ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nitayaphat (Nitayaphat; et al. 2015: 850-855)⁽⁶³⁾ ได้ทำการดัดแปรไคโตซาน และขึ้นรูปเป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบไคโตซานกับถ่านไม้ไผ่ (Bamboo charcoal) โดยสามารถนำวัสดุเชิงประกอบดูดซับไอออนเงิน (Silver I) ได้ ซึ่งใช้ปริมาณของเม็ดวัสดุเชิงประกอบไคโตซาน/ถ่านไม้ไผ่เพิ่มขึ้นต่อการดูดซับไอออนเงินและพบว่าปริมาณของการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นมากต่อปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบ

ดังนั้นสามารถสรุปผลการทดลองได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงขึ้น มีผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณเมื่อดัชนีเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ซึ่งที่ค่าการดูดซับสูงสุดคือ 5 กรัม ร้อยละ 64.92 ของการดูดซับ ต่อเวลา 90 นาที

4.5 การวิเคราะห์ไอโซเทิร์มการดูดซับ (Isotherm adsorption) เมื่อดัชนีเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง

การศึกษากระบวนการไอโซเทิร์มของการดูดซับ โดยทั่วไปสมการของไอโซเทิร์มมี 2 สมการ คือ แลงเมียร์ไอโซเทิร์ม (Langmuir adsorption isotherm) และฟรอนด์ลิชไอโซเทิร์ม (Freundlich adsorption isotherm) ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Langmuir isotherm: } \frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{bq_m} \quad \text{จากสมการ 2}$$

$$\text{Freundlich isotherm: } \log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_f \quad \text{จากสมการ 4}$$

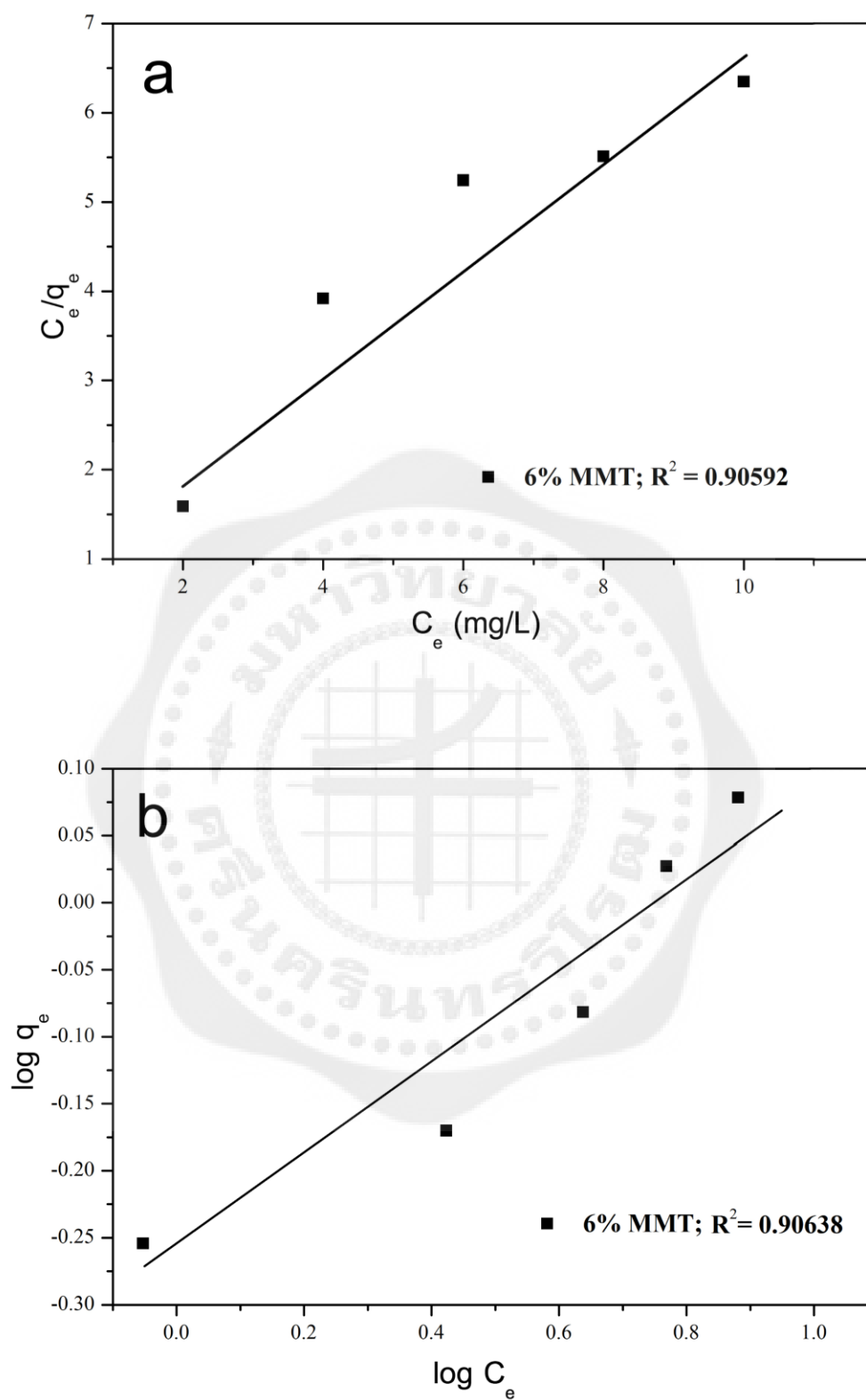
ไอโซเทิร์มการดูดซับสามารถคำนวณค่าแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม (Langmuir adsorption isotherm) ที่อุณหภูมิคงที่ได้จากกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ซึ่งแสดงผลการทดลองดังภาพประกอบ 33a แสดงค่าคงที่ของการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ (q_m) ซึ่งสามารถบอกได้ว่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) และแสดงความสามารถในการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ และจุดตัดแกน y (Intercept) คือ $\frac{1}{bq_m}$ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.90592 ค่าคงที่ของการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ (q_m) มีค่าเท่ากับ 1.49 มิลลิกรัมต่อกรัม และความสามารถสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียว (b) มีค่าเท่ากับ 0.89 ลิตรต่อมิลลิกรัม และสมการฟรอนด์ลิชไอโซเทิร์ม (Freundlich adsorption isotherm) ที่อุณหภูมิคงที่เป็นไอโซเทิร์มที่พัฒนาจากแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ในภาวะที่การดูดซับบนผิววัสดุดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) จากกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง ที่มีความชัน $\frac{1}{n}$ มีค่าเท่ากับ 2.82 และมีค่าคงที่สมการการดูดซับแบบหลายชั้นของฟรอนด์ลิช (K_f) เป็นค่าจุดตัดแกนในแนวดิ่งมีค่าเท่ากับ 1.85 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งพบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.90638 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในภาพประกอบ 33b การศึกษากระบวนการเทอมของการดูดซับที่พิจารณาจากค่าประสิทธิภาพสัมพันธ์ที่มีค่าใกล้เคียง 1 ที่สุด ดังนั้นกระบวนการไอโซเทิร์มของการดูดซับสามารถบอกได้ว่ากระบวนการดูดซับเมื่อดัชนีเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ในสารละลายทองมีความสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม (Langmuir adsorption isotherm) ที่มีความสามารถ

สูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียวและสมการฟรอนด์ลิชไอโซเทิร์ม (Freundlich adsorption isotherm) ที่มีการดูดซับบนผิววัสดุดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งสามารถบอกค่าแสดงผลจากการวิเคราะห์ดังตาราง 4 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับ Barreca (Barreca; et al. 2014: 220-228)⁽⁵⁸⁾ ได้ศึกษาการนำมอนต์มอริลโลไนต์ขึ้นรูปด้วยวิธีเกิดเจลจากแอลจิเนต โดยให้เป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบเพื่อนำไปใช้ในการดูดซับพอลิคคลอไรด์ไบฟีนีล (Polychlorinated biphenyl) โดยศึกษาไอโซเทิร์มในการดูดซับของทฤษฎีของแชปแมน (Chapman sigmoidal equation) ทฤษฎีฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) และทฤษฎีแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าสูงเข้าใกล้หนึ่งทุกค่า จึงสรุปได้ว่าการดูดซับมีความสอดคล้องทั้ง 3 ทฤษฎี

ดังนั้นผลการทดลองทั้ง 2 ชนิดนี้ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับมีส่วนเกี่ยวข้องมากกว่าหนึ่งกลไก ซึ่งสามารถบอกได้ว่าปฏิกิริยาในการดูดซับเกิดขึ้นได้ทั้งเกิดขึ้นในทางกายภาพและทางเคมีพร้อม ๆ กัน

ตาราง 4 ไอโซเทิร์มของการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต

แลงเมียร์ไอโซเทิร์ม (Langmuir adsorption isotherm)	
q_m (mg/g)	1.49
b (L/g)	0.89
R^2	0.90592
ฟรอนด์ลิชไอโซเทิร์ม (Freundlich adsorption isotherm)	
K_f (mg/g)	1.85
$1/n$	0.32461
R^2	0.90638



ภาพประกอบ 33 การดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตต่อเวลาคงที่
 (a) แลงเมียร์ไอโซเทิร์ม (Langmuir adsorption isotherm) (b) และฟรูนดลิชไอโซเทิร์ม
 (Freundlich adsorption isotherm) (ความเข้มข้น 6% (w/v) มอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต)

4.6 การวิเคราะห์จลนศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic adsorption) เมื่อดูดซับวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง

การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับเมื่อดูดซับวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์ในสารละลายทอง เป็นการการศึกษาอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการดูดซับโดยใช้แบบจำลอง Lagergren's pseudo-first-order และ Ho's pseudo-second-order โดยสมการปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) ดังแสดงในสมการ 6

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t$$

จากสมการ 6

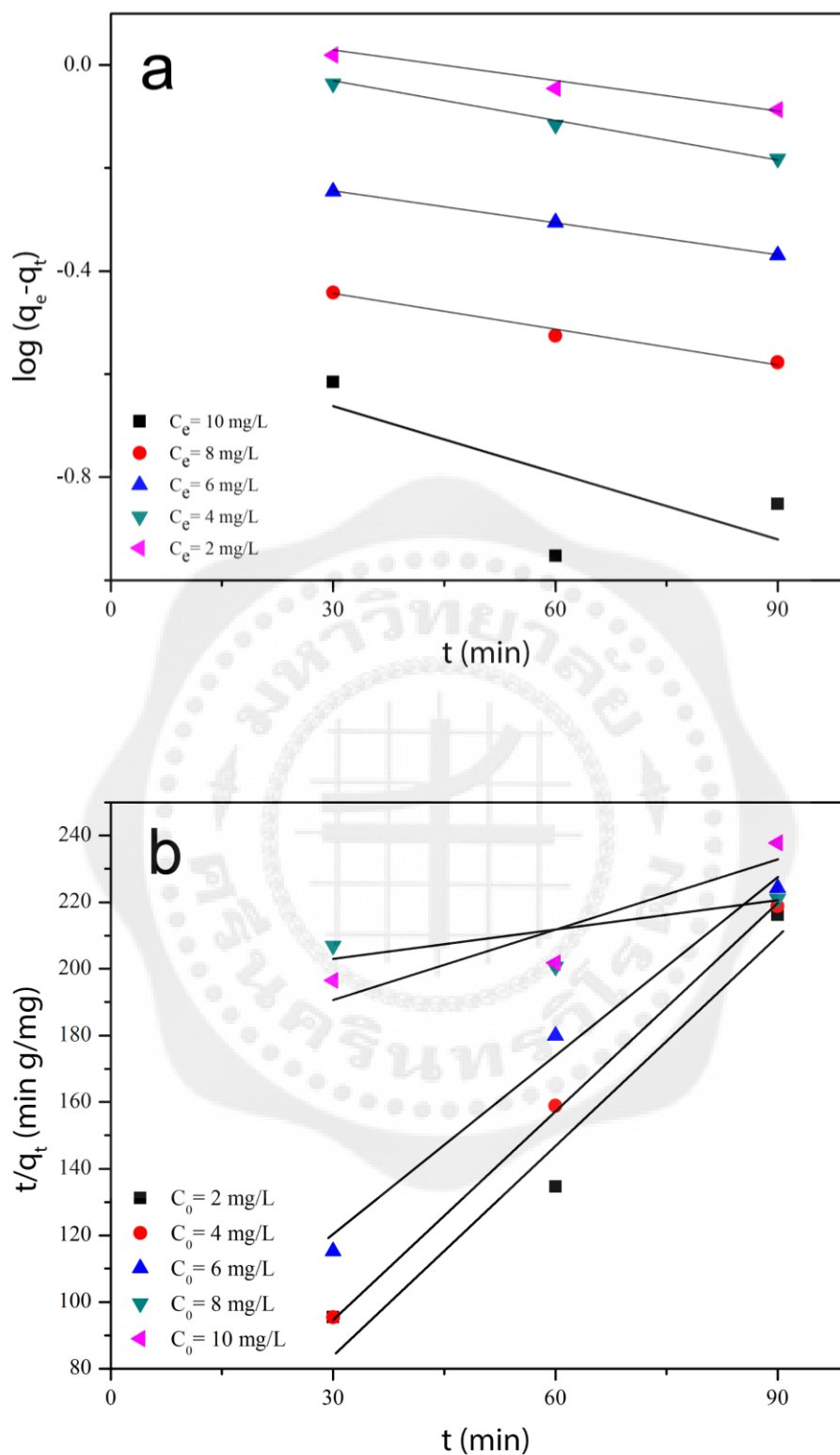
สามารถนำข้อมูลจากการศึกษาผลความเข้มข้นและอุณหภูมิของการดูดซับจากสมการ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t ได้กราฟเส้นตรง ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) หาได้จากความชัน (Slope) คือ $-\frac{k_1}{2.303}$ และ q_e สามารถหาจุดตัดของเส้นตรงได้ และสมการปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo-second-order) ดังแสดงในสมการ 8

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

จากสมการ 8

ตาราง 5 จลนศาสตร์ของการดูดซับเมื่อดูดซับวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต

C ₀ (mg/L)	q _{e(exp)} (mg/g)	Pseudo-first-order			Pseudo-second-order		
		q _{e(cal)} (mg/g)	K ₁ (min ⁻¹)	R ²	q _{e(cal)} (mg/g)	K ₂ (g/mg min)	R ²
2	0.886	0.55	-0.2368	0.46	0.008	519.96	0.96
4	2.648	0.67	-0.1354	0.98	0.0081	444.33	0.99
6	4.343	0.82	-0.1239	0.99	0.0091	185.36	0.98
8	5.87	1.06	-0.1457	0.99	0.0707	1.02	0.45
10	7.604	1.19	-0.1057	0.98	0.0247	9.97	0.84



ภาพประกอบ 34 จลนศาสตร์ของการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจีเนต
 (a) ปฏิกริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) (b) ปฏิกริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo-second-order)

สามารถนำข้อมูลผลความเข้มข้นและอุณหภูมิของการดูดซับจากสมการ 8 มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{t}{q_t}$ กับ t จะได้กราฟเส้นตรง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo-second-order) (k_2) สามารถหาได้จากจุดตัดแกนเส้นตรง (Intercept) คือ $\frac{1}{k_2 q_e^2}$ นำข้อมูลเบื้องต้นของการดูดซับความเป็นกรด-ด่าง ต่อความสามารถในการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง ซึ่งเขียนกราฟเส้นตรงตามสมการปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) และสมการปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo-second-order) แสดงภาพประกอบ 34a พบว่าที่ค่าเริ่มต้นของความเข้มข้นของทองในสารละลายของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) ที่ 2, 4, 6, 8, 10 มิลลิกรัมตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) คือ 0.46, 0.98, 0.99, 0.99, 0.98 ตามลำดับ ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) (k_1) และอัตราในการดูดซับ ณ เวลาสมดุล ($q_{e(cal)}$) แสดงในตาราง 5 และแสดงภาพประกอบ 34b พบว่าที่ค่าเริ่มต้นของความเข้มข้นของทองในสารละลายของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo-second-order) ที่ 2, 4, 6, 8, 10 มิลลิกรัมตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) คือ 0.96, 0.99, 0.98, 0.45, 0.84 ตามลำดับ ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo-second-order) (k_2) และอัตราในการดูดซับ ณ เวลาสมดุล ($q_{e(cal)}$) แสดงในตาราง 5 โดยการวิเคราะห์ผลมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Meng (Meng; et al. 2018: 271-280)⁽⁵⁶⁾ ได้ทำการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยลิเทียมเพื่อให้มีลักษณะโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์แยกชั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับมากขึ้น โดยนำมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมาขึ้นรูปเป็นเม็ดด้วยกระบวนการเกิดเจลของแอลจิเนตและใช้ดูดซับซีเซียม (Cs^+) ออกจากสารละลาย ซึ่งการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับได้อภิปรายผลในลักษณะเดียวกัน โดยที่การทดลองสอดคล้องกับค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากสมการปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) ซึ่งสามารถอธิบายอัตราเร็วของปฏิกิริยาในการดูดซับได้

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากสมการปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมากกว่าสมการปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo-second-order) ซึ่งพิจารณาช่วงเวลาของการดูดซับ พบว่าสมการปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) สามารถใช้ได้ตลอดช่วงเวลาของการดูดซับ ซึ่งการดูดซับไอออนทองของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต เป็นไปตามปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) จึงเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมีในสารละลายทอง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) สูงกว่าอยู่ 0.45 แสดงว่าปฏิกิริยาการดูดซับทองในสารละลายมีความซับซ้อนไม่มาก โดยสอดคล้องกับทฤษฎีจลนศาสตร์การดูดซับ ซึ่งกระบวนการดูดซับทองในสารละลายของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตสามารถอธิบายจากภาพประกอบ 34

4.7 การวิเคราะห์การคายซับของการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง

การทดลองผลเพื่อให้ทราบถึงสภาวะของไอออนทองในสารละลายสามารถหลุดออกจากผิวเม็ดวัสดุมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตได้ ซึ่งเป็นกระบวนการย้อนกลับของการดูดซับเรียกว่า การคายซับ (Desorption) ซึ่งใช้ความเข้มข้นของทอง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ตั้งแต่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 โดยใช้เม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ 6% (w/v) , เวลา 90 นาที, ปริมาตรสารละลาย 50 มิลลิตร โดยผลการทดลองการคายซับแสดงผลการทดลองในตาราง 6 และภาพประกอบ 35

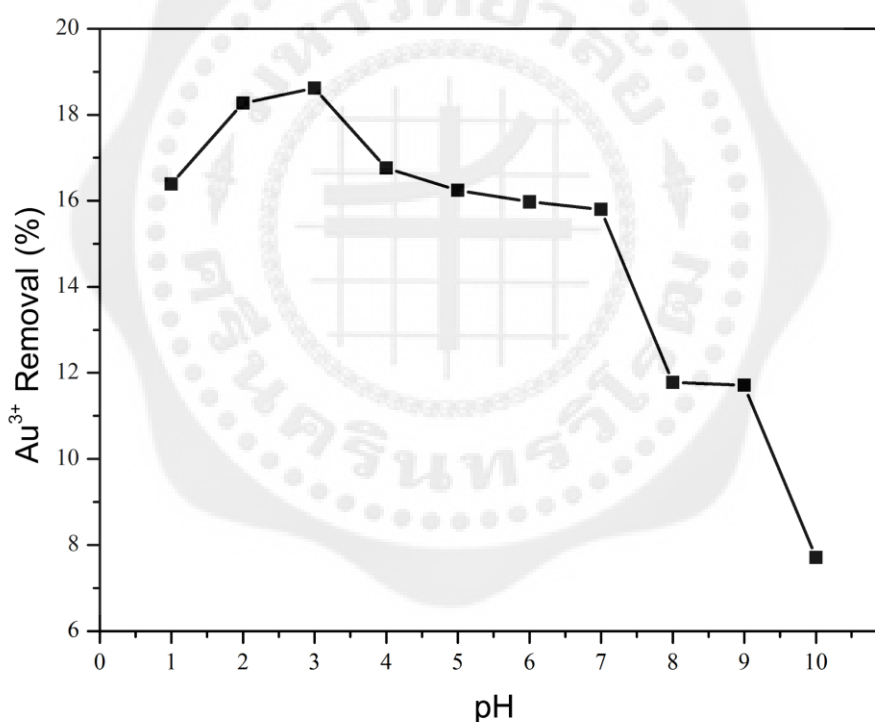
ตาราง 6 การคายซับของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ความเข้มข้น 6% (w/v) ความเข้มข้นของทอง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลา 90 นาที

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	ร้อยละของการคายซับ
1	16.389
2	18.267
3	18.613
4	16.241
5	15.796
6	15.763
7	14.973
8	11.777
9	11.711
10	7.709

จากการพิจารณาค่าของความเป็นกรด-ด่าง (pH) สามารถวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง (pH) 1 มีค่าการคายซับร้อยละ 16.389 ความเป็นกรด-ด่าง (pH) 2 มีค่าการคายซับร้อยละ 18.267 และมีค่าการคายซับที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 3 มีค่าการคายซับสูงสุดคือ ร้อยละ 18.613 และหลังจากนั้นค่าการคายซับมีค่าลดต่ำถึงร้อยละ 7.709 ที่ความเป็นกรด-ด่าง (pH) 10 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่าประสิทธิภาพของการคายซับของทองที่มีประจุบวกและจากพื้นผิวเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ที่มีประจุลบในค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 3 มีผลแบบเดียวกันกับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เช่นเดียวกับประสิทธิภาพการดูดซับ ซึ่งอาจสามารถ

อธิบายได้ว่าเกิดการแข่งขันกันของประจุบวกระหว่างไอออนทอง (Au^{3+}) และโปรตอน (H^+) ทำให้ไอออนทองเกิดปฏิกิริยาดูดซับและคายซับในเวลาเดียวกัน แต่เนื่องจากว่าในการทดลองการคายซับนั้นเป็นการทดลองเป็นการนำเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตคายซับในน้ำกลั่น ทำให้ไม่สามารถเกิดกระบวนการดูดซับทองในสารละลายที่มีสภาวะเป็นกรดได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์มีลักษณะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhao (Zhao; et al. 2010: 154-159)⁽⁵⁹⁾ ได้ทำการศึกษาการดูดซับและการคายซับแอนติโมนี อะซีเตต (Antimony acetate) ด้วยโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Sodium montmorillonite) จากผลการทดลองพบว่าการศึกษาการคายซับสามารถคายซับได้ดีที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 180°C ในสภาวะความเป็นกรด ซึ่งแสดงให้เห็นว่างานวิจัยของ Zhao มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการคายซับที่มีค่าสูงสุดร้อยละ 18.61 ของของความเป็นกรดต่าง (pH) 3 และเกิดปฏิกิริยาคายซับมากกว่าเมื่อเทียบกับสภาวะการดูดซับในน้ำกลั่น



ภาพประกอบ 35 การคายซับของการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต (ความเข้มข้นของทอง: 10 มิลลิกรัมต่อลิตร, ความเข้มข้นของมอนต์มอริลโลไนต์: 6 % (w/v), เวลา: 90 นาที, ปริมาตรสารละลาย: 50 มิลลิลิตร)

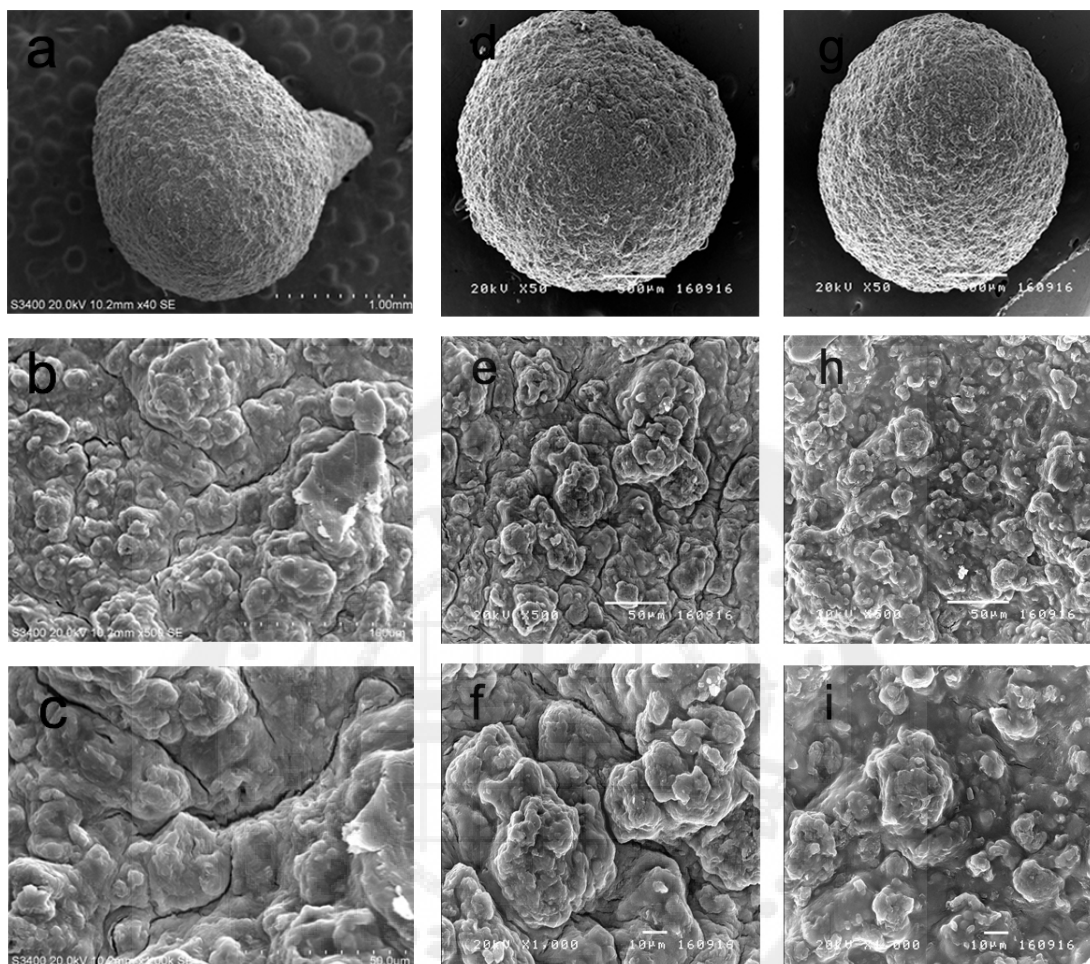
4.8 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของมอนต์มอริลโลไนต์

4.8.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต เป็นการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเม็ดวัสดุเชิงประกอบ เพื่อให้ทราบลักษณะสัณฐานในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และแสดงผลการวิเคราะห์ตามภาพที่ 36 ซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) สามารถบอกลักษณะพื้นผิวของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตซึ่งภาพประกอบ 36a, b และ c คือภาพเม็ดวัสดุแอลจิเนตที่ทำการดูดซับทองจากสารละลายในกำลังขยาย 50 เท่า, 500 เท่า และ 1000 เท่า ตามลำดับ ภาพประกอบ 36d, e และ f คือภาพเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตที่ยังไม่ผ่านกระบวนการดูดซับในกำลังขยาย 50 เท่า, 500 เท่า และ 1000 เท่า และภาพประกอบ 36g, h และ i คือภาพเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตที่ผ่านกระบวนการดูดซับทองในสารละลายในกำลังขยาย 50 เท่า, 500 เท่า และ 1000 เท่า โดยภาพประกอบ 36 แสดงให้เห็นว่าลักษณะสัณฐานของเม็ดวัสดุภาพมีพื้นผิวที่ขรุขระไม่เรียบสม่ำเสมอเช่นเดียวกับการมองเห็นปกติ ซึ่งเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตที่ทำการดูดซับทองจากสารละลาย สังเกตได้ว่าพื้นผิวมีลักษณะที่เรียบขึ้น เนื่องจากว่าเม็ดวัสดุผ่านกระบวนการดูดซับที่อยู่ในสภาวะเป็นกรดและมีไอออนของทองยึดเกาะที่พื้นผิว ซึ่งสามารถบอกลักษณะได้ดังภาพประกอบ 37 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer: EDX ซึ่งในภาพจะแสดงพื้นผิวที่มีไอออนของทองเป็นจุดสีแดงได้ชัดเจน โดยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีลักษณะเช่นเดียวกันกับ Brigatti (Brigatti; et al. 1995: 383-395)⁽⁶⁴⁾ Brigatti ได้ทำการศึกษามอนต์มอริลโลไนต์ด้วยดูดซับน้ำเสียจากโรงงาน ซึ่งใช้สังกะสี (Zn^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) เป็นโลหะดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ โดยการนำมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรดูดซับน้ำเสียจากโรงงานที่ 1 โมล และผลวิเคราะห์จากการทดลองได้ว่าการดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสอดคล้องกับทฤษฎีแลงเมียร์ และได้นำมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา พบว่ามอนต์มอริลโลไนต์มีไอออนของโลหะหนักและโลหะที่นำมาดัดแปรอยู่ในชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่างานวิจัยของ Brigatti มีผลสอดคล้องในทิศทางเดียวกัน

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าภาพประกอบ 36 เป็นภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ซึ่งสามารถบอกลักษณะของพื้นผิวได้ว่าลักษณะของพื้นผิวขรุขระ แต่เนื่องจากว่าลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระไม่ต่างกันมาก จึงทำให้ยากต่อสังเกตว่าพื้นผิวชนิดใดดูดซับได้ดี โดยใช้เทคนิค Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer:

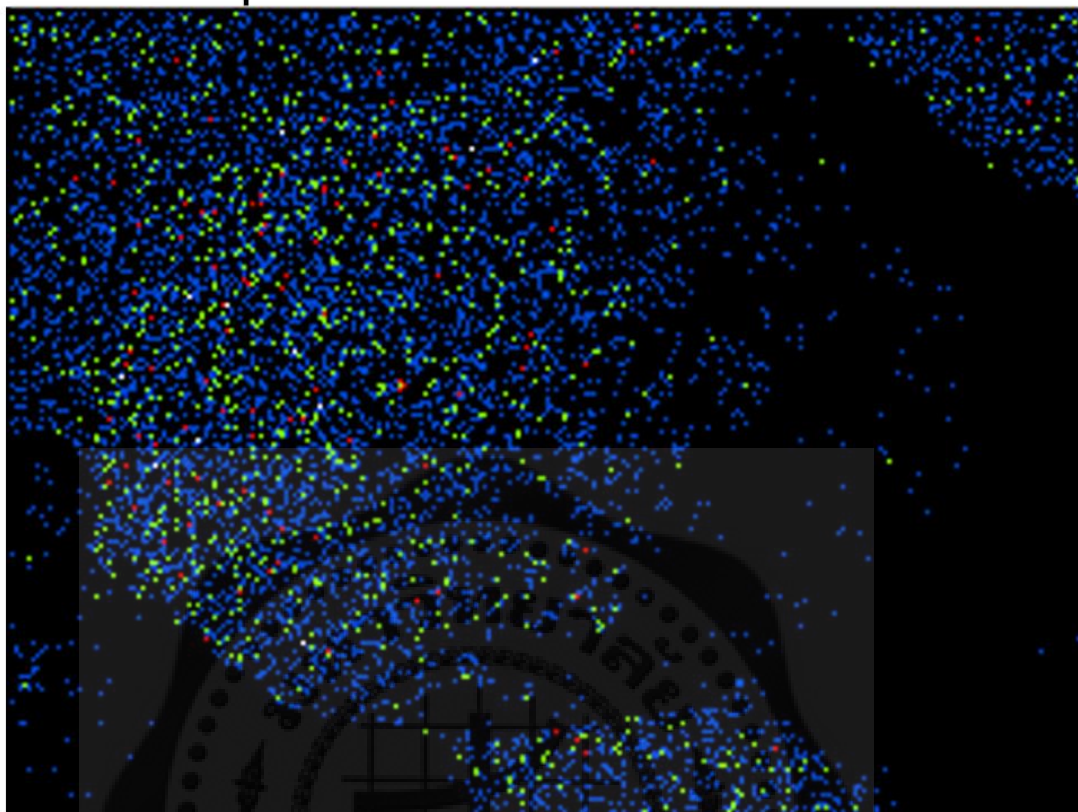
EDX ร่วมวิเคราะห์ ซึ่งสามารถบอกได้ชัดเจนว่าปริมาณของไอออนทองเข้าไปยึดเกาะในวัสดุเชิงประกอบจากภาพประกอบ 37



ภาพประกอบ 36 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) (a - c); เม็ดวัสดุแอลจิเนต (d - f); เม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตที่ยังไม่ผ่านกระบวนการดูดซับ (g - i); เม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตที่ผ่านกระบวนการดูดซับ

Au = Red point



ภาพประกอบ 37 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ
ส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) เทคนิค Energy Dispersive X-ray: EDX
ของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจีเนตที่ผ่านกระบวนการดูดซับ

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยนี้ได้นำมอนต์มอริลโลไนต์มาดัดแปร และนำมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรขึ้นรูปเป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีเกิดเจล โดยมีปริมาตรของแอลจิเนต 2 % (w/v) และมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาตร 1%, 2%, 3%, 4%, 5% และ 6 % (w/v) ตามลำดับ แต่ละอัตราส่วนนำไปใช้ศึกษาในกระบวนการการดูดซับ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับ, จลนศาสตร์การดูดซับ และการคายซับจากเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตจากสารละลายทอง สามารถสรุปจากผลการทดลองในแต่ละหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

5.1. ผลวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction

ผลการวิเคราะห์มอนต์มอริลโลไนต์ของระนาบ d_{001} ปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 5.98° มีระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ของมอนต์มอริลโลไนต์ (d_{001}) เท่ากับ 14.77 อังสตรอม (Å) และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium salt) มีพีคของระนาบ d_{001} ปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 4.84° มีระยะห่างระหว่างระนาบ d_{001} ของมอนต์มอริลโลไนต์ เท่ากับ 18.24 อังสตรอม (Å) และพบว่าการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์สอดคล้องกับลักษณะของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรแบบแตกชั้น (Exfoliated nanocomposite)

5.2. การวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต

เม็ดวัสดุแอลจิเนต และเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 %w/v มีลักษณะทรงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นต่อการเพิ่มปริมาตรของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรและความหนาแน่นมากกว่าน้ำ จึงเหมาะสำหรับที่จะนำมาใช้งานให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนทองจากสารละลาย และในทุก ๆ อัตราส่วนมีความหนาแน่นกว่าน้ำ ซึ่งเม็ดวัสดุไม่สามารถลอยขึ้นเหนือผิวน้ำได้

5.3. การวิเคราะห์ความเป็นประจุบนพื้นผิวเม็ดวัสดุแอลจิเนตและเม็ดเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต

การวิเคราะห์ผลการทดลองของแอลจิเนต มอนต์มอริลโลไนต์ และเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ที่ความเข้มข้น 6% (w/v) ที่ศึกษาในสภาวะความเป็นกรด-ต่าง (pH) 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 พบว่าวัสดุที่นำมาศึกษามีลักษณะพื้นผิวเป็นประจุลบ จึงมีสมบัติที่เหมาะสมแก่การนำมาเป็นวัสดุดูดซับไอออนทองจากสารละลายได้

5.4. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง

5.4.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอัตราส่วนและเวลาต่อความสามารถในการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับของเม็ดวัสดุแอลจิเนตและเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ที่ความเข้มข้น ที่ 1%, 2%, 3%, 4%, 5% และ 6% (w/v) ในสารละลายทอง สามารถแบ่งเวลาเป็น 6 ช่วงเวลา คือ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 0 - 360 นาที และเวลาที่ดีที่สุดในการดูดซับคือ 90 นาที โดยสามารถดูดซับทองได้มากถึงร้อยละ 42.48 และใช้ความเข้มข้นของทองในสารละลาย คือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ความอัตราส่วนของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดีที่สุดต่อการดูดซับคือ 6% (w/v)

5.4.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของค่าความเป็นกรด-ต่าง (pH) ต่อความสามารถในการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง

การดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต 6% (w/v) ในความเข้มข้นของทองในสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรสารละลาย 50 มิลลิลิตร โดยมีปริมาตรการดูดซับสูงสุดของสภาวะความเป็นกรด-ต่าง (pH) ที่ 3 และสามารถดูดซับทองในสารละลายได้ร้อยละ 39.29 เนื่องจากเกิดการแข่งขันกันของประจุบวก (Cation)

5.4.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทองต่อความสามารถในการดูดซับ

การดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตที่ 6 %w/v ในสารละลายทอง โดยเพิ่มปริมาณของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต จากปริมาณ 1 – 5 กรัม พบว่าปริมาณการดูดซับมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น ซึ่งมีอัตราการดูดซับสูงสุดคือ 5 กรัม ที่ร้อยละ 64.92 ของการดูดซับทองในสารละลาย ต่อเวลา 90 นาที

5.5 การวิเคราะห์ไอโซเทิร์มการดูดซับ (Isotherm adsorption) เม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง

การศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตที่มีความเข้มข้น 6% (w/v) ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม (Langmuir adsorption isotherm) ที่มีความสามารถสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียวและสมการฟรุนดลิชไอโซเทิร์ม (Freundlich adsorption isotherm) ที่มีการดูดซับบนผิววัสดุดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งผลการทดลองทั้ง 2 ชนิดนี้ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับมีส่วนเกี่ยวข้องมากกว่าหนึ่งกลไก

5.6 การวิเคราะห์จลนศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic adsorption) เม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากสมการปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) มีสมการเส้นตรงมากกว่าสมการปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo-second-order) ซึ่งพิจารณาช่วงเวลาของการดูดซับ ซึ่งการดูดซับไอออนทองของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต เป็นไปปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) จึงเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมีในสารละลายทอง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order) สูงกว่าอยู่ 0.45 และการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับไอออนทองด้วยเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต มีความสอดคล้องกับปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo-first order)

5.7 การวิเคราะห์การคายซับของการดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนตในสารละลายทอง

การคายซับ (Desorption) โดยค่าการคายซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองคือ ปริมาณการคายซับสูงสุดที่ร้อยละ 18.61 ที่สภาวะความเป็นกรด (pH) 3 ซึ่งอาจสามารถอธิบายได้ว่าการแก่งแย่งกันของประจุบวกระหว่างไอออนทอง (Au^{3+}) และ โปรตอน (H^+) ทำให้ไอออนทองเกิดปฏิกิริยาดูดซับและคายซับในเวลาเดียวกัน ซึ่งในการทดลองการคายซับเป็นการทดลองในน้ำกลั่นที่มีสภาวะเป็นกรด จึงเกิดปฏิกิริยาคายซับมากกว่า เมื่อเทียบกับสภาวะการดูดซับในสารละลายทอง

5.8 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกและลักษณะสัญญาณวิทยาของมอนต์มอริลโลไนต์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต ที่ความเข้มข้น 6% (w/v) ที่ผ่านกระบวนการการดูดซับและไม่ผ่านกระบวนการดูดซับ

และเม็ดวัสดุแอลจีเนต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) สามารถบอกลักษณะพื้นผิวขรุขระไม่เรียบ และสามารถเห็นได้ว่าปริมาณของทองในเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจีเนตที่ผ่านกระบวนการการดูดซับทองด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer: EDX มีโลหะทองอยู่มากกว่าเม็ดวัสดุแอลจีเนต

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับของมอนต์มอริลโลไนต์และสามารถนำมอนต์มอริลโลไนต์ให้เกิดกระบวนการการคายซับของทองออกจากพื้นผิวได้ แต่เนื่องจากว่าประสิทธิภาพการคายซับไม่ดีเท่าที่ควร โดยมีค่าการคายซับสูงสุดคือ ร้อยละ 18.61 ซึ่งถือเป็นค่าที่น้อยมากเมื่อต้องนำไปใช้ในอุตสาหกรรมชุบทอง ในงานวิจัยต่อไปควรเพิ่มประสิทธิภาพในการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ โดยอาจจะต้องเพิ่มรอบในการปั่นสูงขึ้นเพื่อให้ชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์แยกชั้นมากขึ้น การเขย่าสารโดยเพิ่มรอบในการเขย่า และการเพิ่มอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- [1]. Li Zhoua, Qunyan Yu, Ying Cui, Fei Xie, Wenjiang Li, Yongwei Li, Minfang Chen.
Adsorption properties of activated carbon from reed with a high adsorption capacity. International Reference Journal of Ecological Engineering. 2017; 443-450.
- [2].Reni Banowati Istiningrum, Christny Desiree Tiwow, Nuryonob Narsito. Au (III) Selective Adsorption of Quaternary Ammonium-Silica Hybrid in Au/Cu System. Procedia Chemistry 2015; 132-138.
- [3].Mengjuan Yang, Jianwei Lin, Yanhui Zhan, Honghua Zhang. Adsorption of phosphate from water on lake sediments amended with zirconium-modified zeolites in batch mode. Ecological Engineering 2014; 223-233.
- [4]. E. Pehlivan, T.H. Tran, W.K.I. Ouédraogo, C. Schmidt, D. Zachmann, M. Bahadir.
Removal of As (V) from aqueous solutions by iron coated rice husk. Fuel Processing Technology 2013; 443-450.
- [5]. Dagang Liu, Yi Zhu, Zehui Li, Donglin Tian, Lei Chen, Peng Chen, Chitin nanofibrils for rapid and efficient removal of metal ions from water system. Carbohydrate Polymers. 2013; 483-489.
- [6]. Glatstein Daniel A., Francisca Franco M. Influence of pH and ionic strength on Cd, Cu and Pb removal from water by adsorption in Na-bentonite. Applied Clay Science 2015; 61-67.
- [7]. Vanessa E. dos Anjos, Jarbas R. Rohwedder, Solange Cadore, Gilberto Abate, Marco T. Grassi. Montmorillonite and vermiculite as solid phases for the preconcentration of trace elements in natural waters: Adsorption and desorption studies of As, Ba, Cu, Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Pb, Sr, V, and Zn. Applied Clay Science 2014; 289–296.
- [8]. Chongmin Liu, Pingxiao Wu, Yajie Zhu, Lytuong Tran. Simultaneous adsorption of Cd²⁺ and BPA on amphoteric surfactant activated montmorillonite. 2015; 1026–1032.
- [9]. Guifang Wang, Yuyan Hua, Xin Su, Sridhar Komarneni, Shaojian Ma, Yujue Wang.
Cr(VI) adsorption by montmorillonite nanocomposites. Applied Clay Science 2016; 124–125: 111–118.
- [10]. Jiaojiao Wu , Bing Li, Jiali Liao, Yue Feng, Dong Zhang, Jun Zhao, Wei Wen, Yuanyou Yang, Ning Liu. Behavior and analysis of Cesium adsorption on montmorillonite mineral. Journal of Environmental Radioactivity 2009; 914–920.

- [11]. Wei, Shang Tan, Adeline, Su Yien Ting. Alginate-immobilized bentonite clay: Adsorption efficacy and reusability for Cu(II) removal from aqueous solution. *Bioresource Technology*. 2013;160: 115–118.
- [12]. Lingya Ma, Qingze Chen, Jianxi Zhu, Yunfei Xi, Hong ping He, Runliang Zhu, Qi Tao, Godwin A. Ayoko. Adsorption of phenol and Cu (II) onto cationic and zwitterionic surfactant modified montmorillonite in single and binary systems. *Chemical Engineering Journal*. 2015; 283: 880–888.
- [13]. Runliang Zhu, Qingze Chen, Qing Zhou, Yunfei Xi, Jianxi Zhu, Hongping He. Adsorbents based on montmorillonite for contaminant removal from water: A review. *Applied Clay Science*. 2016; 123: 239–258.
- [14]. กษมา จารุกัจฉา. ผลของนาโนเคลย์ต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์. นครราชสีมา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, SUT7-710-53-12-14; 10-13.
- [15]. พุฒิพัฒน์ เบญจปรีชาพัฒน์. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์. กรุงเทพมหานคร. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2012; 57-60.
- [16]. ไพจิตร ยิงศิริวัฒน์. เนื้อดินเซรามิกซ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. 1998.
- [17]. Schaller, Chris P. *Structure & Reactivity in Organic, Biological and Inorganic Chemistry*. 2016.
- [18]. Sardashti, Amirpouyan. *Wheat Straw-Clay-Polypropylene Hybrid Composites*. 2009.
- [19]. สุรวดี สุขเลิศ. โซเดียมเบนโทไนท์ (Sodium Bentonite) ส่งผลกระทบต่อพืชได้อย่างไร. [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 14 ธันวาคม 2016].
- [20] Modification of Montmorillonite Clay. [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ January 2017]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.pslc.ws/macrog/mpm/composit/nano/modify1.htm>
- [21]. Pankil Singla, Rajeev Mehta, Siddh Nath Upadhyay. Clay Modification by the Use of Organic Cations. 2011; 21-25
- [22]. Gilman, J. W. Nanocomposite: A revolutionary new flame-retardant approach. *Sampe Journal*. 1997; 33(4):40-46.
- [23]. Hetzer Max, De Kee Daniel. Wood/polymer/nanoclay composites, environmentally friendly sustainable technology: A review. *Chemical Engineering Research and Design*. 2008; 1083-1093.
- [24]. Shahed Taheri, Gity Mir Mohamad Sadeghi. Microstructure–property relationships of organo-montmorillonite/ polyurethane nanocomposites: Influence of hard segment content. *Applied Clay Science*. 2015; 114: 430–439.

- [25]. Bing Han, Gending Ji, Shishan Wu, Jian Shen. Preparation and characterization of nylon 66/montmorillonite nanocomposites with co-treated montmorillonites. *European Polymer Journal*. 2002; 1641–1646.
- [26]. Shipeng Zhu, Jinyao Chen, Yuan Zuo, Huilin Li, Ya Cao. Montmorillonite/polypropylene nanocomposites: Mechanical properties, crystallization and rheological behaviors. *Applied Clay Science*. 2010; 52: 171-178.
- [27]. Chen, T.K., Tien, Y.I., and Wei, K.H. Synthesis and characterization of novel segmented polyurethane/clay nanocomposites. *Polymer*. 1999; 41: 1345–1353.
- [28]. Davis, Rick D., and Gilman, Jeffery W. Processing degradation of polyamide 6/montmorillonite clay nanocomposites and clay organic modifier. *Polymer Degradation and Stability*. 2002; 111–121.
- [29]. Xiaohui, Liu. Qiuju, Wu. PP/clay nanocomposites prepared by grafting-melt intercalation. *Polymer*. 2001; 42: 10013-10019.
- [30]. Preeti, Singh V. Mesopous titania. Spheres derived from sodium alginate-gum acacis composite beads: efficient adsorbent for “Reactive blue H5G” dye. *Journal of environmental chemical engineering*. 2015; 3: 2727-37.
- [31]. Yang L, Ma X, Guo N. Sodium alginate/ Na^+ -reitorite composite microspheres: preparation, characterization, and dye adsorption. *Carbohydrate polymer*. 2012; 853-8.
- [32]. Keita, Kashima., and Masanao, Imai. Advanced Membrane Material from Marine Biological Polymer and Sensitive Molecular-Size Recognition for Promising Separation Technology. *Environmental Engineering*. 2012; 978-953-51-0704-0.
- [33]. โชคชัย วนภู. รายงานฉบับสมบูรณ์เรื่องการผลิตอัลจินตโดยเชื้อ Zoroaster vineland และการประยุกต์ใช้ในการตรึงเอนไซม์เพื่อการอุตสาหกรรม. สาขาวิชาชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีเกษตร, นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2007.
- [34]. หฤทกัฏ กิรติเสวี. จัตรชัย วีระนิติสกุล. อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี. ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ. วิศวกรรมสารมก. ฉบับที่ 70 พฤศจิกายน 2009.
- [35]. อาติละย์ ศิริวัลลภ. วัสดุเชิงประกอบจากโฟมพอลิสไตรีนไฮเซลและเส้นใยธรรมชาติ. สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2016; 28-32
- [36]. อุตสาหกรรมชุบโลหะ ความรู้เกี่ยวกับอุตสาหกรรม. [อินเทอร์เน็ต] [เข้าถึงเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2016]. เข้าถึงได้จาก http://www2.diw.go.th/I_Standard/Web/pane_files/Industry26.asp
- [37]. มูลนิธิสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. คู่มือ Lean Management for Environment สำหรับอุตสาหกรรมเกี่ยวกับโลหะ. นนทบุรี; มูลนิธิสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. 2012; 39-43, 49-50

- [38]. อานนท์ นนทโส. ทองคำ. [อินเทอร์เน็ต] [เข้าถึงเมื่อ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2017] เข้าถึงได้จาก http://kanchanapisek.or.th/kp6/Ebook/BOOK36/pdf/book36_4.pdf
- [39]. กองเศรษฐกิจธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี. แหล่งแร่ทองคำในประเทศไทย. ในแผนที่และแหล่งแร่ของไทย ฉบับที่ 1. กรุงเทพฯ :กรมทรัพยากรธรณี, 2010.
- [40]. ลลิตา แสงอาทิตย์. การดูดซับยาปฏิชีวนะ Norfloxacin โดยเถ้าแกลบที่ pH 5-8 [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต] กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2011.
- [41]. Adsorption and Desorption. [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 16 กุมภาพันธ์ 2017]. เข้าถึงได้จาก <http://userscontent2.emaze.com/images/95ab03fb-1f79-4675-ba22-66f41b33d3c6/7b98d515-71a0-4c36-bf04-374184ea626eimage10.jpeg>
- [42]. วรวิทย์ จันทรสุวรรณ. รายงานฉบับสมบูรณ์ ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลาย โดยใช้ธูปมูลเบาเป็นตัวดูดซับ .คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี; กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร; 2015.
- [43]. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์., และวีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์., 2010. การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับธรรมชาติ .ปีที่27, ฉบับธันวาคม 2010. คณะวิศวกรรมศาสตร์; กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [44] vlab.amrita.edu. Adsorption Isotherm. [อินเทอร์เน็ต] [เข้าถึงเมื่อ 17 มีนาคม 2017]. เข้าถึงได้จาก <http://vlab.amrita.edu/?sub=2&brch=190&sim=606&cnt=1>.
- [45]. Atkins, Peter., dePaula, Julio. Physical Chemistry. New Youk: W. H. Freeman and Company. 2006; 916-922.
- [46]. เสาวภา ไวยสุศรี. การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต. 2015; 11-17.
- [47]. ชนัญชิตา สายชุมดี. การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้เครื่อง AAS. [อินเทอร์เน็ต] [เข้าถึงเมื่อ 16 ธันวาคม 2016]. เข้าถึงได้จาก <http://www2.diw.go.th/Research/เอกสารเผยแพร่/เครื่องAAS.pdf>.
- [48]. สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน. คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า เล่มที่ 2. กรุงเทพมหานคร: กรมพัฒนาที่ดิน. 2004; 65-66. [อินเทอร์เน็ต] [เข้าหาเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2017] เข้าถึงได้จาก <http://e-library.ldd.go.th/library/Ebook/bib230.pdf>.
- [49]. นิวัฒน์ ศรีสวัสดิ์, ภิญญา พานิชพันธ์, พินทิพ รื่นวงษา. มหัศจรรย์นาโนเทคโนโลยี [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. [เข้าหาเมื่อ 17 กุมภาพันธ์ 2016]. เข้าหาได้จาก: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>

- [50]. Susan, Swapp. Scanning Electron Microscopy (SEM). [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าหาเมื่อ 16 กุมภาพันธ์ 2016]. เข้าหาได้จาก:
http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html.
- [51]. ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. วัสดุวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น; 2014.
- [52]. X-ray diffraction (XRD). [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าหาเมื่อ 16 กุมภาพันธ์ 2016]. เข้าหาได้จาก:
<http://www.nhm.ac.uk/our-science/departments-and-staff/core-research-labs/imaging-and-analysis-centre/x-ray-diffraction-lab.html>
- [53]. พิศิษฐ์ สิงห์ใจ. การวัดขนาดอนุภาคระดับนาโนโดยใช้เครื่อง DLS และ Zeta potential sizer. วารสารคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2008;2:143-53.
- [54]. Malvern Zetasizer Nano-ZS. [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าหาเมื่อ 16 กุมภาพันธ์ 2016]. เข้าหาได้จาก: <https://www2.uni-paderborn.de/en/fakultaeten/nw/departments-ofchemistry/research/tc/cmp/facilities/zetasizer-nano-zs/>
- [55]. Kessara Jitniyom, Anchalee Suddhiprakarn, Irb Kheoruenromne. Adsorption of lead, zinc, copper and cadmium of smectite. The Thailand Research Fund, Bangkok (Thailand). 2012; 136-143.
- [56]. Meng Xia, Xianming Zheng, Mingyang Du, Yingying Wang, Aizhong Ding, Junfeng Dou. The adsorption of Cs^+ from wastewater using lithium-modified montmorillonite caged in calcium alginate beads. Chemosphere 2018; 271-280.
- [57]. Huiwen Zhu, Xiyuan Xiao, Zhaohui Guo, Xiaoqing Han, Yuqin Liang, Yong Zhang, Cong Zhou. Adsorption of vanadium (V) on natural kaolinite and montmorillonite: Characteristics and mechanism. Applied Clay Science. 2018; 310-316.
- [58]. Salvatore Barreca, Santino Orecchio, Andrea Pace. The effect of montmorillonite clay in alginate gel beads for polychlorinated biphenyl adsorption: Isothermal and kinetic studies. Applied Clay Science. 2014; 220-228.
- [59]. Zhenlu Zhao, Xiaoqun Wang, Chuan Zhao, Xiaoguang Zhu, Shanyi Du. Adsorption and desorption of antimony acetate on sodium montmorillonite. Journal of Colloid and Interface Science. 2010; 154-159.
- [60]. Suprakas Sinha Ray, Masami Okamoto. Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. Progress in Polymer Science. 2003; 1539-1641.
- [61]. Michael Alexandre, Philippe Dubois. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. Materials Science and Engineering: R: Reports. 2000; 1-63.

- [62]. Aref Alshameri, Hongping He, Jianxi Zhu, Yunfei Xi, Runliang Zhu, Lingya Ma, Qi Tao. Adsorption of ammonium by different natural clay minerals: Characterization, kinetics and adsorption isotherms. *Applied Clay Science*. 2018; 83-93.
- [63]. Walaikorn Nitayaphat, Thanut Jintakosol. Removal of silver(I) from aqueous solutions by chitosan/bamboo charcoal composite beads. *Journal of Cleaner Production*. 2015; 850-855.
- [64]. Maria Franca Brigatti, Fulvio Corradini, Gian Carlo Franchini, Silvia Mazzoni, Luca Medici, Luciano Poppi. Interaction between montmorillonite and pollutants from industrial waste-waters: exchange of Zn^{2+} and Pb^{2+} from aqueous solutions. *Applied Clay Science*. 1995; 383-395.





ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางการวัดผลของค่าการดูดซับไอออนทองจากสารละลายที่ได้จาก
เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์
(Atomic Absorption Spectrometer)

ตารางการวัดผลของค่าการดูดซับไอออนทองจากสารละลายที่ได้จากเครื่องอะตอมมิก
แอสซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer)

ตาราง ก ผลการทดลองร้อยละของการวัดค่าการดูดซับไอออนทองจากสารละลายของเม็ทวัสตุ
แอลจินเตและเม็ทวัสตุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจินเตที่ความเข้มข้นต่างกัน เมื่อความ
เข้มข้นของทองในสารละลาย: 10 มิลลิกรัมต่อลิตร, ปริมาตรสารละลาย: 50 มิลลิลิตร

เวลา/สูตร (นาทึ่)/(ความเข้มข้น ของมอนต์มอริลโลไนต์)	แอลจินเต	1%	2%	3%	4%	5%	6%
30	26.470	38.053	36.230	38.067	36.317	38.353	38.230
60	28.400	35.710	29.260	32.810	34.303	31.047	36.023
90	26.460	29.670	30.780	31.440	32.440	35.683	42.480
120	32.670	33.333	30.043	29.420	35.270	31.920	40.480
150	24.280	26.977	30.203	28.353	28.807	30.187	39.300
180	17.483	18.337	19.215	17.490	19.633	25.320	28.380

ตาราง ข ผลการทดลองร้อยละของการวัดค่าการดูดซับไอออนทองจากสารละลายในสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่ต่างกันของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจีเนตที่ความเข้มข้น 6% (w/v) เมื่อความเข้มข้นของทองในสารละลาย: 10 มิลลิกรัมต่อลิตร, ปริมาตรสารละลาย: 50 มิลลิลิตร, เวลา 90 นาที

เวลา/pH (นาที)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
90	25.32	36.09	39.29	32.38	15.72	14.38	16.60	14.82	15.99	14.58

ตาราง ค ผลการทดลองร้อยละของการวัดค่าการดูดซับไอออนทองจากสารละลายในสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่ต่างกันของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจีเนตที่ความเข้มข้น 6% (w/v) เมื่อความเข้มข้นของทองในสารละลาย: 10 มิลลิกรัมต่อลิตร, ปริมาตรสารละลาย: 50 มิลลิลิตร, ความเป็นกรด-ด่าง (pH) 3

เวลา (นาที)/ ปริมาณเม็ด	1 (กรัม)	2 (กรัม)	3 (กรัม)	4 (กรัม)	5 (กรัม)
30	28.83	33.27	33.24	38.76	41.99
60	30.44	35.95	49.83	51.37	58.77
90	35.06	45.27	47.95	57.06	64.92



ภาคผนวก ข

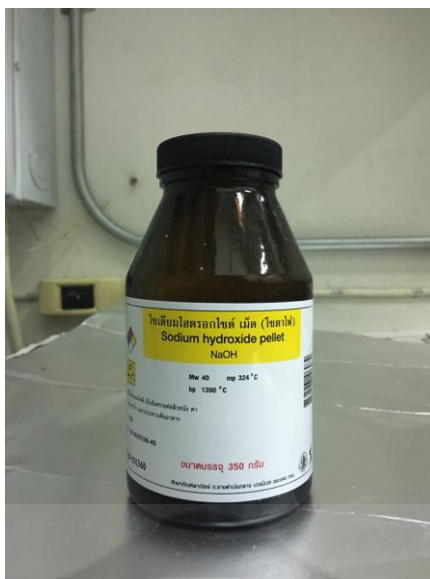
ภาพประกอบเครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพประกอบ ก แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)



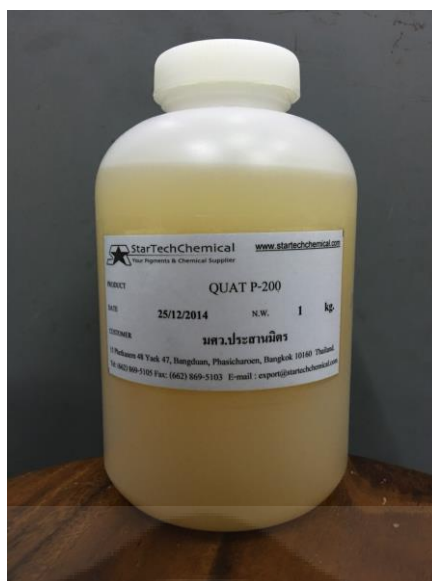
ภาพประกอบ ข กรดอะซิติก (Acetic acid)



ภาพประกอบ ค โซเดียมไฮดรอกไซด์เม็ด (NaOH)



ภาพประกอบ ง โซเดียมแอลจิเนต (Sodium alginate)



ภาพประกอบ จ เกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium)



ภาพประกอบ ฉ เกลือของทอง (Gold III chloride; AuCl_3)



ภาพประกอบ ข มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)



ภาพประกอบ ข มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (Modified montmorillonite)



ภาพประกอบ ข เครื่องเขย่าสาร ยี่ห้อ Orbital Shaker รุ่น GS - 20



ภาพประกอบ ฎ เครื่องผสมสาร (Stirrer) ยี่ห้อ M TOPS รุ่น MS – 300HS



ภาพประกอบ ฎ เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer)



ภาพประกอบ ฐ เครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ Sartorius Model BSA224S – CW 220g/0.1 mg



ภาพประกอบ ข เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer)



ภาพประกอบ ฅ กรองกรวยระบบสุญญากาศ (Buchner funnel)



ภาพประกอบ ฅ เม็ดวัสดุแอลจิเนตและเม็ดวัสดุมอนต์มอริลโลไนต์/แอลจิเนต 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, และ 6% (w/v)



อภิธานศัพท์

Adsorbate คือ สารที่ถูกดูดซับ

Adsorbent คือ สารดูดซับ ตัวดูดซับ

Adsorbtion คือ การดูดซับ

Absorption คือ การดูดซึม

A_x คือ สารตัวอย่าง

A_y คือ สารมาตรฐาน

b คือ ค่าคงที่ของการดูดซับตามสมการแลงเมียร์

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

D₁ คือ ค่าการคายซับของสีย้อมหลังการคายซับ

K_f คือ ค่าคงที่สมการการดูดซับแบบหลายชั้นของฟรุนดลิช

k₁ คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง Pseudo-first order (min⁻¹)

k₂ คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง Pseudo-second order (g mg⁻¹ min⁻¹)

n คือ ค่าคงที่ของฟรุนดลิช (Freundlich intensity parameter) (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

P คือ น้ำหนักขวดฟิคโนมิเตอร์

q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับ ณ ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ปริมาณในการดูดซับของวัสดุดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

W คือ น้ำหนักขวดฟิคโนมิเตอร์ + วัสดุดูดซับ

W₁ คือ น้ำหนักขวดฟิคโนมิเตอร์ + น้ำ

W₂ คือ น้ำหนักขวดฟิคโนมิเตอร์ + วัสดุดูดซับ + น้ำ

V_z คือ ปริมาตร



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายอนวัติ เหมาะะพิชัย
วันเดือนปีเกิด	04 มกราคม 2534
สถานที่เกิด	อำเภอบ้านม่วง จังหวัดสกลนคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	109 หมู่ 10 ตำบลมาย อำเภอบ้านม่วง จังหวัดสกลนคร รหัสไปรษณีย์ 47140
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2550	มัธยมศึกษาตอนต้น จาก โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย เลย จ.เลย
พ.ศ. 2553	มัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จ.สกลนคร
พ.ศ. 2558	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเกษตรศาสตร์ จาก คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2561	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวัสดุศาสตร์ จาก คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ