



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การดูดซับสารตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไดอะตอมไมต์

Adsorption of Lead from synthetic waste water by Diatomite

ประภทพูน สงเสริมนักวิจัย

นายมนตรี ทองคำ

ได้รับการสนับสนุนเงินวิจัยจากเงินรายได้คณะ ประจำปี พ.ศ. 2559

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การดูดซับสารตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไดอะตอมไมต์

Adsorption of Lead from synthetic waste water by Diatomite

ประเภททุน ส่งเสริมนักวิจัย

นายมนตรี ทองคำ

สรทพญ. 145509
เลขทะเบียน 24 ก.พ. 2560
ในเดือนปี

ได้รับการสนับสนุนเงินวิจัยจากเงินรายได้คณะ ประจำปี พ.ศ. 2559

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ... การดูดซับสารตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไดอะตอมไมต์

แหล่งเงิน.....ทุนส่งเสริมนักวิจัย

ประจำปีงบประมาณ..... 2559.....จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน... 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย... 1...ปี...ตั้งแต่..... 1 ตุลาคม 2558.....ถึงวันที่ 30 กันยายน 2559

หัวหน้าโครงการ นายมนตรี ทองคำ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติและไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก ซึ่งทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR, XRD, XRF, BET และ SEM ผลจากการตรวจสอบเอกลักษณ์สำหรับทุกๆเทคนิคของไดอะตอมไมต์ทั้งชนิดที่ได้รับการปรับปรุงแล้วและชนิดที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง พบแถบการสั่นของ SiO-H ที่ความยาวคลื่น $\sim 3610 \text{ cm}^{-1}$ และพบว่าไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติและที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกมีโครงสร้างเป็นแบบผลึก เมื่อนำไดอะตอมไมต์ทั้งสองชนิดมาทดสอบการดูดซับโลหะหนักที่สภาวะอุณหภูมิห้อง, ระยะเวลาในการดูดซับ 45 นาที และนำไปตรวจสอบหาความสามารถในการดูดซับด้วยเทคนิค AAS เพื่อทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ พบว่าการดูดซับตะกั่วด้วยไดอะตอมไมต์เป็นไปตามไอโซเทอมของฟรุนดลิช และการดูดซับแคดเมียมด้วยไดอะตอมไมต์เป็นไปตามไอโซเทอมของแลงเมียร์ และไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมได้สูงถึง 97.80 % และ 99.90 % ตามลำดับ

คำสำคัญ : การดูดซับ ตะกั่ว ไดอะตอมไมต์ โลหะหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนพัฒนางานวิจัยประยุกต์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ขอขอบคุณอาจารย์ ภาควิชาเคมี และเจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จ ลุล่วงด้วยดี

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

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภท ทุนพัฒนางานวิจัยประยุกต์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 ปีงบประมาณที่ได้รับการจัดสรรทุนอุดหนุนการวิจัยโครงการวิจัยนี้สำเร็จตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้

นายมนตรี ทองคำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไตอะตอมไมต์.....	4
2.1.1 สมบัติทางกายภาพของไตอะตอมไมต์.....	4
2.1.2 แหล่งไตอะตอมไมต์ในประเทศไทย.....	5
2.1.3 การนำไปใช้ประโยชน์.....	6
2.2 โลหะหนัก.....	7
2.2.1 ตัวอย่างบทบาทของโลหะหนักที่มีผลต่อชีวิตประจำวัน และภาคอุตสาหกรรม.....	7
2.2.2 วิธีในการกำจัดโลหะหนักทางอุตสาหกรรม.....	10
2.3 ตะกั่ว.....	10
2.3.1 คุณสมบัติของสารตะกั่วและการนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรม.....	10
2.3.2 การเข้าสู่ร่างกายของตะกั่ว.....	11
2.3.3 ความเป็นพิษของสารตะกั่ว.....	11
2.4 แคดเมียม (Cd).....	12
2.4.1 คุณสมบัติของสารแคดเมียมและการนำมาใช้ในอุตสาหกรรม.....	12
2.4.2 ความเป็นพิษของแคดเมียม.....	12
2.5 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	13
2.5.1 การตกตะกอนทางเคมี.....	13
2.5.2 การแลกเปลี่ยนไอออน.....	14
2.5.3 การออสโมซิสย้อนกลับ.....	14
2.5.4 การระเหย.....	14
2.5.5 อิเล็กโตรไดอะไลซิส.....	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.6 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า.....	14
2.5.7 การดูดซับ	14
2.6 กระบวนการในการดูดซับ.....	15
2.6.1 นิยามของการดูดซับ.....	15
2.6.2 กลไกการดูดซับ.....	15
2.6.3 แรงที่เกี่ยวกับการดูดซับ.....	17
2.6.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	19
2.6.5 ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	20
2.7 การตรวจสอบเอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ไดอะตอมไมต์.....	23
2.7.1 เครื่องวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD).....	23
2.7.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ,SEM).....	26
2.7.3 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาครูพรุน โดยวิธีบีอีที (BET).....	28
2.7.4 ตรวจสอบหารปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวดูดซับโดยอาศัยการวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อย (XRF).....	29
2.7.5 เครื่องตรวจวัดสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared, FT-IR).....	35
2.8 การตรวจสอบเอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบการดูดซับไดอะตอมไมต์	37
2.8.1 เทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี Atomic Absorption Spectroscopy (AAS).....	37
2.8.2 การทำคุณภาพวิเคราะห์ด้วย AAS.....	40
2.8.3 การทำปริมาณวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS (Quantitative Analysis)....	40
2.8.4 ผลกระทบของสิ่งรบกวนต่อการ.....	41
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	45
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ	45
3.2 สารเคมี.....	45
3.3 เครื่องมือในการตรวจสอบเอกลักษณ์.....	46
3.4 วิธีการปรับปรุงไดอะตอมไมต์.....	46
3.4.1 การเตรียมไดอะตอมไมต์.....	46
3.4.2 การปรับปรุงไดอะตอมไมต์ด้วยกรดซัลฟิวริก (H ₂ SO ₄)	46
3.4.3 วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd).....	47
3.4.4 การดูดซับของตะกั่วบนไดอะตอมไมต์.....	47
3.5 การตรวจสอบเอกลักษณ์ (Characterization).....	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐาน.....	47
3.5.2 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ.....	48
3.5.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว	49
3.5.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค.....	49
3.5.5 การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับโดยเทคนิคอะตอมมิกแอต ซอร์พชันสเปก- โทรโฟโตมิเตอร์ (AAS).....	49
3.5.6 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของไดอะตอมไมต์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR))	50
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย	51
4.1 ผลการปรับปรุงตัวดูดซับ.....	51
4.1.1 ผลการปรับปรุงไดอะตอมไมต์ด้วยกรดซัลฟิวริก(H ₂ SO ₄).....	51
4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะและสมบัติของตัวดูดซับ.....	52
4.2.1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับจากแหล่งธรรมชาติและ ปรับปรุงด้วยกรดโดยการวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด.....	52
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับจากแหล่งธรรมชาติและ ปรับปรุงด้วยกรดโดยเทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	53
4.2.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับจากแหล่ง ธรรมชาติและปรับปรุงด้วยกรดโดยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	54
4.2.4 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาใน ระดับอนุภาค.....	55
4.2.5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ของตัวดูดซับ ด้วยวิธีบีอีที.....	56
4.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ.....	57
4.3.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยไดอะตอมไมต์ เป็นตัวดูดซับ.....	57
4.3.2 การศึกษาผลของขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่มีต่อ การดูดซับตะกั่วในสารละลายเลด (II) ไนเตรต (Pb(NO ₃) ₂) และการดูดซับ แคดเมียมในสารละลายแคดเมียม (II) ไนเตรต (Cd(NO ₃) ₂).....	59
4.3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับโดยใช้สมการของ Langmuir และ Freundlich.....	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	68
เอกสารอ้างอิง	70
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก.....	74
ภาคผนวก ข.....	76

ภาคผนวก ค.....	77
ภาคผนวก ง.....	78
ประวัติคณะผู้วิจัย.....	82



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมต์.....	6
2.2 ชนิดของโลหะหนัก แหล่งที่พบ และผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์.....	9
2.3 การเปรียบเทียบสมบัติการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี.....	17
2.4 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไอโซโทปรังสี.....	32
4.1 ร้อยละผลผลิตของไดอะตอมไมต์หลังผ่านการปรับปรุงด้วยกรดและความร้อน.....	51
4.2 แถบการสั่นและการจำแนกรูปแบบการสั่นของไดอะตอมไมต์ที่ได้จากแหล่งธรรมชาติและที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก.....	53
4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมต์โดยธรรมชาติและไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการปรับปรุง ด้วยกรดซัลฟิวริก.....	55
4.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับที่มาจากแหล่งธรรมชาติและที่ปรับปรุงด้วยกรดโดย BET.....	57
4.5 ข้อมูลจากการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วด้วยไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติ..	57
4.6 ข้อมูลจากการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วด้วยไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรด..	58
4.7 การคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับแคดเมียมด้วยไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติ.....	58
4.8 การคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับแคดเมียมด้วยไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรด.....	58
4.9 ค่าตัวแปรที่ได้จากการคำนวณสมการของ Langmuir และสมการของ Freundlich.....	67
4.10 สมการพหุนามของการดูดซับตะกั่ว.....	67
ก1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายเลด (II) ไนเตรต.....	74
ค1 ข้อมูลต่างๆที่ได้จากการทดลองใช้ไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติในการดูดซับตะกั่วในสารละลายเลด (II) ไนเตรต โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง.....	77
ค2 ข้อมูลต่างๆที่ได้จากการทดลองใช้ไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดในการดูดซับตะกั่วในสารละลายเลด (II) ไนเตรต โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง.....	77
ง1 ข้อมูลจากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวไดอะตอมไมต์.....	78
ง2 ข้อมูลจากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการปรับปรุง.....	80

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของไดอะตอมไมต์.....	5
2.2 แหล่งแร่ไดอะตอมไมต์ อ.แม่ทะ จ.ลำปาง.....	5
2.3 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารในกระบวนการดูดซับ.....	16
2.4 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ ของ Brunauer-Emmett-Teller ในระบบก๊าซ.....	22
2.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดจากการกระเจิงและแทรกสอดของรังสี.....	24
2.6 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง (X-ray diffractometer).....	26
2.7 XRD โครงสร้างของไดอะตอมไมต์.....	26
2.8 กราฟการวัดพื้นที่ผิวโดยวิธีการดูดซับของแก๊สด้วยบีอีที.....	28
2.9 อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมแบ่งเป็นชั้น.....	29
2.10 การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในวงโคจร.....	30
2.11 สัญลักษณ์ของรังสีเอ็กซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน.....	30
2.12 สัญลักษณ์ของรังสีเอ็กซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน.....	31
2.13 แอปซอร์บชันเอดจ์ของอิเล็กตรอนในชั้น K, L, M.....	31
2.14 ส่วนประกอบของหลอดรังสีเอ็กซ์.....	32
2.15 ต้นกำเนิดรังสีเอ็กซ์แบบไอโซโทปรังสี.....	33
2.16 การจัดต่อประกอบอุปกรณ์การวิเคราะห์โดยเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	33
2.17 สเปกตรัมรังสีเอ็กซ์จำเพาะของธาตุในตัวอย่างกระดาษ.....	34
2.18 สเปกตรัมรังสีเอ็กซ์จำเพาะของธาตุในโลหะผสมอลูมิเนียม.....	34
2.19 แสดงแผนภาพองค์ประกอบของเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer.....	38
2.20 แสดง Flame Atomization process.....	39
3.1 การจัดเตรียมชุดรีฟลักซ์.....	46
4.1 สเปกตรัม FT-IR ของไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติและผ่านการปรับปรุงด้วยกรด.....	52
4.2 รูปแบบ XRD ของไดอะตอมไมต์และไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรด.....	54
4.3 สัณฐานวิทยา SEM ของไดอะตอมไมต์ที่กำลังขยาย 1500 เท่าและกำลังขยาย 2000 เท่า..	56
4.4 สัณฐานวิทยา SEM ของไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกและเผาที่อุณหภูมิสูงกำลังขยาย 1000 เท่า.....	56
4.5 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติและไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรด.....	59
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ (A_0) กับปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยกรัมของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ).....	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (m^2/g) กับปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยกรัมของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ).....	60
4.8 กราฟวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับตะกั่วด้วยตัวดูดซับไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติ ด้วยสมการของ Langmuir และ Freundlich.....	63
4.9 กราฟวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับตะกั่วด้วยตัวดูดซับไดอะตอมไมต์ปรับปรุงด้วยกรด ด้วยสมการของ Langmuir และ Freundlich.....	64
4.10 กราฟวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับแคดเมียมด้วยตัวดูดซับไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติ ด้วยสมการของ Langmuir และ Freundlich.....	65
4.11 กราฟวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับแคดเมียมด้วยตัวดูดซับไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรด ด้วยสมการของ Langmuir และ Freundlich.....	66



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ [1-2]

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการเพิ่มขึ้นของประชากร และการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้มีการนำทรัพยากรต่างๆ มาใช้เป็นจำนวนมากก่อให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมทั้งทางดิน ทางน้ำและทางอากาศ ส่งผลให้เกิดความเสียหายและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตเพราะเมื่อเข้าสู่สิ่งมีชีวิตนั้นจะมีการดูดซึมผ่านเข้าทางผิวหนัง ดูดซึมเข้าสู่เซลล์หรือร่างกายหากเป็นอนุภาคขนาดใหญ่จะเข้าสู่กระบวนการย่อยอาหารผ่านทางระบบทางเดินอาหาร และถูกดูดซึมเข้าไปยังเนื้อเยื่ออวัยวะต่างๆ ของสิ่งมีชีวิตซึ่งอาจจะก่อให้เกิดอันตรายหรือเกิดการเจ็บป่วยล้มตายลงได้ ซึ่งรวมไปถึงยังเป็นปัญหาสำคัญของโลกในปัจจุบันเนื่องจากโลหะหนักนั้นเป็นสารที่คงตัวเมื่อเปรียบเทียบกับสารอินทรีย์ จึงไม่สามารถสลายตัวได้เองในกระบวนการทางธรรมชาติและสามารถเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้หลายทาง แหล่งที่มาหลักๆ ของโลหะหนักมาจากความเจริญก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ที่มีการดำเนินการต่างๆ มากขึ้นและโรงงานอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภท อาทิ โรงงานแบตเตอรี่ โรงงานชุบโลหะ การใช้สารกำจัดศัตรูพืช การทำเหมืองแร่ สารเคมีจากอุตสาหกรรมเกษตร น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมพลาสติก น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน และวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ เช่น วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานกระดาษและโรงงานผลิตอาหารสำเร็จรูป ซึ่งในปัจจุบันปริมาณของเสียอุตสาหกรรมมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างมาก การกำจัดขยะมูลฝอยขององค์กรส่วนท้องถิ่นในเขตเมืองใหญ่มักนิยมใช้วิธีการฝังกลบซึ่งทำให้ปัญหาด้านการจัดการน้ำขยะตามมา เกิดปัญหาของการไหลซึมของน้ำชะขยะออกไปนอกบริเวณที่ฝังกลบ ซึ่งอาจทำให้สารมลพิษต่างๆ และโลหะหนักเกิดปนเปื้อนในแหล่งน้ำ โลหะหนักเหล่านี้ได้แก่ตะกั่ว โครเมียม โปรท ยูเรเนียม ซีลีเนียม สังกะสี สารหนู แคดเมียม เงิน ทอง และนิกเกิล จัดเป็นสารอันตรายประเภทที่มีพิษถาวรเนื่องจากไม่สามารถเสื่อมสลายทางชีวภาพ ซึ่งนอกจากจะไม่เปลี่ยนรูปตามกาลเวลาแล้ว ยังสามารถส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำตามธรรมชาติและยังสามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ใกล้เคียงบริเวณนั้นได้โดยผ่านตามห่วงโซ่อาหาร จากการทิ้งของเสียมลภาวะจากดิน และน้ำ โลหะหนักสามารถทำลายระบบประสาท ตับ กระจก และขัดขวางการทำลายของงานของเอนไซม์ที่สำคัญดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งวิธีกำจัดโลหะหนักมี 3 วิธี ได้แก่วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ กระบวนการกำจัดโลหะหนักขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น เทคโนโลยีของการบำบัดน้ำเสีย ความเข้มข้น และสถานการณ์ออกซิเดชัน (Oxidation state) ของโลหะ ความเป็นกรด-เบสของน้ำ และกลไกการกำจัดโลหะ เทคนิคที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมีซึ่งมีหลายกระบวนการได้แก่ กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) กระบวนการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน(Ultrafiltration) กระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าผ่านเครื่องกรอง (Electrodialysis) กระบวนการออสโมซิสผันกลับ(Reverse osmosis) กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมี(Precipitation and coagulation) และกระบวนการดูดซับ เป็นต้น

โดยปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการต่างๆ คือสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง ปัญหาของการตกตะกอนคือต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีและหลังการตกตะกอนต้องกำจัดกากตะกอนที่เกิดขึ้น ปัญหาของกระบวนการแยกโดยใช้เยื่อแผ่นคือจะต้องใช้แรงดันสูง เพราะเกิดการอุดตันของโลหะที่ผิวเยื่อแผ่นและค่าสารเคมีที่ใช้ล้างทำความสะอาด ปัญหาของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนคือต้องใช้เรซินเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งมีราคาแพงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ในขณะที่การดูดซับ(Absorption)เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการที่มีความเหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก มีข้อดีคือไม่ต้องมีการเติมสารเคมีลงในน้ำเสีย ใช้เงินลงทุนน้อย ใช้เวลาในการบำบัดไม่นาน ใช้สถานที่ไม่มาก สามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิต่ำและความดันบรรยากาศ

โครงการวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักโดยใช้ไดอะตอมไมต์(Diatomite)เป็นตัวดูดซับเนื่องจากไดอะตอมไมต์(Diatomite) สามารถเตรียมได้ง่าย มีราคาถูก มีความเป็นรูพรุนสูงจึงมีพื้นที่สัมผัสผิวมาก และมีสมบัติในการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่างของรูพรุน ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของกระบวนการดูดซับระดับโมเลกุล(Molecular sieves) โดยสามารถเลือกดูดซับเฉพาะบางโมเลกุลได้ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์เป็นไปตามสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาการปรับปรุงไดอะตอมไมต์ที่ใช้เป็นตัวดูดซับด้วยกรดซัลฟิวริก
- 2) ศึกษาการดูดซับสารตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงแล้ว

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) เตรียมไดอะตอมไมต์ที่ใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักด้วยเทคนิคการรีฟลักซ์กับกรด
- 2) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของสารที่เตรียมได้ทั้งหมดโดยใช้เทคนิคต่างๆ
 1. ตรวจสอบความเป็นผลึกของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)
 2. ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของสารที่เตรียมได้ทั้งหมดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)
 3. ตรวจสอบหาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว หรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน (Brunauer-Emmett-Teller, BET)
 4. ตรวจสอบหาปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวดูดซับโดยอาศัยการวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบ (X-ray Fluorescence, XRF)
 5. ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับทั้งชนิดที่ได้รับการปรับปรุงแล้วและชนิดที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยเทคนิค Infrared Spectroscopic โดยเครื่องตรวจวัดสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared, FT-IR)
- 3) ศึกษาการดูดซับเลด (II) ไนเตรท ($Pb(NO_3)_2$) และ แคดเมียม (II) ไนเตรท ($Cd(NO_3)_2$) โดยใช้ไดอะตอมไมต์ (Diatomite) เป็นตัวดูดซับ วัดค่าการดูดซับด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS)
- 4) ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวดูดซับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถเตรียมไดอะตอมไมต์ (Diatomite) ที่บริสุทธิ์ได้โดยวิธีการรีฟลักซ์ด้วยกรด
- 2) สามารถดูดซับสารตะกั่วจากแหล่งน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ไดอะตอมไมต์ (Diatomite) เป็นตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ไดอะตอมไมต์ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยกรดจะมีความบริสุทธิ์มากขึ้น มีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนเพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไดอะตอมไมต์เป็นแร่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในแง่ของการเป็นตัวกรอง ซีเมนต์ ตัวดูดซับ และสารเติมแต่ง ปัจจุบันพบว่ามีการใช้ไดอะตอมไมต์ในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสียเพื่อลดปริมาณของของเสียในอุตสาหกรรม เนื่องจากไดอะตอมไมต์เป็นแร่ที่หาซื้อได้ง่ายและราคาถูกจึงนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ข้อเสียของไดอะตอมไมต์คือมีพื้นที่ผิวน้อยทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวดูดซับตัวอื่น จึงมีผู้คิดริเริ่มปรับปรุงไดอะตอมไมต์เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว ความสามารถในการดูดซับและประสิทธิภาพในการดูดซับของไดอะตอมไมต์

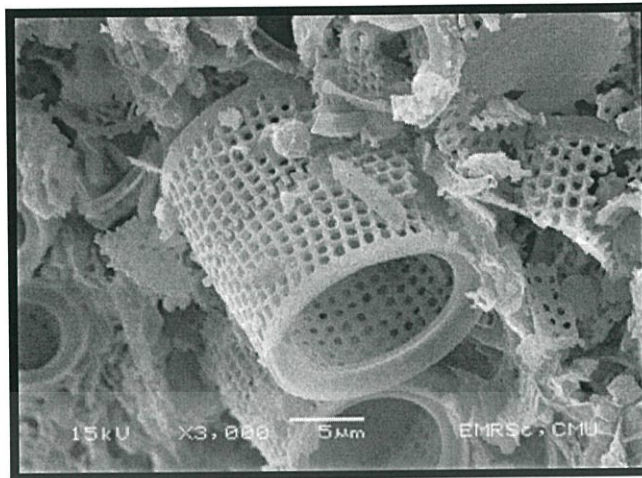
2.1 ไดอะตอมไมต์ [3]

ไดอะตอมไมต์ (Diatomite) หรือดินเบาเป็นแร่ดินเหนียวที่ประกอบด้วยไดอะตอม (Diatom) เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากในขณะที่ไดอะตอมมีชีวิตอยู่จะแขวนลอยอยู่ตามผิวน้ำและมีความสามารถในการดึงเอาซิลิกาที่ละลายอยู่ในน้ำไปสร้างเป็นโครงสร้างของมันเอง ดังนั้นซากของไดอะตอมจึงประกอบด้วยซิลิกาที่ละเอียดมาก ลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบที่เป็นซิลิกา ที่ไม่ค่อยเกิดปฏิกิริยาเคมีและมีน้ำหนักเบาเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีน้ำหนักเบา โดยทั่วไปแหล่งดินเบาที่เกิดในแอ่งน้ำจืดมักจะมีสารอินทรีย์ปะปนอยู่ด้วย ดินเบาบริสุทธิ์ประกอบด้วยโอพาลิน (Opalin) หรือ ไฮดรอสซิลิกา (Hydrous silica) กับสารอินทรีย์อื่นๆ เช่น อะลูมินา (Alumina) อัลคาไลน์เอิร์ธ (Alkaline earths) เป็นต้น

โครงสร้างของไดอะตอมไมต์ ส่วนใหญ่เป็นซิลิกาอสัญฐาน (Amorphous silica) มีสูตรโมเลกุลอยู่ในรูป $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ละลายได้ในน้ำต่างแก่ ละลายได้ดีในกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric acid; HF) แต่ไม่ละลายในกรดอื่น ไดอะตอมไมต์มีน้ำปนอยู่เล็กน้อยประมาณ 2-10 เปอร์เซ็นต์นอกจากนี้ ไดอะตอมไมต์ยังมีสมบัติที่น่าสนใจคือ มีความพรุนตัวสูง มีพื้นที่ผิวมาก ฉะนั้นต่อการเกิดปฏิกิริยาและการนำความร้อนต่ำ ไดอะตอมไมต์มีสีแตกต่างกันไปตามแหล่งที่อยู่และสิ่งเจือปน ที่พบทั่วไปจะมีสีชมพู น้ำตาล ส้ม เทา และสีขาว ไดอะตอมไมต์สีขาวจะมีคุณภาพดีเนื่องจากมีสิ่งเจือปนต่ำ

2.1.1 สมบัติทางกายภาพของไดอะตอมไมต์

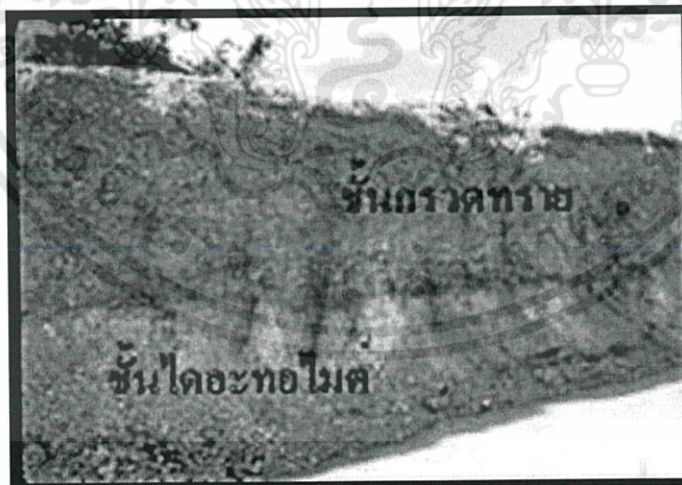
- 1) ไดอะตอมไมต์บริสุทธิ์ ประกอบด้วยชิ้นส่วนของเซลล์ไดอะตอม ที่มีขนาด 2-63 ไมโครเมตร แต่สารปนเปื้อนในแร่ไดอะตอมไมต์ อาจเปลี่ยนขนาดของอนุภาคได้
- 2) ไดอะตอมไมต์บริสุทธิ์มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.0-2.1 ความเป็นรูพรุนมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และมีความหนาแน่นโดยรวม 0.2-0.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สิ่งเจือปนจะมีผลต่อการเพิ่มค่าความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่นโดยรวม ความเป็นรูพรุนและขนาดอนุภาค



ภาพที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของไคอะตอมไมต์ [3]

2.1.2 แหล่งไคอะตอมไมต์ในประเทศไทย

แหล่งที่พบไคอะตอมไมต์ในประเทศไทยเท่าที่พบจะจำกัดอยู่ในจังหวัดลำปางเท่านั้น โดยจะพบเป็นแหล่งเล็กใหญ่กระจัดกระจาย อยู่เป็นบริเวณกว้างในแอ่งลำปางและแอ่งเล็กๆ ใกล้เคียง ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในเขตอำเภอเมืองลำปาง อำเภอแม่ทะ และอำเภอเกาะคา นอกจากนี้ยังพบบริเวณบ้านแม่แก้ว อำเภอสบ-ปราบ จังหวัดลำปาง และบ้านทุ่งตุ่น ตำบลวอแก้ว อำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปาง แหล่งแรกที่พบจะมีความหนาประมาณ 10 เมตรและมีดินผิวหน้าที่ประกอบด้วย กรวดทราย และลูกรัง หนาประมาณ 4 เมตร จากการสำรวจของกองเศรษฐศาสตร์วิทยา กรมทรัพยากรธรณี บริเวณแอ่งลำปาง สามารถประเมินปริมาณสำรองของไคอะตอมไมต์ ได้ทั้งหมด ประมาณ 245 ล้านตัน



ภาพที่ 2.2 แหล่งแร่ไคอะตอมไมต์ อ.แม่ทะ จ.ลำปาง [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมต์ [1]

องค์ประกอบ (wt%)	ดินไดอะตอมไมต์ (wt%)
Al ₂ O ₃	12.4
SiO ₂	80
P ₂ O ₅	-
K ₂ O	0.5
CaO	0.2
TiO	0.5
Fe ₂ O ₃	6.0
BaO, MgO และ Cl	-
L.O.I	3.3

2.1.3 การนำไปใช้ประโยชน์

- 1) อุตสาหกรรม ในปี ค.ศ. 1866 อัลเฟรด โนเบลได้ค้นพบว่าสารไนโตรกลีเซอรินสามารถทำให้เสถียรมากกว่าถ้าถูกคุดกลืนในไดอะตอมไมต์ และไนโตรกลีเซอรินที่เก็บกับ ไดอะตอมไมต์มีความปลอดภัยมากกว่า ไนโตรกลีเซอรินแบบปกติ
- 2) ใช้เป็นสารขจัดคราบสำหรับขัดภาชนะโลหะได้ดี เพราะมีซิลิกาขนาดละเอียดอยู่
- 3) ใช้ในการกรองเช่น กรองน้ำตาลและสารกรองอื่นๆ แห้งไดอะตอมไมต์ (Diatomite block) จะมีความพรุนสูงถึง 90 ของปริมาตรแห้งจึงมีคุณสมบัติในการกรองสูงมาก
- 4) ใช้เป็นตัวเติม (Filter) ในการผลิตสีและการขึ้นรูปพลาสติก
- 5) ใช้เป็นส่วนผสมในการทำกระดาษเพื่อให้เนื้อกระดาษแน่นเนียน เช่น ในการทำกระดาษสา
- 6) ใช้เป็นฉนวน โดยนำมาอัดเป็นก้อน (Block) หรือเป็นแผ่น (Board) สามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 371 °C และบางชนิดเมื่อนำมาสร้างพันธะกับใยหิน (Asbestos) ได้สูงถึง 1038 °C
- 7) ใช้เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ สำหรับใช้ในงานประเภทที่ต้องอาศัยความละเอียดและใช้กันน้ำ
- 8) ใช้เป็นตัวดูดซับ (Absorbent) สำหรับสารเคมี
- 9) สาร DNA บริสุทธิ์ ไดอะตอมไมต์สามารถสกัดเอา DNA ออกมา ในสารเคมีเข้มข้นสูงเมื่อเทียบกับสารจากพวกซิลิเกตอื่นๆ ไดอะตอมไมต์สามารถสกัดออกมาได้ทั้ง DNA RNA และสารจำพวกโปรตีน
- 10) การเกษตร ในธรรมชาติไดอะตอมไมต์น้ำจืดใช้ในการการเกษตรโดยใช้ผสมกับสารเพื่อไม่ให้สารจับเป็นก้อน เช่น ผสมในสารฆ่าแมลง สามารถใช้กำจัดหนอน โดยสารฆ่าแมลงดังกล่าวเป็นสารอินทรีย์ทำให้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โลหะหนัก [4-6]

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การพัฒนาเทคโนโลยีและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ทำให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมเกินขีดจำกัด ซึ่งเป็นสารที่มีความเป็นพิษสูงมากแม้เพียงปริมาณเล็กน้อย ก็สามารถก่ออันตรายและส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมสะสมในร่างกาย ทั้งในเนื้อเยื่อ อวัยวะต่างๆ และในกระดูก

โลหะหนักคือ ธาตุที่มีคุณสมบัติความเป็นโลหะ ซึ่งมีน้ำหนักอะตอมสูงและมีความหนาแน่นสูง หมายถึง ทั้งโลหะและสารกึ่งโลหะที่เรียกว่า "เมทัลลอยด์" โดยทั่วไปสารมักจะต้องมีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 ขึ้นไป หากอยู่ในรูปสารบริสุทธิ์จะมีลักษณะเป็นโลหะ และไม่จำเป็นต้องอยู่ในรูปของแข็งเสมอไปในอุณหภูมิห้อง โลหะหนักส่วนใหญ่เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มทรานซิชัน (Transition metals) ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โลหะหนักเป็นสารที่คงตัวไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น ตะกั่ว เหล็ก ทอง ทองแดง พรอท นิกเกิล แคดเมียม สังกะสี ดีบุก โครเมียม เป็นต้น โลหะหนักเป็นวัตถุพิษที่ถูกนำมาใช้ในหลายภาคส่วน เช่น ในด้านอุตสาหกรรม เราใช้โลหะหนักในการผลิตพลาสติก พีวีซี สี ถ่านไฟฉาย สำหรับทางด้านการเกษตร ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย ขณะเดียวกันทางการแพทย์ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยา อุปกรณ์ทางการแพทย์ และเครื่องสำอาง น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในการดำรงชีวิตในชีวิตประจำวัน คนเรามีความเสี่ยงต่อการนำโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายผ่านทางกระบวนการบริโภคหรือน้ำดื่มที่มีสารเหล่านี้ปนเปื้อนอยู่ โดยเฉพาะแหล่งชุมชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณโรงงานที่ขาดจิตสำนึกซึ่งมักจะลักลอบเทของเสียลงดินหรือลงแม่น้ำ และกำจัดกากของเสียอย่างผิดวิธี ทั้งนี้เนื่องจากต้องการลดรายจ่าย โลหะหนักบางชนิดสามารถให้ทั้งคุณและโทษต่อสิ่งมีชีวิต ขึ้นกับชนิดของสิ่งมีชีวิตและปริมาณที่ได้รับเข้าไปในปริมาณที่พอเหมาะต่อการเจริญเติบโต อย่างไรก็ตามปริมาณโลหะหนักที่มากเกินไปจะสร้างสิ่งแวดล้อมที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์เหล่านี้ ส่งผลให้ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ สำหรับโลหะหนักบางชนิด เช่น พรอท (Mercury, Hg) และแคดเมียม (Cadmium, Cd) จัดเป็นสารพิษต่อร่างกาย

2.2.1 ตัวอย่างบทบาทของโลหะหนักที่มีผลต่อชีวิตประจำวันและภาคอุตสาหกรรม

1) พรอท (Hg) สารพรอท มักพบปนเปื้อนอยู่ใน อากาศ น้ำ และดิน เป็นส่วนใหญ่ สาเหตุมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง การเผาขยะ ขยะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ตามบ้านเรือน และโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้สารพรอทเป็นวัตถุดิบ การปนเปื้อนของสารพรอทสามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยตรง จากการหายใจ การสัมผัสทางผิวหนัง การกินอาหารและน้ำที่ปนเปื้อนสารพรอท สารพรอทที่อยู่ในรูปของเหลวสามารถระเหยเป็นไอได้ในภาวะปกติ และใช้ในการเทอร์โมมิเตอร์แก้วหรือปรอทวัดไข้ ถ้าเทอร์โมมิเตอร์แตกสารพรอทจะกลายเป็นไอ ทำให้เกิดอันตรายกับระบบทางเดินหายใจ ไอปรอท เป็นพิษต่อร่างกายมาก ถ้าหายใจเข้าไปจะดูดซึมเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือดทันที กระจายไปยังสมองและส่วนอื่นของร่างกายได้รวดเร็วมาก แต่ขับออกมาในรูปของเสียได้น้อยมาก อาการพิษจากสารพรอท มี 2 ลักษณะ

ก. พิษเฉียบพลัน เกิดจากการได้รับสารพรอทคราวเดียวปริมาณมาก ทำให้มีอาการไข้ หายใจลำบาก ปวดอักเสบ คลื่นไส้ อาเจียน ท้องเสีย มีภาวะไตวาย ถ่ายเป็นเลือด ชัก กระตุก เดินเซ การเคลื่อนไหวกล้ามเนื้อผิดปกติ

ข. พิษเรื้อรัง เกิดจากการได้รับสารพรอทสะสมทีละน้อยเป็นระยะเวลานานจนเกิดพิษทางสมอง ไต ตับผิวหนัง ทำให้มีอาการสั่น ชัก ปวดปลายมือปลายเท้า ปวด

คีรีระ หงุดหงิด ซี้ลิม เหงือกบวมมีเส้นทึบสีน้ำเงินเลือดออกง่าย ภาวะเลือดจาง เหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับสารปรอทครั้งรุนแรงมากที่สุดคือ ที่เมืองมินามาตะ ประเทศ ญี่ปุ่น เมื่อปีพ.ศ. 2496 ทำให้เกิด "โรคมินามาตะ" สาเหตุมาจากการกินปลาที่จับมาจาก อ่าวมินามาตะซึ่งปนเปื้อนสารปรอททำให้ผู้ป่วยจำนวนมากมีอาการทางระบบประสาท ส่วนกลาง และเด็ก ๆ มีอาการทางสมอง

2) ตะกั่ว (Pb) แต่ละวันคนเรามีโอกาสได้รับสารตะกั่ว โดยตรงจากการกินอาหาร น้ำดื่ม หรือหายใจเอาสารตะกั่วเจือปนเข้าไปในกลุ่มผู้เสี่ยงต่อการเกิดโรคพิษตะกั่ว ได้แก่ คนงานที่ทำเหมืองตะกั่ว โรงงานผลิตแบตเตอรี่ โรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ และคนที่อาศัยอยู่ใกล้บริเวณโรงงานหลอมตะกั่วหรือใกล้โรงงานที่มีการใช้สารตะกั่วเป็นวัตถุดิบ อาการโรคพิษตะกั่ว เกิดได้กับหลายระบบของร่างกาย คือ

ก. ระบบประสาทส่วนกลางและสมอง อาการสำคัญที่พบ คือ สมองเสื่อมจาก พิษตะกั่ว พบในเด็กมากกว่าผู้ใหญ่ มีอาการหงุดหงิดง่าย กระวนกระวาย ซึม เวียน คีรีระ รายที่เป็นรุนแรงอาจมีอาการสั้นเวลาเคลื่อนไหว ชัก หดสติ และเสียชีวิต

ข. ระบบประสาทส่วนปลายและกล้ามเนื้อ พบมีอาการปวดตามกล้ามเนื้อและข้อต่างๆ กล้ามเนื้อที่จับบ่อยมีอาการอ่อนแรง หรืออัมพาต

ค. ระบบทางเดินอาหาร ผู้ป่วยมีอาการเบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียนโดยเริ่มแรก มักมีอาการท้องผูก แต่บางรายอาจมีอาการท้องเดิน น้ำหนักลด กล้ามเนื้อหน้าท้องบีบเกร็งและกดเจ็บ ทำให้มีอาการปวดท้องมาก

3) แคดเมียม (Cd) เป็นโลหะมีสีเงิน มีอยู่น้อยตามธรรมชาติ โดยทั่วไปแคดเมียมที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมจะพบในแหล่งทำเหมืองสังกะสีและตะกั่ว ในอุตสาหกรรม ยาสูบและบุหรี พลาสติกและยาง โรคที่เกิดจากพิษของแคดเมียมเรียกว่า โรคอิตะ-อิตะ (Itai Itai disease) การได้รับแคดเมียมจำนวนมากอาจทำให้เกิดพิษฉับพลันได้ แต่ส่วนใหญ่โรคที่เกิดจากแคดเมียมมักเป็นชนิดเรื้อรัง โดยการได้รับแคดเมียมติดต่อกันเป็นเวลานาน

4) สารหนู (As) สารหนูในธรรมชาติเกิดเป็นออกไซด์ (As₂O₃) ซึ่งมักจะรวมอยู่กับแร่ธาตุอื่นๆกลายเป็นรูปสารประกอบทั้งในน้ำและดินมักพบในการทำเหมืองดีบุก สารประกอบสารหนูที่อยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์จะมีความเป็นพิษมากกว่าสารประกอบอนินทรีย์ ส่วนใหญ่สารหนูใช้ในอุตสาหกรรมด้านการเกษตร อุตสาหกรรมย้อมผ้า สามารถเข้าสู่ร่างกายโดย

ก. ทางเดินหายใจ ข. ทางผิวหนัง ค. ทางตา ง. ทางอาหาร

5) สังกะสี (Zn) ที่พบในอากาศส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ ZnO, ZnS และ ZnSO₄ จากอุตสาหกรรมทำเหมืองแร่ เช่น การบด ย่อยแร่ ส่วนประกอบรั้วบ้านหลังคา หรือวัสดุ อื่นที่ใช้สังกะสีเป็นโลหะผสม นอกจากนี้ยังเกิดจากสารประกอบของสังกะสีที่นำมาทำยาฆ่าเชื้อรา เช่น zinc dimethyl dithiocarbamate

6) ทองแดง (Cu) ส่วนมากพบทั้งในรูปไอ และเกลือของทองแดง เนื่องจากการหลอมโลหะทองแดง ทองเหลือง การเชื่อมและบัดกรีโลหะโดยใช้โลหะผสมของทองแดง ซึ่งโทษทำให้เกิดการระคายเคืองและอักเสบที่ตา ระบบหายใจ ระบบ ทางเดินอาหารและประสาทสัมผัสเสีย ถ้าร่างกายได้รับไอทองแดงมาก ๆ จะทำให้เกิด การคลื่นไส้ อาเจียน เป็นไข้ (metal fume fever)

อาจทำให้ผิวหนังและผมเปลี่ยน สีได้ ถ้าได้รับในปริมาณมาก ทำให้เนื้อเยื่อจุกอึกเสบ และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดโรคโลหิตจาง

7) ดีบุก (Sn) ดีบุกเป็นธาตุที่พบได้ตามธรรมชาติ แต่จะพบดีบุกในดินและอาหารต่างๆ ในปริมาณน้อย ดีบุกใช้ในการผลิตกระป๋อง ตะกั่วซัตสี เหล็ก ท่อทองแดง ตัวดีบุกเองไม่มีพิษร้ายแรง ต่อร่างกายมนุษย์แต่สารอินทรีย์ของดีบุกจะมีพิษร้ายแรง

โลหะหนักปริมาณน้อยๆที่ปนเปื้อนในน้ำจะไม่สามารถตรวจวัดได้ โลหะหนักเหล่านี้ ได้แก่ ตะกั่ว สารหนู แคดเมียม แมงกานีส พรอท และสังกะสี ซึ่งมีความคงทนและไม่สลายตัวเมื่ออยู่ในน้ำจึงทำให้โลหะหนักเข้าไปสู่ห่วงโซ่อาหาร และเป็นอันตรายต่อมนุษย์ดังแสดงไว้ในตาราง

ตารางที่ 2.2 ชนิดของโลหะหนัก แหล่งที่มา และผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ [4]

โลหะหนัก	แหล่งที่มา	ผลต่อสุขภาพ	ระดับที่อนุญาตให้ใช้ได้ (ppm)
สารหนู (As)	- สารกำจัดศัตรูพืช - สารกำจัดเชื้อรา - การถลุงโลหะ	หลอดลมอักเสบ ผิวหนังอักเสบ	0.02
แคดเมียม (Cd)	- การเชื่อมโลหะ - การชุบโลหะ - สารกำจัดศัตรูพืช - ปุ๋ยแบตเตอรี - โรงปฏิกรณ์ปรมาณู	ทำลายตับ หลอดลมอักเสบ ระบบทางเดินอาหาร ไขกระดูก มะเร็ง	0.06
ตะกั่ว (Pb)	- โรงงานทำสี - สารกำจัดศัตรูพืช - ครันท์ไอเสียรถยนต์ - การทำเหมือง - การเผาถ่าน	ทำลายตับ,ไต ระบบทางเดินอาหาร ในเด็กทำให้ปัญญาอ่อน	0.1
แมงกานีส (Mn)	- การเชื่อมโลหะ - สารเติมในน้ำมัน - เชื้อเพลิงการผลิตโลหะผสมเหล็กและแมงกานีส	สูดดมหรือสัมผัสจะ ทำลายระบบประสาทส่วนกลาง	0.26
พรอท (Hg)	- โรงงานผลิตเภสัชภัณฑ์ - โรงงานไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหิน - แบตเตอรี - อุตสาหกรรมกระดาษ	ทำลายระบบประสาท	0.01
สังกะสี (Zn)	- โรงกลั่น - การผลิตทองเหลือง - การชุบโลหะ	ไอของสังกะสีกัดกร่อน ผิวหนัง ทำลายเยื่อประสาท	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุนี้ทำให้มีการปนเปื้อนของโลหะในน้ำทิ้ง ซึ่งบางอุตสาหกรรมมีการแยกโลหะกลับคืนแต่ด้วยวิธีการที่ต้องใช้สารเคมีที่อยู่ยากหรือมีต้นทุนสูงทำให้หลายๆอุตสาหกรรมละเลยที่จะแยกโลหะกลับคืนจากน้ำทิ้ง ยิ่งถ้าโลหะที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งเป็นโลหะหนักด้วยแล้วก็จะส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและปัญหาสุขภาพตามมา

2.2.2 วิธีในการกำจัดโลหะหนักทางอุตสาหกรรมมี 3 วิธี

วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ กระบวนการกำจัดโลหะหนักออกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น เทคโนโลยีของการบำบัดน้ำเสีย ความเข้มข้น และสถานะการออกซิเดชัน (Oxidation state) ของโลหะ ความเป็นกรด-เบสของน้ำ และกลไกการกำจัดโลหะ เทคนิคที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ วิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมีเช่น วิธีออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis) การแยกกรองด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis) การกรอง (Filtration) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange) การตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมี และวิธีการดูดซับ โดยทั่วไปแล้ววิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี มีข้อเสียคือ ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักออกได้อย่างสมบูรณ์จึงมีการใช้วิธีทางชีวภาพเป็นทางเลือก ได้แก่ เทคโนโลยีดูดซับทางชีวภาพโดยใช้มวลชีวภาพธรรมชาติในการดูดซับ และทำให้โลหะหนักไม่เคลื่อนที่ในสารละลายเป็นกระบวนการกำจัดโลหะหนักที่ประหยัด และเป็นมิตรกับระบบนิเวศน์

2.3 ตะกั่ว [7-8]

ปัจจุบันมีการนำตะกั่วมาใช้ผลิตวัสดุอุปกรณ์เพื่อใช้งานกันอย่างมาก ซึ่งทำให้มีอุตสาหกรรมประเภทที่ต้องใช้ตะกั่วเป็นวัตถุดิบมีจำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ตะกั่วมากที่สุด รองลงมา คือ อุตสาหกรรมปิโตรเลียมที่ใช้ตะกั่วเป็นสารเติมแต่งในการผลิตแก๊สโซลีนนอกจากนี้ยังมีการใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า อุตสาหกรรมการผลิตหลอดภาพโทรทัศน์ และอุตสาหกรรมการผลิตตรงควัดล เป็นต้น

2.3.1 สมบัติของสารตะกั่วและการนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรม

สัญลักษณ์เคมีของตะกั่ว คือ Pb มาจากคำว่า Plumbum ในภาษาลาติน แปลว่า ตะกั่ว ตะกั่วเป็นโลหะหนัก มี Atomic number 82 และ Atomic weight 207.21 ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี ตะกั่วจะละลายเป็นของเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 327.4 องศาเซลเซียส ระเหยเป็นไอเมื่ออุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส มีจุดเดือดที่ 1,620 องศาเซลเซียส และจะระเหยเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 11.4 ละลายได้ดีในกรดไนตริก กรดอะซิติก และกรดกำมะถันเข้มข้น ตะกั่วส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ Lead oxide (Pb_3O_4) ส่วนสารประกอบของ Lead acetate และ Nitrite สามารถละลายได้ใน Cold water ประมาณ 44.3 และ 37.7 g/dL ตามลำดับและสารประกอบของ Lead carbonate และ Lead oxide (PbO) จะละลายได้น้อยในน้ำ (ประมาณ 0.012 – 0.001 g/dL) ตะกั่วที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

- 1) สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว
- 2) สารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสารตะกั่วที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมนั้น กลุ่มแรก คือ กลุ่มตะกั่วอินทรีย์ เช่น Tetraethyl lead ซึ่งเริ่มนำมาใช้ตั้งแต่ประมาณ ในปี ค.ศ. 1923 และ Tetramethyl lead ซึ่งเริ่มนำมาใช้ในปี ค.ศ. 1954 สารประกอบอินทรีย์ทั้งสองตัวนี้ใช้เป็นส่วนผสมในน้ำมันเครื่องยนต์ เรียกว่า สารกันน็อก ป้องกันการกระตุกของเครื่องยนต์เวลาทำงาน สารนี้จะผสมในน้ำมันเบนซินและทำให้น้ำมันเบนซินมีสีแดง กลุ่มที่สอง คือ กลุ่มตะกั่วอนินทรีย์ ซึ่งใช้ในการเชื่อมบัดกรีโลหะ เป็นตะกั่วผสมโลหะ, ตะกั่วไดออกไซด์ ใช้เป็นขั้วเล็กโทรดของแบตเตอรี่รถยนต์ และเครื่องจักร, ตะกั่วออกไซด์ หรือ ตะกั่วแดงใช้เป็นสีทาโลหะเพื่อกันสนิม, ส่วนสารประกอบเกลือของตะกั่วนิยมนำมาใช้เป็นแม่สีหรือสีผสม เช่นตะกั่วคาร์บอนเนตผสมกับตะกั่วไฮดรอกไซด์ได้เป็นสีขาว ตะกั่วโครเมตเป็นสีเหลือง (ChromeYellow) เป็นต้น ตะกั่ว

2.3.2 การเข้าสู่ร่างกายของตะกั่ว

- 1) ทางปาก โดยการรับประทานอาหาร เครื่องดื่ม หรือยาที่มีตะกั่วปนเปื้อนอยู่ การใช้เครื่องใช้หรือภาชนะต่างๆ ที่ปนเปื้อนตะกั่ว และการอมเครื่องใช้ต่างๆ ที่มีตะกั่ว ปนเปื้อน รวมถึงการสัมผัสเครื่องใช้ที่มีตะกั่วปนเปื้อนและไม่ล้างมือก่อนรับประทานอาหาร
- 2) ทางจมูก โดยการหายใจเอาควัน ไอระเหย ฝุ่นละอองของตะกั่วที่มีอยู่ในอากาศ เข้าสู่ปอด
- 3) ทางผิวหนัง โดยการสัมผัสกับสินค้าอุปโภคบริโภค ที่มีสารประกอบอินทรีย์ของตะกั่วเจือปนอยู่ เช่น การล้างมือด้วยน้ำมันเบนซิน หรือเมื่อน้ำมันเบนซินหกใส่ผิวหนังจะทำให้ตะกั่วซึมผ่านผิวหนังและเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือดของร่างกาย

2.3.3 ความเป็นพิษของสารตะกั่ว

ตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายมนุษย์ก่อให้เกิดความเป็นพิษได้ 2 ลักษณะ

- 1) ความเป็นพิษเฉียบพลัน ผู้ได้รับตะกั่วจะรู้สึกผิดคอ มีกลิ่นโลหะในปาก กระจายน้ำคอกแห้ง ปวดแสบหน้าท้อง คลื่นไส้ อาเจียน ผู้ได้รับตะกั่วส่วนมากจะมีอาการท้องร่วง และส่วนน้อยท้องผูก อุดจากระมีเลือดหรือมีสีดำ อันเนื่องมาจากเลดซัลไฟด์ ผู้ได้รับตะกั่วบางราย อาจเกิดอาการช็อก กล้ามเนื้อกระตุก อ่อนเพลีย เป็นตะคริว โดยเฉพาะที่ขาทั้งสองข้าง หรือมีอาการของระบบประสาทส่วนกลาง เช่น ปวดศีรษะ นอนไม่หลับ หรืออาจมีอาการผิดปกติที่ไร้สาเหตุเช่น รู้สึกชาซึ่มเสรั้า ถึงขั้นโคม่าและเสียชีวิตในที่สุด อาการที่รองลงไปได้แก่ ภาวะไตเสื่อม ทำให้ปัสสาวะน้อยลงกว่าปกติมี อัลบูมิน และมีเม็ดเลือดในปัสสาวะ เจ็บไต นอกจากนี้จะมีการสลายตัวของเม็ดเลือดแดงอาจทำให้เสียชีวิตได้ภายใน 2-3 วัน

- 2) ความเป็นพิษเรื้อรัง ผู้ได้รับตะกั่วอาจมีอาการทางระบบทางเดินอาหารและทางระบบประสาท

ก. อาการทางระบบทางเดินอาหาร เช่น เบื่ออาหาร เหนื่อยเฟื่อนในลำคอ ท้องผูกเป็นตะคริวที่หน้าท้อง

ข. อาการทางระบบประสาท เช่น ซ้อมือตก เป็นอัมพาต ไม่มีแรง แต่ยังคงมีความรู้สึก

ค. อาการทางสมอง หรือเยื่อหุ้มสมองอักเสบ

2.4 แคดเมียม (Cd) [9]

แคดเมียม เป็นโลหะหนัก ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถปนเปื้อนกับสิ่งแวดล้อมและตกค้างในอาหาร เป็นอันตรายในอาหาร ประเภทอันตรายทางเคมีการใช้โลหะแคดเมียมในอุตสาหกรรม

2.4.1 สมบัติของสารแคดเมียมและการนำมาใช้ในอุตสาหกรรม

แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่มีสีส้มสวยงาม สีเงินแกมขาวและดัดขึ้นรูปได้ง่ายทนต่อการกัดกร่อน และมีจุดหลอมเหลว จุดเดือดที่สูงโดยมีค่าจุดหลอมเหลว 302.9 °C จุดเดือด 767 °C จึงนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลายประเภทเช่น

- 1) ประมาณร้อยละ 50 ใช้ในการเคลือบเงาผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (electroplated coating) ทำให้ผิวโลหะเงางามและทนต่อการกัดกร่อน ไม่เป็นสนิม ใช้ในอุปกรณ์รถยนต์ต่างๆ ทั้งที่เป็นส่วนของเครื่องยนต์และส่วนประกอบอื่นๆ รวมไปถึงน็อตและสกรูด้วย ใช้เป็นชิ้นส่วนของเครื่องบิน วิทยุ โทรทัศน์ ตู้เย็น และอื่นๆ
- 2) ใช้เป็นตัวสีในสิ่งต่างๆ พลาสติก สีทา สีพ่น หมึก ยาง เสื้อผ้า และสีที่จิตรกรใช้ เพราะให้สีสวย
- 3) สารประกอบแคดเมียมบางชนิดใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวของพลาสติก เช่น แคดเมียมสเตียเรต เป็นต้น
- 4) โลหะแคดเมียมยังใช้ผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะอัลลอยด์ เช่น ผสมกับโลหะทองแดงจะช่วยให้เพิ่มความเหนียวและความทนทานต่อการสึกหรอให้กับทองแดงด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งทนอุณหภูมิสูงด้วย
- 5) นำไปใช้ผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องทนความร้อน เช่น ทำหม้อน้ำรถยนต์ หรืออุปกรณ์เครื่องเย็นต่างๆ ที่ต้องระบายความร้อนมากๆ ถ้านำแคดเมียมไปผสมกับโลหะเงินจะได้โลหะอัลลอยด์ที่เงางาม
- 6) ใช้ในการผลิตเครื่องประดับอัญมณีต่างๆ
- 7) มีการใช้ไปในอุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่ขนาดเล็กที่เรียกว่า แคดเมียมนิเกิล แบตเตอรี่ (CdNi batteries) สำหรับการใช้อุปกรณ์ขนาดเล็ก เช่น นาฬิกา เครื่องคิดเลข กล้องถ่ายรูป และวิทยุเล็กๆ เป็นต้น
- 8) ผสมในสารฆ่าเชื้อราที่ใช้ในกิจการเกษตร
- 9) ปัจจุบันยังใช้ในเตาปฏิกรณ์ปรมาณูด้วย

2.4.2 ความเป็นพิษของแคดเมียม

การได้รับแคดเมียมจำนวนมากอาจทำให้เกิดพิษเฉียบพลันได้ พิษเฉียบพลันส่วนใหญ่เกิดจากการหายใจเอาฝุ่นหรือพุ่มแคดเมียม ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อแคดเมียมถูกทำให้ร้อน โดยทั่วไประยะเวลาหลังจากสัมผัสสารจะยาวนาน 2-3 ชั่วโมงก่อนแสดงอาการ อาการเริ่มแรกจะมีการระคายเคืองเล็กน้อยของทางเดินหายใจส่วนต้น อีก 2-3 ชั่วโมงต่อมาจะมีอาการไอ เจ็บปวดในทรวงอก เหงื่อออกและหนาวสั่น ซึ่งเป็นอาการที่คล้ายกับการติดเชื้อทั่วไปของทางเดินหายใจส่วนต้น ต่อมา 8-24 ชั่วโมง หลังจากสัมผัสสารอย่างฉับพลัน อาจเห็นอาการระคายเคืองอย่างแรงที่ปอด เจ็บปวดในทรวงอก หายใจลำบาก ไอ และอ่อนเพลีย อาการหายใจลำบากจะรุนแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้น เมื่อเกิดน้ำท่วมปอดตามมา อันตรายจากกรณีเช่นนี้มีถึง 15% ผู้ป่วยที่รอดชีวิตอาจมี ฟองอากาศในเนื้อเยื่อ และเนื้อปอดปูดนูนออกมา ซึ่งต้องใช้เวลานานในการรักษาให้หาย มี รายงานว่าพบพิษเรื้อรังเกิดขึ้นหลังจากสัมผัสพุ่มแคดเมียมออกไซด์เป็นเวลานาน

หลังจากที่แคดเมียมถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายแล้ว จะมีครึ่งชีวิตที่ยาวนานและคงอยู่ในตับ และไต มีชื่อเรียกโรคพิษของแคดเมียม เป็นภาษาญี่ปุ่นว่า " อิตะ-อิตะ " ซึ่งแปลว่า " โอ้ย โอ้ย " ปรากฏขึ้นครั้งแรกที่ประเทศญี่ปุ่น แถบแม่น้ำจินสุ เขตโตยามา เนื่องมาจากมีการทิ้งขี้แร่ที่มี แคดเมียมปนเปื้อนอยู่ ชาวบ้านที่ใช้น้ำจากแม่น้ำหรือได้รับแคดเมียมทางอ้อมจากแม่น้ำ เกิดเป็น โรคไต กระดูกผุ เจ็บปวดบริเวณหลังและเอวอย่างรุนแรงมาก และการมีเด็กพิการในอัตราสูง ผิดปกติเมื่อได้รับแคดเมียมสะสมมากๆ

ผู้ที่ได้รับแคดเมียมสะสมในร่างกาย จะสังเกตเห็นวงสีเหลืองที่โคนของซี่ฟัน ซึ่งจะขยาย ขึ้นไปเรื่อยๆ จนอาจเต็มซี่ ถ้าขนาดของวงยิ่งกว้างและสียิ่งเข้ม แสดงว่ามีแคดเมียมสะสมมาก มี หลักฐานพิสูจน์ได้ว่าแคดเมียมออกไซด์ เป็นสารก่อมะเร็งที่ไตและต่อมลูกหมาก นอกจากนั้นยัง ทำอันตรายต่อไต ทำให้สูญเสียประสาทการดมกลิ่น และทำให้เลือดจาง แต่ส่วนใหญ่โรคที่เกิด จากแคดเมียมมักเป็นชนิดเรื้อรัง โดยการได้รับแคดเมียมติดต่อกันเป็นเวลานาน

โรคที่เกิดอาจแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้

- 1) โรคปอดเรื้อรัง การได้รับแคดเมียมนานๆ และในปริมาณมากโดยเฉพาะจากการ หายใจ จะทำให้เกิดการอุดตันภายในปอด ซึ่งเป็นเพราะมีการอักเสบของหลอดเลือด มีพังผืดจับใน ทางเดินหายใจส่วนล่าง และมีการทำลายของถุงลมซึ่งจะกลายเป็นโรคถุงลมโป่งพองในที่สุด ผู้ที่มีความเสี่ยงมาก คือคนทำงานกับผงแคดเมียมโดยตรง เช่น โรงงานแบตเตอรี่ขนาดเล็ก
- 2) โรคไตอักเสบ จะแสดงออกโดยมีการอักเสบของไต โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ท่อในไต ซึ่งจะพบแคดเมียมในปัสสาวะสูง มีโปรตีน กลูโคสสูงในปัสสาวะ การทำงานทางท่อในไตเสียการ ทำงาน พบว่ามีการสะสมของแคดเมียมที่หมวกไต ก่อให้เกิดการอักเสบและเป็นอันตรายต่อไป และอาจเป็นไตวายได้ในที่สุดการเกิดโรคไตอักเสบนี้จะเป็นแบบถาวร

2.5 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย [10]

กระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย มีหลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับความ เหมาะสมในแง่ต่างๆ ได้แก่ คุณสมบัติน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพน้ำที่ต้องการหลังจากการบำบัดค่าใช้จ่าย ในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

2.5.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันกระบวนการนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนสภาพ ของต่างๆที่ละลายอยู่ในรูปสารละลายให้เป็นสารที่อยู่ในรูปไม่ละลาย โดยวิธีการเติมสารเคมี ผสมกับน้ำเสียให้ทั่วถึง ซึ่งการตกตะกอนด้วยสารเคมีมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้ในการ ตกตะกอนโลหะหนักมีอยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ และการตกตะกอน ซัลไฟด์

2.5.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

กระบวนการนี้อาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกดูดจับโดยเรซินไม่เท่ากัน ในการแยกโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยสารที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนซึ่งมาจากทั้งธรรมชาติ และสังเคราะห์ขึ้น จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่ และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้ามซึ่งอยู่ในสารละลาย เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและประสิทธิภาพสูง

2.5.3 การออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis)

เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น จะต้องใช้ความดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ

2.5.4 การระเหย (Evaporation)

เป็นวิธีการง่ายๆ ทำโดยระเหยน้ำออกทำให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีทั้งการระเหยที่ความดันบรรยากาศ และการระเหยภายใต้สุญญากาศ ได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงๆเท่านั้น เป็นวิธีการที่ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

2.5.5 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

วิธีการนี้จะเป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรง ร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เลือกเฉพาะสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion selective membrane) กลไกของวิธีนี้เป็น การแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลายและน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีต้นทุนค่าการก่อสร้างและการดำเนินงานสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

2.5.6 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)

วิธีการนี้จะเป็นการกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด และเกิดแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นโลหะสูง แต่ไม่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

2.5.7 การดูดซับ (Adsorption)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล โดยสารที่ใช้ในการดูดซับจะเลือกใช้ซีโอไลต์เนื่องจากมีสมบัติในการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่างของรูพรุน ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของกระบวนการดูดซับระดับโมเลกุล (Molecularsieves) สามารถเลือกให้มีการเลือกดูดซับเฉพาะบางโมเลกุลได้

2.6 กระบวนการในการดูดซับ (Adsorption) [11-12]

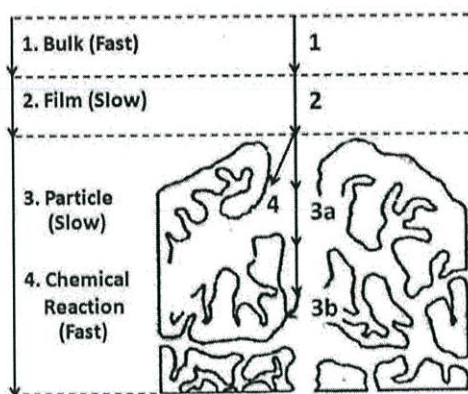
2.6.1 นิยามของการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นการสะสมสารหรือวัสดุที่พื้นผิวซึ่งเกิดขึ้นที่สภาวะ 2 สภาวะใดๆ เช่น ผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง แต่ไม่รวมถึงกระบวนการตกตะกอนที่พื้นผิว (Surface Precipitation Process) หรือขบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization Process) ซึ่งหากไม่ระบุได้ชัดเจนว่ากลไกที่ทำให้ความเข้มข้นของสาร หรือวัสดุในสารละลาย ตัวทำละลาย หรือพื้นผิวของของแข็งลดลงไปนั้น เกิดจากการดูดซับหรือการตกตะกอนที่พื้นผิวหรือขบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน หรือขบวนการอื่นๆ ที่เกิดขึ้นที่ผิวแล้ว โดยทั่วไป จะใช้คำว่า Sorption [13]

การดูดซับเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) จากสถานะที่เป็น ของแข็งคือตัวดูดซับ (Adsorbent) ทำให้เกิดการสะสมของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงผลักดัน (Driving Force) หลัก 2 ชนิด คือ ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลาย และความชอบหรือความดึงดูด (Affinity) ของตัวถูกดูดซับที่มีต่อตัวดูดซับ [14] การดูดซับเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้แยก องค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซโดยใช้สารละลายหรือก๊าซ ดังกล่าว สัมผัสกับตัวดูดซับ ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง ตัวดูดซับชนิดหนึ่งๆมีความสามารถดูดซับองค์ประกอบต่างๆในสารละลายได้แตกต่างกัน จึงสามารถแยกองค์ประกอบต่างๆออกจากกันได้ จากการแยกองค์ประกอบได้ออกจากสารละลายนั้นต้องเลือกชนิด ตัวดูดซับให้ เหมาะสม เมื่อพิจารณาถึงสถานะของสารละลายและสถานะของตัวดูดซับที่สัมผัสกันแล้ว สามารถจำแนกการดูดซับได้เป็น การดูดซับของเหลวโดยของเหลว (Liquid-Liquid Adsorption) การดูดซับก๊าซโดยของเหลว (Gas-Liquid Adsorption) การดูดซับของเหลวโดย ของแข็ง (Liquid-Solid Adsorption) [15] อาจกล่าวโดยสรุปว่าการดูดซับเป็นการแยกสิ่ง ปนเปื้อนหรือสิ่งเจือปน (Adsorbate) ออกจากของเหลวหรือก๊าซ โดยใช้ของเหลวหรือ ของแข็งเป็นตัวดูดซับ (Adsorbent)

2.6.2 กลไกการดูดซับ

สำหรับกลไกการดูดซับหรือการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ไปยังตัวดูดซับ (Adsorbent) นั้น สามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารในกระบวนการดูดซับ [13]

1) Bulk Transport เป็นขั้นตอนแรกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) จะเคลื่อนที่จาก Bulk Solution ไปยังผิวหน้าของฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

2) External Diffusion or Film Diffusion การที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ข้ามผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวหน้าของตัวดูดซับนั้น

3) Intraparticle Diffusion or Pore Diffusion การที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ แพร่เข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

4) Adsorption เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่โมเลกุลของสารจะถูกดูดซับบนตัวดูดซับ ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับ สามารถจำแนกได้เป็น 4 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางเคมี การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน และการดูดซับแบบเจาะจง

ก. การดูดซับทางกายภาพ(Physical Adsorption) การดูดซับทางกายภาพเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ดังนั้นองค์ประกอบจะยึดติดแน่นบนผิวของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูง ของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอของระบบนั้นก็ตาม ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติจะให้ความร้อนออกมาเล็กน้อยแต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่นเมื่อลดความดันของระบบหรืออุณหภูมิลดลง จะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงด้วย ทำให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ ปรากฏการณ์ช่วงนี้เรียกว่า Desorption ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง การดูดซับนี้สารถูกดูดซับไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี การดูดซับทางบางครั้งเรียกว่า Van Der Waals Adsorption

ข. การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption or Chemisorptions) การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง โดยเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซับ โดยจะมีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันทำให้เกิดเป็นพันธะเคมีเรียกว่า พันธะไอออนิก และไม่สามารถผันกลับได้ทำให้มีความแข็งแรงและเสถียรมากกว่าแรงทางฟิสิกส์

ค. การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน (Exchange Adsorption) การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนเกิดเมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงกันข้าม หรือเกิดเนื่องจากการแทนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุที่อยู่บนผิวของตัวดูดซับด้วยไอออนของตัวถูกดูดซับ

ง. การดูดซับแบบเจาะจง (Specific Adsorption) การดูดซับแบบเจาะจงเกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันนอลอยู่บนผิว แต่ไม่ได้มีผลทำให้ตัวถูกดูดซับเปลี่ยนโครงสร้างไปพฤติกรรมดูดซับชนิดนี้จะมีพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีในการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางเคมี การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนหรือการดูดซับแบบเจาะจงขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับนั้น

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบสมบัติการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี [11]

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ความร้อนของการดูดซับ	ไม่เกิน 40 kJ mol^{-1}	มากกว่า 80 kJ mol^{-1}
โครงสร้างที่ผิวของตัวดูดซับ	ไม่ทำให้โครงสร้างที่ผิวของตัวดูดซับเปลี่ยนแปลง	โครงสร้างที่ผิวของตัวดูดซับเปลี่ยนแปลง
สถานะอุณหภูมิต่ำ	เกิดขึ้นได้ในสถานะอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของตัวถูกดูดซับ	เกิดขึ้นได้ทั้งในสถานะอุณหภูมิต่ำกว่าและสูงกว่าจุดเดือดของตัวถูกดูดซับ
พลังงานในการเข้าสู่สมดุล	จะเกิดอย่างรวดเร็วและไม่ต้องการพลังงานใดๆมาช่วย ยกเว้นการดูดซับภายในรูเล็กๆ	พลังงานอาจมีส่วนช่วยปฏิกิริยา
ปริมาณการดูดซับ	ขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวถูกดูดซับมากกว่าตัวดูดซับ	ขึ้นอยู่กับสมบัติของผิวของตัวดูดซับเป็นหลัก
ความดันต่ออัตราการดูดซับ	อัตราการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น	อัตราการดูดซับจะลดลงในขณะที่ความดันเพิ่ม
การผันกลับได้ของปฏิกิริยา	ผันกลับได้อย่างสมบูรณ์	ไม่สามารถผันกลับได้
ตำแหน่งที่เกิดการดูดซับ	ไม่จำกัดเฉพาะตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง แต่คลุมไปบนผิวของตัวดูดซับทั้งหมด	จำกัดเฉพาะตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนผิวของตัวดูดซับ

2.6.3 แรงที่เกี่ยวกับการดูดซับ (Adsorption Force)

กระบวนการดูดซับแยกออกเป็น 2 ประเภท คือ ลักษณะซึ่งโมเลกุลของก๊าซจับกับของแข็งดูดซับในกระบวนการดูดซับทางกายภาพ โมเลกุลของก๊าซจะจับกับผิวของของแข็งด้วยแรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุล (Intermolecular Cohesion Force) ธรรมชาติทางเคมีของก๊าซที่ถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดซับไว้ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ฉะนั้นกระบวนการดูดซับทางเคมีมีการจับเกาะกันระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับของแข็ง ดูดซับด้วยแรงที่แรงกว่าอย่างมาก มีการแลกเปลี่ยนหรือรวมให้อิเล็กตรอน เช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในพันธะทางเคมี ฉะนั้นกระบวนการดูดซับทางเคมีจึงเป็นกระบวนการแบบไม่อาจย้อนกลับได้ง่ายในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายจะเกิดการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ (Physical Force) และแรงทางเคมี (Chemical Force) แรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงวานเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) รวมทั้งแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Force) บริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบ เช่น การแลกเปลี่ยนประจุ ส่วนแรงทางเคมีจะเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ในช่วงสั้นๆ รวมถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนบริเวณผิวด้านใน ซึ่งจะเกิดกลไกแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (Ligand Exchange) พันธะโควาเลนต์ (Covalent Bonding) และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding)

1) แรงวานเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณภายใน อะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากัน มีผลให้เกิดสภาพขั้วขึ้นและสามารถถูกดูดซับด้วยตัว ดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายการดูดซับ (Desorption) จะกระทำได้ง่ายซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

2) แรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกัน หรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่างๆเหล่านี้เกิดขึ้นจากผล 3 อย่าง

ก. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation Effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

ข. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย (Dispersion Effect) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามา ก็จะทำให้เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน และมักเป็นแรงที่อ่อน เช่น อินทรีย์สารและถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์สารส่วนใหญ่จะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว

ค. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (Induction Effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้าม ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน

3) แรงทางเคมี (Chemical Force) เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไอออนกับตัวดูดซับ อาจเกิดเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การที่โลหะหนักสามารถถูกดูดซับไว้ที่ผิวของตัวดูดซับต่างๆ เช่น คอลลอยด์ดินเหนียวเนื่องจากโลหะหนักเป็นธาตุทรานซิชันที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับหมู่ฟังก์ชัน (Function Group) ที่ผิวของตัวดูดซับได้ แรงทางเคมีมีลักษณะดังนี้

ก. เป็นพันธะที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือให้อิเล็กตรอน หรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน มีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันแรงกว่าแรงทางฟิสิกส์

ข. ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ (Irreversible) เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มาก และมีการจับกันเป็นสารประกอบเคมี

2.6.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

อัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) ความปั่นกววน (Turbulence) อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film Diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore Diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้ามีความปั่นกววนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับในทางตรงกันข้าม ถ้ามีความปั่นกววนสูงทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนาเป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงกรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวดูดซับ คือ ขนาดและพื้นที่ผิว ขนาดของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับในทางลบ กล่าวคืออัตราเร็วของการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

3) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำจะมีปริมาณไฮโดรเนียม ไอออนมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่นั้น ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ กล่าวคือในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวกและตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำจะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแย่งกันที่จะถูกดูดซับของตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวกกับไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ในสารละลาย แต่จะได้ผลในทางตรงกันข้าม เมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง เนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณน้อยลง และปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพิ่มขึ้น จึงลดผลในการเข้าแย่งจับหรือดูดซับกับตัวถูกดูดซับ และในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุลบก็จะให้ผลตรงกันข้ามในทำนองเดียวกัน

4) อุณหภูมิ ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับในระบบเป็นประเภทใด ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพ อุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปในทางน้อยลงหรือคงที่ ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมี อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นไปด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสที่ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับของตัวดูดซับได้มากขึ้น

5) ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะถูกดึงดูดออกจากน้ำก่อน แล้วจึงไปเกาะติดบนผิวของแข็ง สารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นมากกว่าสารที่มี

ความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างบนไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้ เพราะมีสารที่ละลายน้ำ ได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยากด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าว ได้อย่างเต็มที่ว่าความสามารถในการดูดซับ และความสามารถในการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กัน อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

6) ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เช่น การดูดซับกรดอินทรีย์โดยถ่านกัมมันต์ จะพบว่า ถ่านกัมมันต์ดูดซับกรดฟอร์มิค กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวเทอริก ได้มากขึ้นตามลำดับของขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อการละลายด้วย โดยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ยาว มักจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้ลดลง จึงส่งผลทำให้เกิดการดูดซับโดยตัวดูดซับมากขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนมาก สารที่มีโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนมักจะถูกดูดซับได้ดีมากกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากสารโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้าสู่รูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่จะดูดซับมีอยู่น้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวภายนอกเป็นรูพรุน

2.6.5 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)[11]

ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวกับความดันของก๊าซหรือความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับกาดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ ไอโซเทอมการดูดซับ แบ่งออกได้เป็น ดังนี้

1) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ในปี ค.ศ.1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายที่สุด โดยมีสมมติฐานคือ

ก. ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption)

ข. โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน

ค. ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้นและในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับจะเท่ากันและคงที่ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน จากการศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ดังสมการที่ 2.1

$$q = q_m K_L C_e / 1 + K_L C_e \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

เมื่อ q = ความสามารถในการดูดซับ ซึ่งคำนวณได้จากปริมาณของสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

q_m = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์

C_e = ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

K_L = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

จากสมการสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น ได้

$$C_e/q = 1/K_L q_m + C_e/q_m \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

หรือ $1/q = (1/K_L q_m)1/C_e + 1/q_m$ สมการที่ 2.3
 เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกนคือ $1/q_m$ และมีความชันเท่ากับ $1/K_L q_m$

2) ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm) ในปีค.ศ. 1880-1941 นักฟิสิกส์-เคมี ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายดังสมการที่ 2.4

$$q = X/m = K F C_e^{1/n} \quad \text{สมการที่ 2.4}$$

เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับที่สมดุล
 X/m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ
 K = ปริมาณความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (Adsorption capacity) (mg/g)

$1/n$ = บ่งบอกถึงความแรงของการดูดซับ (Adsorption intensity) ของความเป็นพื้นผิวหลายชั้น (g/l)

จากสมการฟรอนด์ลิชเมื่อใส่ลอการิทึม (Logarithm) จะได้สมการ

$$\log q = \log X/m = \log K_f + (1/n) \log C_e \quad \text{สมการที่ 2.5}$$

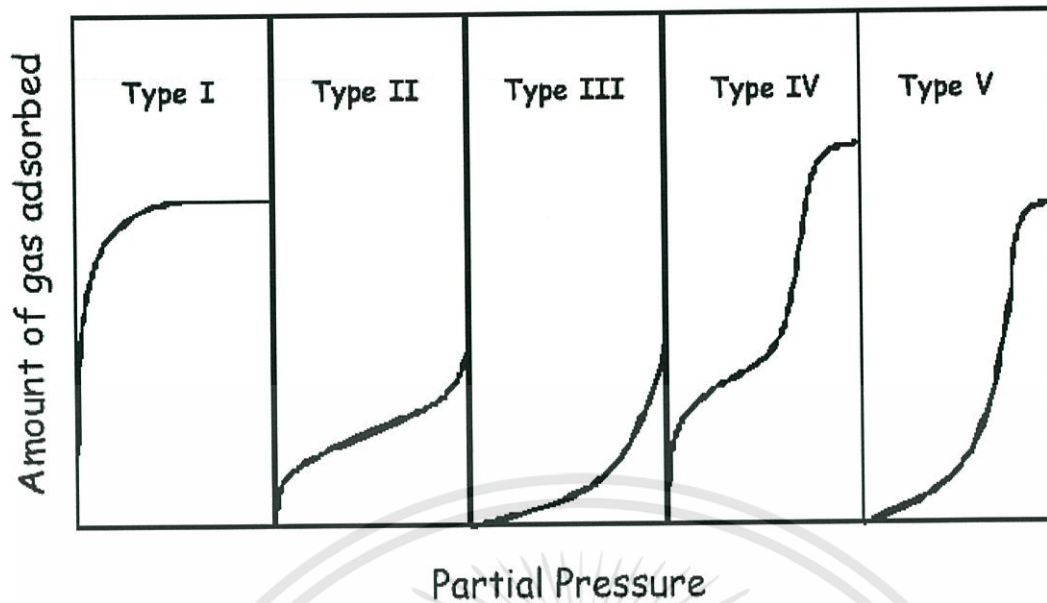
เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ ที่อุณหภูมิคงที่จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกนหา-มารณนำมาหาค่า K_f ได้ และความชันของกราฟเป็น $1/n$ บางกรณีทีพล็อตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ แล้วไม่ได้เส้นตรงแสดงว่าเกิดการเบี่ยงเบนไปจากสมการของฟรอนด์ลิช เช่น การดูดซับสารละลายที่ไม่ได้วัดจากน้ำหนักจริงของสารดูดซับแต่ค่าจากสารที่ถูกดูดซับในตัวทำละลายปริมาณมากทำให้สารที่ถูกดูดซับที่เหลือที่ความเข้มข้นสูงจึงมีปริมาณลดลง

3) ไอโซเทอมแบบบรูเนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller isotherm) ในปี ค.ศ. 1903-1986 นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน Stephen Brunauer และ ในปี ค.ศ.1900-1985 Paul Emmett และ Edward Teller ได้ศึกษาการดูดซับหลายชั้นและเสนอสมการที่ 2.6

$$P \cdot P_o / V(P_o - P) = 1/V_o K + P/P_o \quad \text{สมการที่ 2.6}$$

เมื่อ P = ความดันสมดุลของสารที่ถูกดูดซับ
 V = ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน
 V_o = ปริมาตรที่ถูกดูดซับเพื่อให้เกิดเป็นชั้นเดียว
 P_o = ความดันไออิ่มตัวของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ
 K = ค่าคงที่

Brunauer-Emmett-Teller ได้แบ่งลักษณะไอโซเทอมออกเป็น 5 แบบ ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งอธิบายการดูดซับแต่ละแบบดังนี้



ภาพที่ 2.4 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ ของ Brunauer-Emmett-Teller ในระบบก๊าซ [11]

ก. ไอโซเทอมแบบที่ 1 (Type I Isotherm) เป็นไอโซเทอมที่พบมากที่สุด พบทั้งในวัสดุที่มีรูพรุนและไม่มีรูพรุน เป็นการดูดซับแบบ single layer หรือ monolayer เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของอนุภาคที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous) โดยกลไกการดูดซับนั้นในตอนแรกพื้นผิวของวัสดุดูดซับจะยังว่างอยู่ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (Amount Adsorbed) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปพื้นผิวของตัวดูดซับจะค่อยๆ ลดลง ทำให้อัตราการดูดซับลดลงด้วย การดูดซับจึงเกิดได้ช้าลงและในที่สุดเมื่อพื้นผิวของตัวดูดซับเต็ม หรือเข้าสู่จุดสมดุล อัตราการดูดซับจะกลายเป็นศูนย์ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับจึงกลายเป็นค่าคงที่

ข. ไอโซเทอมแบบที่ 2 (Type II Isotherm) เป็นการดูดซับแบบ Multilayer หรือ การดูดซับแบบหลายโมเลกุล บนวัสดุที่ไม่มีรูพรุน (Non-Porous) หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous) บางครั้งเรียกว่า Sigmoid หรือไอโซเทอมรูปตัวเอส (S-Shaped isotherm) ในตอนแรกจะเกิดการดูดซับแบบ Monolayer ทั้งพื้นผิวก่อนหลังจากนั้นโมเลกุลของตัวดูดซับที่พื้นผิวจะเกิดการดึงดูดกับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับอื่นๆ ที่ยังไม่ถูกดูดซับทำให้เกิดเป็นการดูดซับในชั้นต่อไป ดังนั้นปริมาณสารที่ถูกดูดซับจึงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามจำนวนชั้นของการดูดซับ จากรูปที่ 2.4 (II) ณ ตำแหน่งจุดเปลี่ยนโค้ง ซึ่งมีลักษณะคล้ายหัวเข่าเป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวหลังจากนั้นจึงเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น ดังนั้นปริมาณการดูดซับที่จุดเปลี่ยนโค้งจะสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาพื้นที่ผิวได้

ค. ไอโซเทอมแบบที่ 3 (Type III Isotherm) เป็นการดูดซับแบบ Multilayer คล้ายการดูดซับแบบที่ 2 เกิดกับวัสดุที่ไม่มีรูพรุน ในกรณีที่แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับน้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกันเอง อัตราการดูดซับจึงขึ้นกับปริมาณตัวถูกดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับ ในช่วงแรกยังมีโมเลกุลถูกดูดซับอยู่ที่ผิว

ของตัวดูดซับน้อย ทำให้อัตราการดูดซับยังไม่สูงมาก เมื่อเวลาผ่านไปมีโมเลกุลถูกดูดซับมากขึ้นทำให้อัตราการดูดซับเพิ่มขึ้น

ง. ไอโซเทอมแบบที่ 4 (Type IV Isotherm) เป็นการดูดซับแบบ Multilayer บนวัสดุรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) ในกรณีที่แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกันเอง กลไกการดูดซับจะคล้ายกับในแบบที่ 2 แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัว เนื่องจากรูพรุนแบบกะปิลลารี (Capillary) ของตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว ทำให้ไม่สามารถเกิดการดูดซับได้อีกหรือก็คือเกิดการควบแน่นในรูขนาดเล็กรูปแบบกะปิลลารีซึ่งทำให้เกิดฮิสเทอรีซิสที่เกิดจากเส้นกราฟของการดูดซับและเส้นกราฟของการคายไม่ทับกัน เพราะการคายเกิดได้ยากกว่าเพราะต้องเอาชนะแรงกะปิลลารี (Capillary Force) ขนาดของการเกิดการควบแน่น สามารถนำมาคำนวณการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore Size Distribution, PSD) ได้

จ. ไอโซเทอมแบบที่ 5 (Type V Isotherm) เป็นการดูดซับแบบ Multilayer ในกรณีที่แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับน้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกันเอง กลไกการดูดซับจะคล้ายกับไอโซเทอมในแบบที่ 3 แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจากเกิดการควบแน่นในรูขนาดเล็กรูปแบบกะปิลลารีเช่นเดียวกับไอโซเทอมในแบบที่ 4 แต่การควบแน่นในรูพรุนในกรณีนี้ เกิดขึ้น เมื่อค่า P/P_0 สูงกว่า เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีค่าต่ำ ฮิสเทอรีซิสจากการดูดซับและการคายเกิดจากการเอาชนะแรงกะปิลลารีในการดึงตัวถูกดูดซับออกมาซึ่งไอโซเทอมชนิดนี้พบไม่บ่อยนัก

2.7 การตรวจสอบเอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ไดอะตอมไมต์

2.7.1 เครื่องวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)[16]

เป็นวิธีการวิเคราะห์วัสดุพื้นฐานแบบไม่ทำลายสารตัวอย่าง (nondestructive analysis) โดยจะให้ผลการวิเคราะห์เกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (crystal structure) การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ และองค์ประกอบทางแร่ ทั้งในเชิง คุณภาพ (qualitative) และปริมาณ (quantitative) ซึ่งอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิง ของรังสีเอกซ์ และความรู้เกี่ยวกับระบบโครงสร้างผลึก (crystallography)

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 10 นาโนเมตร เมื่อรังสีเอกซ์เกิดอันตรกิริยากับสารจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การเปล่งแสง การดูดกลืน การกระเจิงแสงหรือการเลี้ยวเบน ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้จะมีลักษณะเฉพาะที่ขึ้นอยู่กับสารตัวอย่างแต่ละชนิดเนื่องจากของแข็งที่เป็นผลึกจะมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบในสามมิติและมีหลายชุดระนาบเมื่อรังสีเอกซ์มาตกกระทบบนผิวของชุดระนาบต่างๆ ด้วยมุมที่เหมาะสมจะทำให้เกิดพฤติกรรมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้น ความเข้ม (Intensity, I) ของรังสีเอกซ์ ขึ้นกับกระแสไฟที่ใช้ (Current, i) ความต่างศักย์ (Voltage, V) และเลขอะตอมของธาตุที่เป็นเป้า (Z) ตัวแปรทั้งหมดมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$I = kiZV^2 \quad \text{สมการที่ 2.7}$$

ส่วนความถี่ของรังสีเอ็กซ์แบบเฉพาะจะเป็นฟังก์ชันกับเลขอะตอมตามกฎของมอสลีย์ (Moseley's Law)

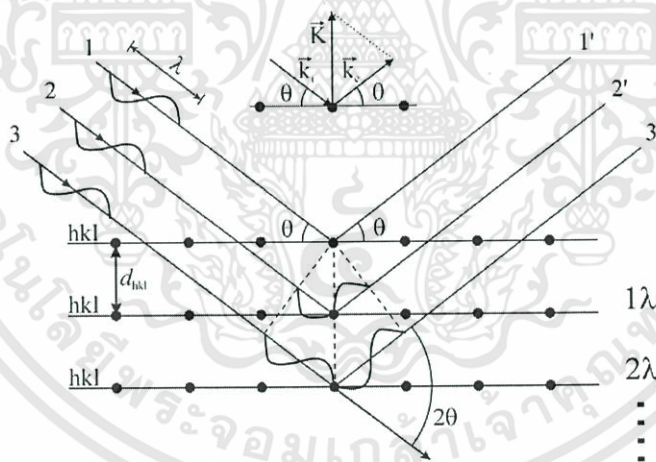
$$U = k(z-1) \quad \text{สมการที่ 2.8}$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แบ่งออกเป็นสองชนิดคือ สำหรับตัวอย่างที่เป็นผง (Powder X-ray Diffraction) และสำหรับตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single-Crystal X-ray Diffraction)

2.7.1.1 Powder X-ray Diffraction ซึ่งสามารถวิเคราะห์ชนิดของวัสดุได้เนื่องจากการเกิดรังสีเอ็กซ์ Diffraction จะให้สเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุ สามารถบอกวิถุภาคเชิงผลึกของวัสดุได้ว่าเป็นผลึก หรืออสัณฐาน เทคนิคนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ เพราะสามารถบอกชนิดของสารที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งวิถุภาคของวัสดุได้

2.7.1.2 Single-Crystal X-ray Diffraction หรือ X-ray Crystallography สามารถหาโครงสร้างของโมเลกุลได้ คือ สามารถบอกการจัดเรียงตัวของอะตอม ความยาวพันธะ มุมระหว่างอะตอมในโมเลกุลได้ เนื่องจากวัสดุตัวอย่างสำหรับเทคนิคนี้ต้องเป็นผลึกเดี่ยว ดังนั้นขั้นตอนการตกผลึกจึงมีความสำคัญมากในการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้นขนาดความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ อยู่ในช่วงเดียวกับระยะห่างระหว่างอะตอมในผลึกของของแข็ง ซึ่งทำให้รังสีเอ็กซ์สามารถเกิดการเลี้ยวเบนได้ดังแสดงในรูป 2.5



ภาพที่ 2.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดจากการกระเจิงและแทรกสอดของรังสี [16]

หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบผิวหน้าของผลึกโดยทำมุม θ บางส่วนของรังสีเอ็กซ์จะเกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า อีกส่วนหนึ่งของลารังสีเอ็กซ์จะผ่านไปยังชั้นที่ 2 ของอะตอม ซึ่งบางส่วนก็เกิดการกระเจิง และส่วนที่เหลือก็ผ่านเข้าไปยังชั้นที่ 3 ของอะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ถ้าอะตอมในผลึกมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่าๆ กัน ลารังสีเอ็กซ์ที่ผ่านเข้าไปในแต่ละชั้นของอะตอมจะเกิดการเลี้ยวเบนเป็นลำขนานกัน การเลี้ยวเบนนี้มีลักษณะคล้ายกับการเลี้ยวเบนด้วยเกรตติงแบบสะท้อน (reflection grating) ในการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ขึ้นอยู่กับภาวะ 2 ประการ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) รังสีที่ตกกระทบ รังสีที่เลี้ยวเบน และเส้นตั้งฉากกับผิวหน้าจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน

2) ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอม ควรมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ กับระยะห่างระหว่างระนาบผลึกและมุมตกกระทบ สามารถอธิบายโดยใช้กฎของแบรกก์ (Bragg ' law) ดังสมการ

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad \text{สมการที่ 2.9}$$

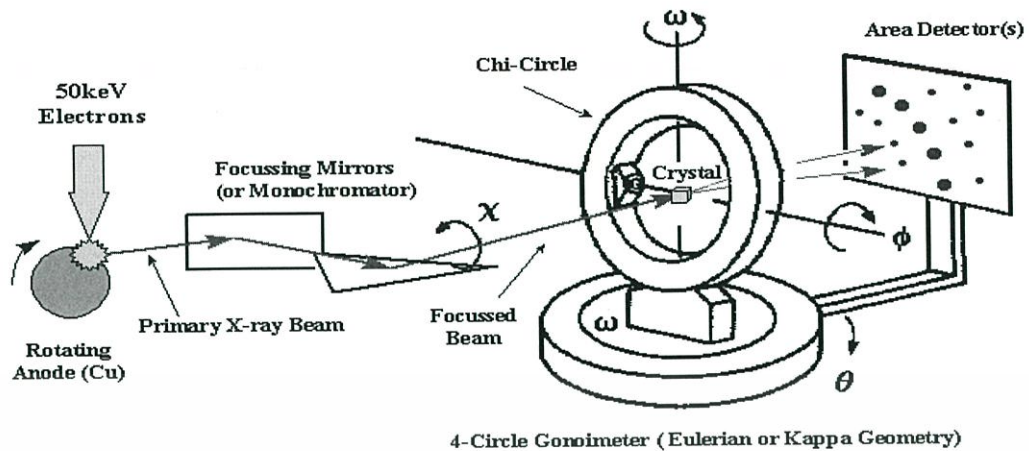
โดย n คือ อันดับของการสะท้อน

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีที่ใช้

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

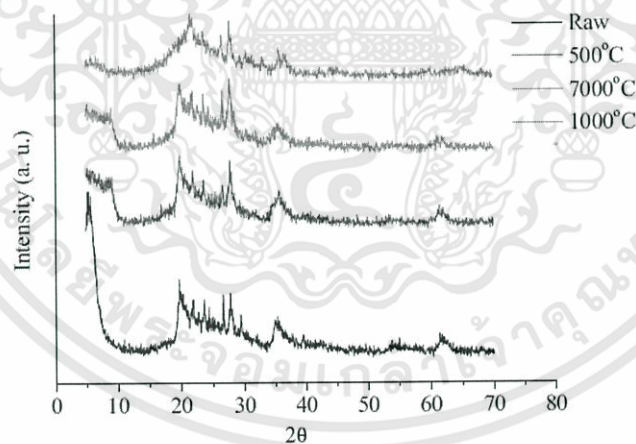
θ คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบผลึก

โดยทั่วไป ผลึกของวัสดุในธรรมชาติมีโครงสร้างที่แน่นอน ถ้ามองลึกเข้าไปถึงระดับอะตอม ผลึกประกอบด้วยอะตอมและกลุ่มอะตอมที่จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ มีมุมและระยะห่างระหว่างอะตอมที่แน่นอนและซ้ำกันในทุกทิศทาง ในการศึกษาโครงสร้างผลึกจะศึกษารูปแบบของโครงตาข่าย (lattice) ที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตที่แน่นอน ซึ่งต้องอาศัยหลักความสมมาตรกัน ในการศึกษาผลึกแบรกก์อธิบายว่า ผลึกประกอบด้วยโครงตาข่ายที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในลักษณะที่เป็นกลุ่มของระนาบที่ขนานกัน เมื่อรังสีของคลื่นตกกระทบผลึกที่กลุ่มของระนาบที่ขนานกันภายในผลึก แต่ละระนาบสะท้อนรังสีตกกระทบบางส่วนออกมาในลักษณะคล้ายกับกระจกเงา แนวรังสีสะท้อนจะพบได้เมื่อรังสีสะท้อนจากกลุ่มระนาบที่ขนานกันแทรกสอดกันแบบเสริม ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พลังงานรังสีเอ็กซ์ที่สะท้อนออกมามีค่าเท่ากับพลังงานรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ เครื่องมือที่วัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ คือเครื่องเอ็กซ์ เรย์ ดิ ฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) มีหลักการทำงานคือ เมื่อปล่อยกระแสเข้าไปยังขั้วแคโทด ซึ่งเป็นเส้นลวดให้ความร้อน เพื่อให้ไส้หลอดร้อนขึ้นหรือมีพลังงานสูงพอ ทำให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงหลุดออกมาจากขั้วแคโทดและพุ่งเข้าชนแอโนด ซึ่งเป็นโลหะที่นำความร้อนได้ดี (โลหะที่นิยมใช้เป็นขั้วแอโนด คือ ทองแดงและโมลิบดีนัม โดยหลอดที่ใช้ทองแดงจะเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมกับผลึกขนาดเล็กหรือมีขนาดหน่วยเซลล์ใหญ่ ส่วนโมลิบดีนัมเหมาะสมสำหรับผลึกขนาดใหญ่หรือผลึกที่มีการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ได้ดี) จึงทำให้อิเล็กตรอนวงในหลุดออกมาเมื่ออิเล็กตรอนชั้นอื่นเข้าไปแทนที่ออร์บิทัลที่ว่าง แอโนดจะคายพลังงานออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์ และความร้อน จะต้องมึน้ำหล่อเย็น โดยทั่วไปรังสีเอ็กซ์จะเกิดขึ้นโดยปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ของพลังงานที่คายออกมาทั้งหมด รังสีเอ็กซ์ที่คายออกมามีทั้งรังสีเอ็กซ์แบบเฉพาะตัว (characteristic) ที่เป็น $K\alpha$ และ $K\beta$ จากนั้นจึงใช้แผ่นกรองแสงซึ่งเป็นตัวดูดกลืนความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการ กำจัดเอาพีคของ $K\beta$ ออกไปเพื่อให้เหลือรังสีเอ็กซ์ที่มีการเลี้ยวเบนจะถูกตรวจวัดโดยดีเทคเตอร์ (detector) ซึ่งสามารถวัดรังสีกระเจิงได้ ณ มุมต่างๆ ทำให้หาค่า 2θ ได้ ข้อมูลที่บันทึกผลออกมาแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้ม (intensity) และค่ามุม 2θ โดยสารแต่ละชนิดจะให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกันไป โดย สามารถทำการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้โดยการนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่อยู่ในแฟ้มข้อมูล Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDS)



ภาพที่ 2.6 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง (X-ray diffractometer) [16]

ตัวอย่างงานวิจัยของ N. Inchaurredo และคณะ ในปี ค.ศ.2015 [17] ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบ natural diatomite และไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยการแคลไซต์ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกด้วยเครื่อง XRD ได้ผลดังรูปที่ 2.7 จากรูปพบว่าไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติและ แคลไซต์ไดอะตอมไมต์ที่อุณหภูมิ 500 °C และ 700 °C มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบออสทราน มีค่า 2θ แบบ quartz (SiO₂) เท่ากับ 27° และแบบ albite (feldspar Na(AlSi₃O₈)) เท่ากับ 28°, 24° และ 22° และไดอะตอมไมต์ผ่านการปรับปรุงด้วยวิธีแคลไซต์ ที่อุณหภูมิ 1000° C มีลักษณะโครงสร้างแบบผลึก (crystalline : cristobalite) มีค่า 2θ เท่ากับ 36°



ภาพที่ 2.7 XRD โครงสร้างของไดอะตอมไมต์ [17]

2.7.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ,SEM)[18-19]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนหรือที่เรียกกันอย่างย่อว่า SEM ซึ่งจะใช้แหล่งภาพจากอิเล็กตรอนซึ่งจะแตกต่างจากกล้องไมโครสโคปแบบแสง (Light microscopes, LM) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกผลิตมาจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) ในกล้องอิเล็กตรอนแบบสแกน ซึ่งตัวสารจะถูกสแกนในลักษณะสัญญาณด้วยลำแสงอิเล็กตรอนมีประโยชน์ในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) หรือโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้องอิเล็กตรอนแบบสแกนจะใช้ดูรายละเอียดของพื้นผิวหรือชิ้นส่วนที่เล็กมากๆบนผิวของวัตถุหรือวัตถุโดยรวมทั้งหมดโดยทางชีววิทยาเคมีและทางฟิสิกส์จะใช้เทคนิคนี้ในการตรวจสอบดูโครงสร้างที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรได้ซึ่งใช้ในการศึกษาส่วนต่างๆของเซลล์ศึกษาสาร พันธุกรรมและการสังเคราะห์พอลิเมอร์ซึ่งการเคลือบบนไมโครชิพของสารตัวอย่างซึ่งมี กำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงมากกว่า 100,000 เท่าโดยการแจกแจงรายละเอียดของ ภาพมีความเป็นไปได้ถึงประมาณ 2 นาโนเมตร นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดนี้ ประกอบไปด้วยชุดอุปกรณ์อิเล็กตรอนิกส์ที่สามารถดัดแปลงต่อเติมอุปกรณ์เสริมชนิดอื่นๆ เช่น ระบบคอมพิวเตอร์หรือชุดหัวโพรบรังสีเอกซ์ เป็นต้น เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการแสดงผล ในรูปแบบต่างๆซึ่งสัญญาณที่ได้จากกล้องอิเล็กตรอนแบบสแกนจะเกิดจากการใช้ตัวตรวจจับ พวกอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron detector) คอยดักจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติย ภูมิที่เกิดขึ้นจากผิวของสารตัวอย่างมีอันตร-กิริยากับลำอิเล็กตรอนที่ยิงเข้าไป

1) ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีดังนี้

- ก. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun)
- ข. เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน (electron magnetic lens) และขดลวดควบคุมการเคลื่อนของลำแสงอิเล็กตรอน (scan coil)
- ค. ช่องตัวอย่าง (specimen chamber)
- ง. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (collector and scintillator)
- จ. อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (imaging photographic devices)

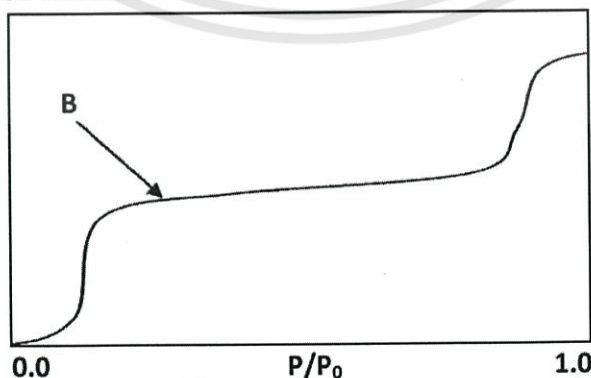
2) หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

การกำเนิดของภาพโดย SEM นี้ กลุ่มอิเล็กตรอน(Primary electron) ปฐมภูมิ (Electron gun) ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนถูกรวบรวมโดยระบบเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิเป็นรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-50 nm ลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron beam หรือ electron probe) นี้จะถูกกำหนดให้ตกลงบนผิวตัวอย่าง พร้อมกับถูกผลักให้เคลื่อนไปบนผิวของตัวอย่าง โดยขดลวดควบคุมการเคลื่อนของลำแสงอิเล็กตรอน ขณะที่ลำแสงอิเล็กตรอนกระทบผิวของตัวอย่างก็จะเกิดสัญญาณออกมาหลายรูปแบบ และสัญญาณเหล่านั้นสามารถจับไว้หรือรวมไว้แล้วเปลี่ยนแปลงให้เป็นภาพซึ่งถ่ายไว้ได้เมื่อลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวตัวอย่างทำให้มีอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ซึ่งมีพลังงานต่ำหนีออกมาจากชั้นบางของพื้นผิว (ไม่เกิน 5 nm) อิเล็กตรอนประเภทนี้บางประจําอาจหนีออกมาไม่ได้ เพราะถูกดูดกลับเข้าชั้นในตัวอย่าง (ส่วนที่ลึกเกิน 5 nm) ก็สูญหายไปใ้ที่สุดประจําอิเล็กตรอนบริเวณชั้นบนของผิวตัวอย่างที่หลุดออกมาจะถูกจับและรวมเป็นสัญญาณโดยอุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ ซึ่งสัญญาณนี้จะเปลี่ยนไปเป็นโปรตอนไปเป็นอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนชุดหลังจะถูกขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยตัวขยายสัญญาณ (amplifier) ให้มีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ในที่สุดสัญญาณไฟฟ้าเหล่านั้นจะถูกแปรไปเป็นภาพขาวดำที่ปรากฏบนจอโทรทัศน์หรือจอภาพหลอดรังสีแคโทด (cathode ray tube, CRT) พร้อมทั้งจะบันทึกภาพซึ่งเกิดจากความแตกต่างระหว่างความสว่าง (ขาว) กับความมืด (ดำ) บนจอภาพ ด้วยกล้องถ่ายภาพ ภาพที่ปรากฏบนจอภาพ CRT เป็นภาพขยายของบริเวณสี่เหลี่ยมจัตุรัสของพื้นผิวที่ลำแสงอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้านในเวลานั้น การที่จะเพิ่ม

หรือลดกำลังขยายของภาพจำต้องควบคุมเนื้อที่ที่ลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิส่องกราดไป บริเวณจตุรัสขนาดเล็ก ภาพที่ปรากฏจะเป็นภาพขยายขนาดใหญ่หรือในทางกลับกัน หากกำหนดให้ลำแสงอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในบริเวณที่กว้างใหญ่ภาพที่ปรากฏบนจอ CRT ก็เป็นภาพที่มีกำลังขยายต่ำกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องกราดไปบนผิวของวัตถุตัวอย่างแล้วจะปรากฏเป็นภาพขยายมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรืออาจบันทึกภาพด้วยแผ่นฟิล์ม ลักษณะพิเศษของ SEM ให้คุณสมบัติกำลังขยาย และรายละเอียดสูง ให้ภาพที่มีความลึกหรือมองเห็นเป็นภาพ 3 มิติ กล้องชนิดนี้ส่วนใหญ่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (electronics) ซึ่งเปิดโอกาสให้ผู้ใช้ได้มีโอกาส ดัดแปลงโดยต่อเติมอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้มีการแสดงผลในรูปแบบต่างๆ เช่น วิเคราะห์ธาตุ (element analysis) การคำนวณหามวลและปริมาตร เป็นต้น ส่วนการเคลือบ หรือฉาบผิวตัวอย่างนิยมใช้สารตัวนำไฟฟ้าจำพวก โลหะหนักที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น คาร์บอน ทอง และโลหะผสมทอง-พัลลาเดียม เป็นต้น โดยจุดประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่าง ทั้งนี้หลักการเบื้องต้นของการฉาบผิว คือ ต้องกระทำ ภายใต้ภาวะสุญญากาศและให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อให้โลหะหนักเปลี่ยนสภาพ จากแท่งโลหะมาเป็นโมเลกุลและตกลงบนผิวตัวอย่างในอัตราส่วนเดียวกัน ทำให้โลหะ ฉาบผิวตัวอย่างได้เป็นเนื้อเดียวกัน

2.7.3 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาครูพรุน โดยวิธีบีบีที (BET) [20]

พื้นที่ผิว (Surface Area) ของสารเป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อนำสารนั้นไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ หรือตามที่มาตรฐานกำหนด การวัดพื้นที่ผิวภายในวัสดุที่มีความพรุนทำได้โดย การศึกษาการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สอื่นที่มีขนาดเล็ก เช่น อาร์กอน โดยใช้ ประโยชน์จากไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพหรือวิธีบีบีที (BET ย่อมาจากBrunauer-Emmett-Teller Method) ที่อุณหภูมิของแก๊สเหลว (ในที่นี้เป็นอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวหรืออาร์กอนเหลว) ซึ่งขึ้นอยู่กับ การดูดซับ โดยจะหาจำนวนโมเลกุลที่ใช้เพื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งจะทำให้สามารถ คำนวณหาพื้นที่ผิวภายในได้จากการดูดซับของ N_2 ดังรูป จะเกิด ได้เร็วในช่วงแรกโดยจะเพิ่มความดัน จนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนแปลง (ตำแหน่ง B) ซึ่งเส้นกราฟจะราบ แสดงถึงปรากฏการณ์ที่ การดูดซับบนพื้นผิวแบบชั้นเดียว จะเกิดการควบแน่นของไนโตรเจนในรูพรุนทำให้ปริมาตรของ การดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

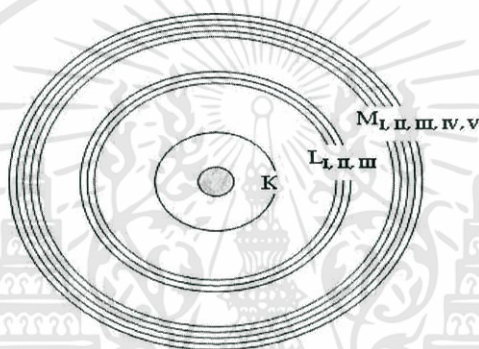


ภาพที่ 2.8 กราฟการวัดพื้นที่ผิวโดยวิธีการดูดซับของแก๊สด้วยบีบีที [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

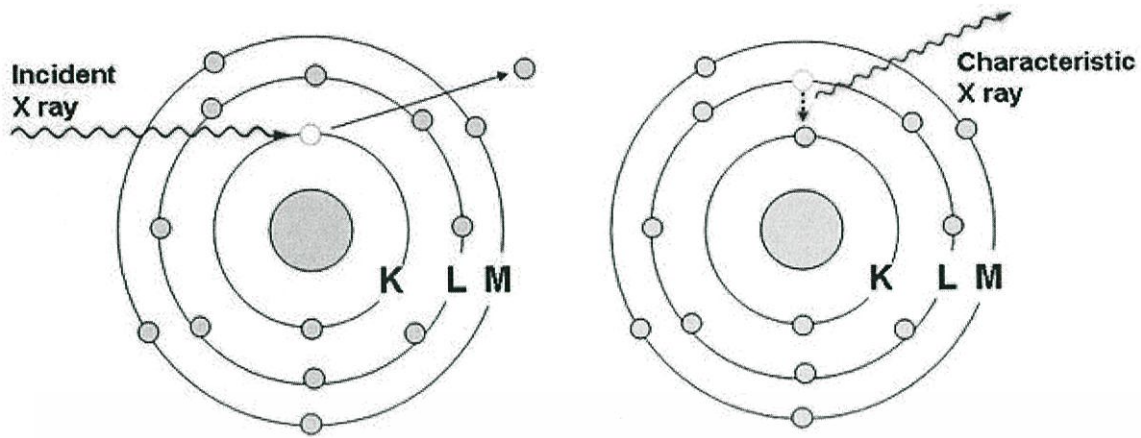
2.7.4 ตรวจสอบหารปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวดูดซับโดยอาศัยการวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อย (XRF)[21]

เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X ray) ของแต่ละธาตุอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม แบ่งเป็นชั้น (shells) โดยชั้นในสุด ได้แก่ ชั้น K มีระดับพลังงาน (energy level) ต่ำสุด ถัดออกมา ได้แก่ ชั้น L, M, N, ... ซึ่งจะมีระดับพลังงานสูงขึ้นตามลำดับ นอกจากอิเล็กตรอนในชั้น K ที่มีระดับพลังงานเดียวแล้ว อิเล็กตรอนในชั้นอื่น ยังแบ่งเป็นชั้นย่อย ได้แก่ L_I, L_{II}, L_{III} และ $M_I, M_{II}, M_{III}, M_{IV}, M_V$ ซึ่งอะตอมของธาตุแต่ละชนิด จะมีความแตกต่างของพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน



ภาพที่ 2.9 อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมแบ่งเป็นชั้น [21]

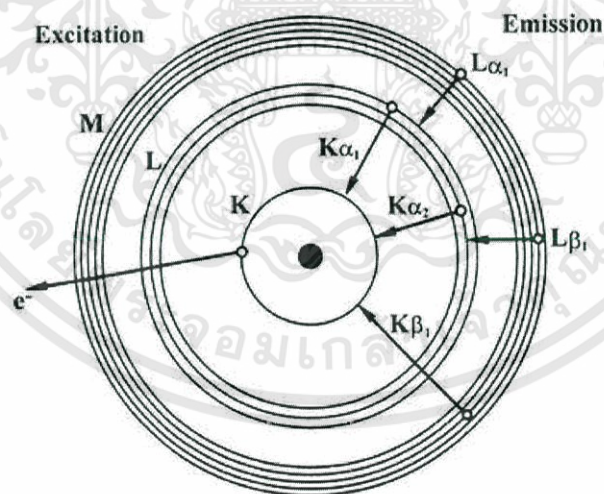
อิเล็กตรอนในแต่ละชั้นของวงโคจร มีพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ที่ได้รับจากนิวเคลียสแตกต่างกัน อิเล็กตรอนวงในที่อยู่ใกล้นิวเคลียส จะได้รับพลังงานยึดเหนี่ยวมากกว่าอิเล็กตรอนวงนอก และธาตุที่มีเลขอะตอม (Z) สูงขึ้นจะมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่ออิเล็กตรอนมากขึ้น เมื่อยิงรังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา อิเล็กตรอน หรือโปรตอนไปยังอะตอมของธาตุ จะชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอม ทำให้ตำแหน่งนั้นว่าง อิเล็กตรอนในชั้นที่มีพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ เช่น จากชั้น L ไปชั้น K จากชั้น M ไปชั้น K หรือจากชั้น M ไปชั้น L โดยคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X-ray) ของแต่ละธาตุ



ภาพที่ 2.10 (a) รังสีเอ็กซ์พลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกไปจากวงโคจร (b) อิเล็กตรอนในชั้น M ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาแทนที่โดยคายรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานจำเพาะออกมา [21]

รังสีเอ็กซ์จำเพาะ (characteristic X-ray) ที่เกิดจากอิเล็กตรอนในชั้นที่สูงกว่า ลงไปแทนที่ว่างในชั้น K เรียกว่า K radiation หรือ K X-ray และเรียกว่า L radiation หรือ L X-ray ถ้าเป็นรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากอิเล็กตรอน ลงไปแทนที่ว่างในชั้น L โดยส่วนใหญ่อิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากวงโคจรจะเป็นอิเล็กตรอนในชั้น K ทำให้รังสีเอ็กซ์จำเพาะที่คายออกมา มีความเข้มของ K X-ray มากกว่า L X-ray รังสีเอ็กซ์จำเพาะจากอิเล็กตรอนในชั้นที่สูงกว่าหนึ่งระดับจะกำกับด้วยเครื่องหมาย α เช่น อิเล็กตรอนจากชั้น L ไป K = $K\alpha$ หรือ อิเล็กตรอนจากชั้น M ไป L

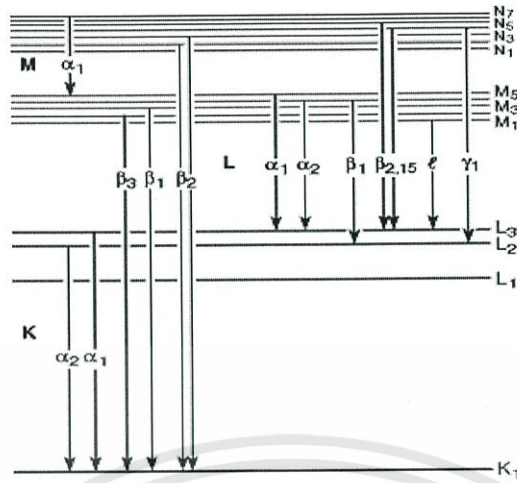
= $L\alpha$



ภาพที่ 2.11 สัญลักษณ์ของรังสีเอ็กซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน [21]

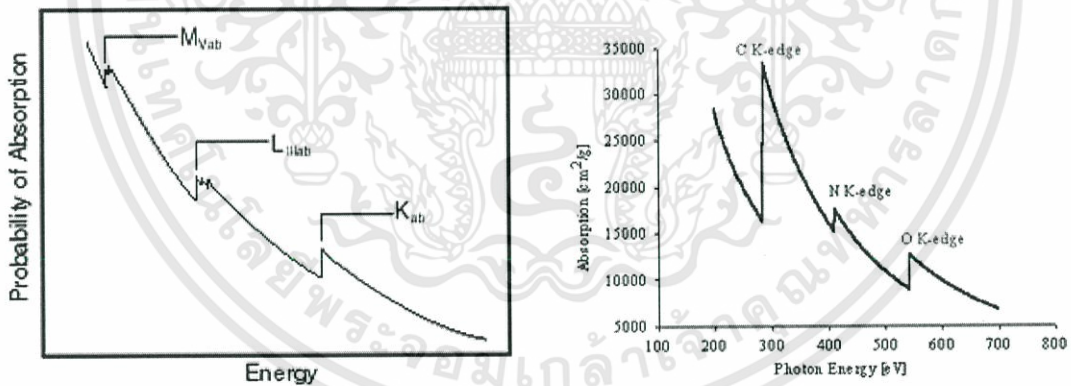
รังสีเอ็กซ์จำเพาะจากอิเล็กตรอนในชั้นย่อยของแต่ละระดับที่ลงไปแทนที่ว่าง จะกำกับเพิ่มเติมด้วยหมายเลข เช่น อิเล็กตรอนจากชั้นย่อยของ L_{III} ไป K = $K\alpha_1$ และ L_{II} ไป K = $K\alpha_2$ หรือ M_V ไป L_{III} = $L\alpha_1$ และ M_{IV} ไป L_{III} = $K\alpha_2$ นอกจากนั้น รังสีเอ็กซ์จากอิเล็กตรอนจากชั้นอื่นที่ลงมาแทนที่ จะมีเครื่องหมายและหมายเลขกำกับแตกต่างกัน เช่น $K\beta_1$, $K\beta_2$, $L\beta_1$, $L\beta_2$, $L\gamma_1$, $L\gamma_2$ ดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.12 สัญลักษณ์ของรังสีเอ็กซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน [21]

รังสีที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอม จะต้องมีพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน หรือ แอ็บซอร์บชันเอจ (absorption edge) โดยจะมีสัมประสิทธิ์ในการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเมื่อมีพลังงานใกล้เคียงกับ absorption edge และจะมีค่าลดลงเมื่อรังสีที่เข้าทำปฏิกิริยามีพลังงานสูงขึ้น โดยมีค่าแตกต่างกันสำหรับอิเล็กตรอนแต่ละชั้นและแตกต่างกันในแต่ละธาตุ ดังรูปที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 (a) แอ็บซอร์บชันเอจของอิเล็กตรอนในชั้น K, L, M และ (b) แอ็บซอร์บชันเอจของคาร์บอน ไนโตรเจนและออกซิเจน [21]

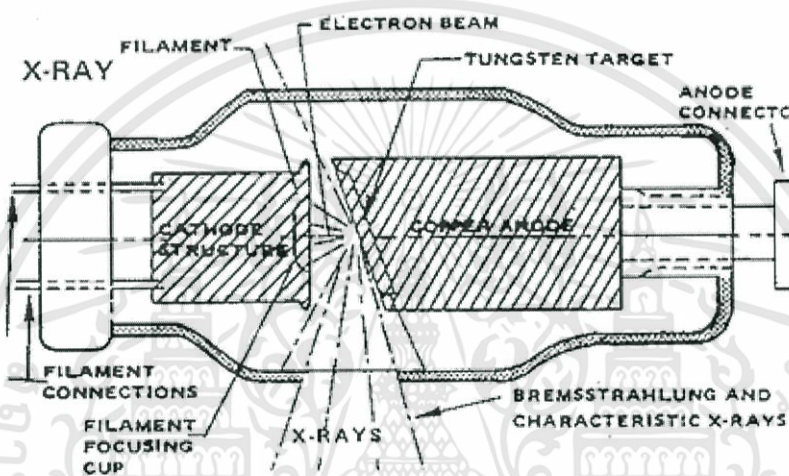
การหาชนิดของธาตุ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอ็กซ์จำเพาะ ขณะที่การหาปริมาณธาตุ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่คายออกมา การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ โดยทั่วไป จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม โดยใช้รังสีเอกซ์พลังงานสูงจากหลอดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) หรือไอโซโทปรังสี (radioisotope) ที่ให้รังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลอดรังสีเอกซ์ประกอบด้วยไส้หลอด (filament) ที่เป็นแคโทด (cathode) หรือขั้วลบ และแอโนด (anode) หรือขั้วบวกที่มีความต่างศักย์สูง (high voltage) ทำด้วยโลหะที่มีเลขอะตอมสูงและทนความร้อนได้ดี เช่น W, Mo หรือ Rh เมื่อป้อนไฟฟ้าเข้าไป จะทำให้เกิดความร้อนที่แคโทดและมีอิเล็กตรอนหลุดออกมา ความต่างศักย์จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าชนแอโนดที่เป็นเป้า (target) และปล่อยรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง หรือเบรมสตราห์ลุง (Bremsstrahlung) ออกมา โดยมีความเข้ม (I) แปรผันตามกระแสไฟฟ้า (i) ศักย์ไฟฟ้า (V) และเลขอะตอม (Z) ของธาตุที่ใช้ทำแอโนด ตามสมการ

$$I = kiZV^2 \quad \text{สมการที่ 2.11}$$

โดย k เป็นค่าคงที่



ภาพที่ 2.14 ส่วนประกอบของหลอดรังสีเอกซ์ [21]

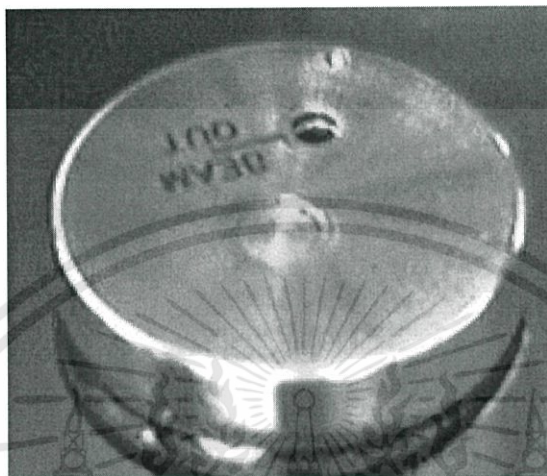
ไอโซโทปรังสีที่ใช้ในงานเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เป็นไอโซโทปที่ให้รังสีเอกซ์ ได้แก่ Fe-55, Cd-109, Am-241 และ Pu-238 ซึ่งมีลักษณะเป็นวงแหวนหรือบรรจุอยู่ในตั้บที่มี ช่องเปิด ดังรูปที่ 2.14 โดยมีคุณสมบัติ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไอโซโทปรังสี [21]

Isotope	T1/2	Decay mode	X ray emission
Fe-55	2.7 year	Electron capture	5.9 keV
Cd-109	453 day	Electron capture	22.1, 88.7 keV

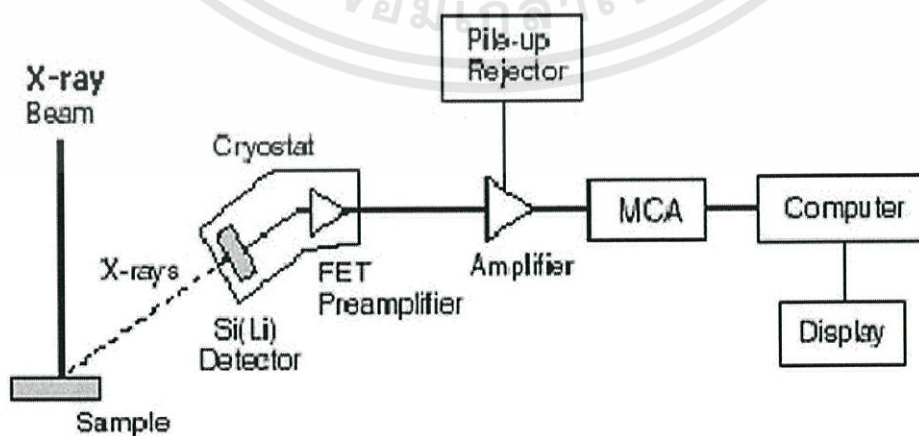
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Am-241	458 year	Alpha emission	59.57, 26.4 keV
Pu-238	86.4 year	Alpha emission	12 - 17 keV



ภาพที่ 2.15 ต้นกำเนิดรังสีเอ็กซ์แบบไอโซโทปรังสี[21]

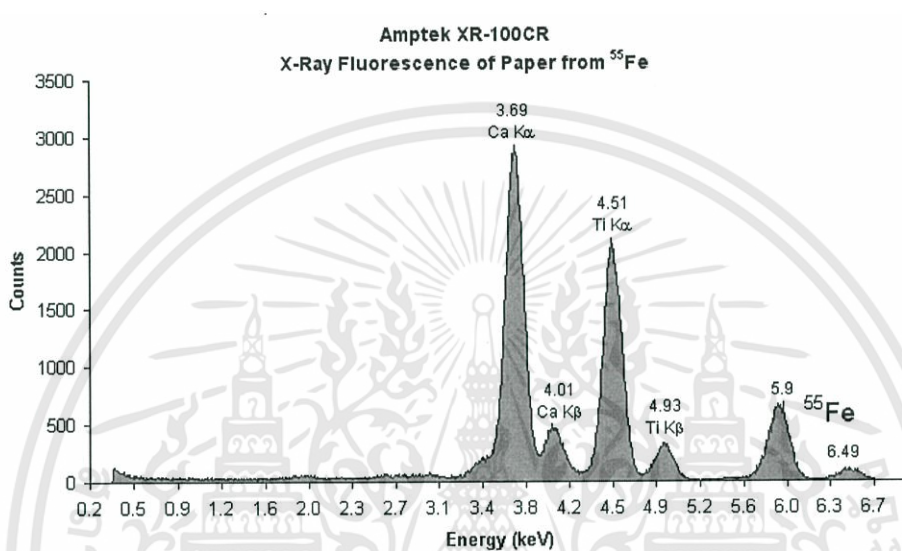
รังสีเอ็กซ์ที่ให้ออกมาจากแต่ละธาตุในตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์พลังงานของรังสี เพื่อหาชนิดของธาตุ และวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเพื่อหาปริมาณธาตุได้โดยใช้หัววัดรังสีเอ็กซ์แบบก๊าซ (gas ionization chamber) ชนิด proportional counter หัววัดรังสีแบบเปล่งแสง (scintillation counter) หรือหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้หัววัดชนิดซิลิกอน (ลิเทียม): Si(Li) หรือเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง : HPGe อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดรังสีเอ็กซ์ โดยทั่วไปประกอบด้วยหัววัดรังสี (detector) ส่วนสร้างสัญญาณ (preamplifier) ส่วนขยาย สัญญาณ (amplifier) ส่วนวิเคราะห์สัญญาณ (multichannel analyzer) หรือ MCA ประกอบ กับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมประมวลผลและแสดงผลการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 2.16



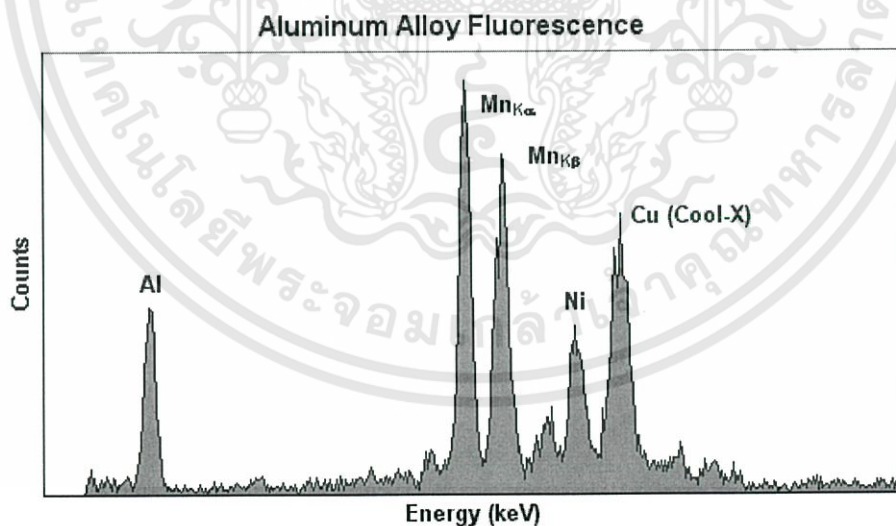
ภาพที่ 2.16 การจัดต่อประกอบอุปกรณ์การวิเคราะห์โดยเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์[21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีเอกซ์พลังงานสูงจากต้นกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไอโซโทปหรือหลอดรังสีเอกซ์ ที่ตกกระทบตัวอย่าง จะทำให้ธาตุที่อยู่ภายในตัวอย่างปลดปล่อยรังสีเอกซ์จำเพาะของแต่ละธาตุออกมา ซึ่งแสดงผลการวัดเป็นแถบพลังงาน หรือสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 2.17 และรูปที่ 2.18 ตำแหน่งที่แสดงผลการวัดรังสีเอกซ์ของแต่ละธาตุ เรียกว่า โฟโตพีก (photopeak) ซึ่งมีพื้นที่ของพีก (peak area) เป็นค่านับวัด (count) ของรังสีเอกซ์ ที่มีค่าแปรผันตามปริมาณธาตุในตัวอย่าง



ภาพที่ 2.17 สเปกตรัมรังสีเอกซ์จำเพาะของธาตุในตัวอย่างกระดาษ[21]



ภาพที่ 2.18 สเปกตรัมรังสีเอกซ์จำเพาะของธาตุในโลหะผสมอลูมิเนียม[21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.5 เครื่องตรวจวัดสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared, FT-IR) [22]

เครื่องตรวจวัดสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบอินฟราเรด เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และพันธะเคมีในโมเลกุลรวมถึงสามารถบอกปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิดซึ่งเทคนิค FT-IR นี้มีความไวสูงใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่น ๆ โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรดที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ $12800-10\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

1) อินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared) มีเลขคลื่นอยู่ในช่วง $12800-4000\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งในแถบการดูดกลืนแสงของโมเลกุลในย่านนี้ส่วนใหญ่เกิดจากโอเวอร์โทน (Overtone)

ข้อดีในการวิเคราะห์สเปกตรัมของพอลิเมอร์ในช่วง Near IR คือ

- การหาปริมาณหมู่ฟังก์ชัน บางชนิดในโมเลกุลสารอินทรีย์ เช่น หมู่เมธิลีนที่อยู่ปลาย (Terminal methylene) หมู่มีเทน (Methyne) หมู่เอมีน (NH) และ หมู่ไฮดรอกซิล (OH)
- การวิเคราะห์พันธะไฮโดรเจน
- การศึกษาแรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวถูกละลาย

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

3) อินฟราเรดย่านไกล (Far infrared) มีเลขคลื่นอยู่ในช่วง $200-10\text{ cm}^{-1}$ จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับการหมุนของโมเลกุลเนื่องจากพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการทรานสิชันที่มีระดับพลังงานค่อนข้างต่ำเมื่อพิจารณาโมเลกุลของสารโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอะตอมที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะเคมีเมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับการสั่นของโมเลกุลแล้วจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ทำให้โมเลกุลนั้นสามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ โดยการสั่นของโมเลกุล แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การยืดหด (Stretching) การโค้งงอ (Bending หรือ Deformation)

การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อบันทึก IR spectrum

การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อบันทึก IR spectrum มีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับสถานะของสารอินทรีย์และความเหมาะสม

1) สารตัวอย่างที่เป็นแก๊ส

แก๊สจะถูกบรรจุลงในแก๊สเซลล์ โดยก่อนบรรจุจะต้องดูดอากาศออกจากแก๊สเซลล์ก่อนแล้วจึงปล่อยให้แก๊สที่ต้องการบันทึกเข้าไปในเซลล์หน้าต่างของแก๊สเซลล์ทำด้วยผลึกที่ให้รังสีอินฟราเรดผ่านได้ซึ่งอาจทำได้ด้วย Sodium chloride, Potassium bromide, Cesium iodide, Fused silica, Calcium fluoride หรือ Thallium bromide-iodide ความหนาของแก๊สเซลล์แบบมาตรฐานทั่วไปคือ 10 เซนติเมตร

2) สารตัวอย่างที่เป็นของเหลว

ใส่ตัวอย่างในเซลล์ที่มีความหนาของเซลล์ตามต้องการหากต้องใช้ตัวทำละลายต้องเลือกให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการละลายของเซลล์ โดยทั่วไปมักใช้ตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว

3) สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

- เทคนิคมัลล์ (Mull Technique) ใช้สำหรับตัวอย่างของแข็งโดยทำให้เป็น Suspension ในน้ำมันที่เรียกว่า Nujol

- วิธีการอัดเม็ด (Pellet Method) อัดของแข็งตัวอย่างในเกลือบางชนิดเช่น KBr ด้วยความดันสูง

- เทคนิคฟิล์ม (Film techniques) ละลายตัวอย่างของแข็งในตัวทำละลายที่เหมาะสมและทำให้เป็นแผ่นบาง

- วิธีละลายตัวอย่างของแข็ง (Solution Methods) ละลายตัวอย่างของแข็งในตัวทำละลายที่เหมาะสม

เครื่องมืออินฟราเรด (IR instrument)

องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องมืออินฟราเรดสเปกโตรสโคปีแบบดิสเพอร์ซีฟ (Dispersive infrared spectroscopy) ซึ่งเป็นแบบดั้งเดิม จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญดังนี้

- 1) แหล่งกำเนิดแสง (Light source)
- 2) เซลล์บรรจุสาร (Sample cell)
- 3) โมโนโครมาเตอร์ (Monochromator)
- 4) อุปกรณ์วัดสัญญาณ (Detector)
- 5) ตัวขยายสัญญาณ (Amplifier)
- 6) เครื่องบันทึกข้อมูล (Recorder)

เครื่องมืออินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1) เครื่องอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้ระบบกระจายแสง (Dispersive infrared spectrophotometer) ซึ่งมีแบบลำแสงเดี่ยว และลำแสงคู่

2) เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer) เป็นเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีที่ใช้อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Michelson Interferometer) ในการทำหน้าที่แยกแสงที่ผ่านออกจากเซลล์บรรจุสารตัวอย่างออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ (แทนที่การใช้วิธีธรรมดาในกรณีของเครื่องมืออินฟราเรดแบบดิสเพอร์ซีฟหรือแบบลำแสงคู่)

ข้อดี-ข้อจำกัด

FT-IR ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วและมีความไวสูง (โดยส่วนใหญ่จะใช้เวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 1-5 นาที) โดยมีอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise; S/N) ต่ำ อัตรา S/N จะแปรผันกับรากที่สองของปริมาณสัญญาณที่ตรวจวัดได้ทั้งหมดความไวของเครื่องตรวจวัดสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการเพิ่ม S/N ร่วมกับการเพิ่มจำนวนรอบของสแกน มีการใช้ Circular optical aperture แทนที่ Entrance slit ทำให้ลำรังสีมีขนาดมากกว่าแบบ

Dispersive ถึง 75-100 เท่ามีกำลังแสงสูงขึ้น เหมาะสำหรับตัวอย่างหรือเทคนิคบางเทคนิคที่มีข้อจำกัดของกำลังแสง นอกจากนี้ FT-IR ยังให้ประสิทธิภาพในการแยกสเปกตรัมที่มีความถูกต้องไม่ต่ำกว่า 0.01 cm^{-1} มี กลไกการทำงานที่ง่ายแต่ FT-IR มีข้อจำกัดในการเตรียมตัวอย่างบางเทคนิคที่ต้องใช้สารละลายที่ยินยอมให้รังสีทะลุผ่านและตัวอย่างจะต้อง Active ในช่วงอินฟราเรด นอกจากนี้เครื่องมือที่ใช้มีราคาค่อนข้างสูงและมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง

2.8 การตรวจสอบเอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบการดูดซับไดอะตอมไมต์ (Diatomite) [23-25]

2.8.1 เทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

AAS เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ เพราะเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วกว่าวิธีอื่น โดยให้ความถูกต้อง ความแม่นยำ มีความไวสูง และมีความจำเพาะเจาะจงต่อการวิเคราะห์ธาตุนั้นๆ ใช้ได้ทั้งการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ

1) เทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีหลายวิธี คือ

ก. ใช้ Flame Atomization Technique เทคนิคนี้ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างแตกตัวเป็นอะตอมด้วยเปลวไฟ (flame) ที่เหมาะสม

ข. ใช้ Flameless Technique หรือ Non-flame Atomization Technique เทคนิคนี้ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างสลายตัวเป็นอะตอมได้ด้วยความร้อนจากกระแสไฟฟ้า (electrothermal atomizer หรือ graphite furnace) โดยสามารถตั้งโปรแกรมให้อุณหภูมิของการเผามีค่าต่างๆ กัน และใช้เวลาต่างๆ กันได้

ค. ใช้ Hydride Generation Technique เนื่องจากมีธาตุบางชนิดจะเปลี่ยนให้เป็นอะตอมโดยตรงด้วยเทคนิค 1 และ 2 ไม่ได้จำเป็นต้องใช้วิธีทำให้แตกตัวในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนเพื่อป้องกันการรวมตัวกับออกซิเจนของธาตุเหล่านี้ ดังนั้น จึงต้องใช้วิธีทำให้ธาตุเหล่านี้กลายเป็นไอได้ง่ายๆ ที่อุณหภูมิห้องด้วยการรีดิวซ์ให้เป็นไฮไดรด์แล้วให้ไฮไดรด์นั้นผ่านเข้าไปในเปลวไฟไฮโดรเจน ความร้อนจากเปลวไฟไฮโดรเจนทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมเสรีได้เทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ As, Se, Te, Ge, Bi, Sb

ง. ใช้ Cold Vapor Generation Technique สำหรับเทคนิคนี้เหมาะที่จะใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นไอได้ง่ายๆ ซึ่งได้แก่การวิเคราะห์ปรอทที่มีปริมาณน้อยโดยเฉพาะเพื่อความเข้าใจถึงขั้นตอนของเทคนิคการวิเคราะห์ทาง AAS ตลอดทั้งหน้าที่ของส่วนต่างๆ ของเครื่อง AAS โดยจะอธิบายพอสังเขป ดังต่อไปนี้

2) องค์ประกอบที่สำคัญต่างๆ ของเครื่องอะตอมมิคแอ็บซอร์พชันสเปกโทโร

โฟโตมิเตอร์ ประกอบด้วยส่วนต่างๆ 5 ส่วน คือ

ก. แหล่งกำเนิดแสง (light source) ใช้เป็น hollow cathode lamps (HCLs) และ electrodeless discharge lamps (EDLs) ซึ่งมีใช้เฉพาะบางธาตุเท่านั้น

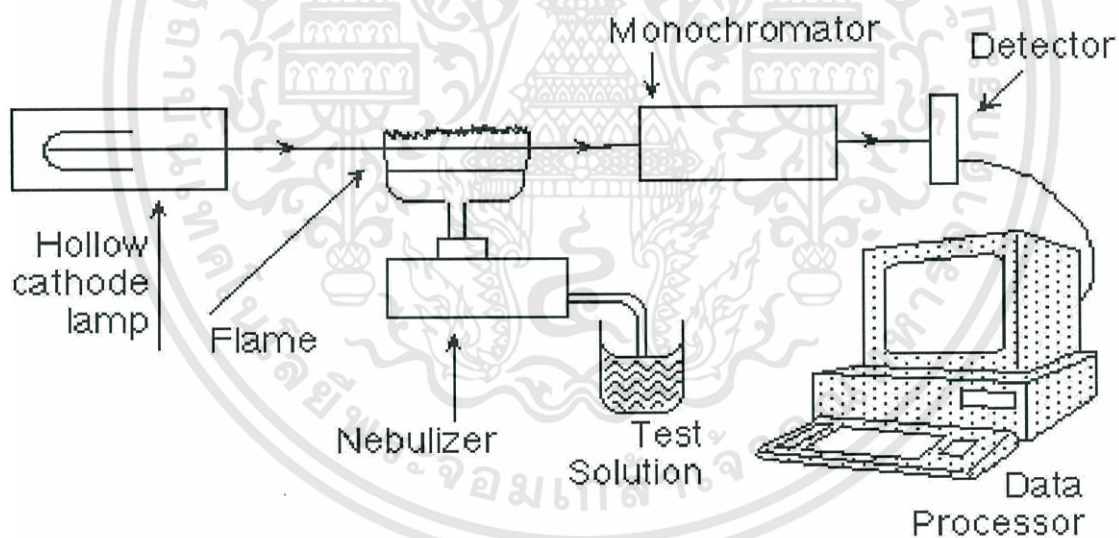
ข. ส่วนที่ทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมอิสระ (atomizer) มีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ เนบิวไลเซอร์ (nebulizer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้สารละลายเป็นสภาพเป็นละอองเล็กๆ พวกที่มี ขนาดเล็กพอที่จะผสมกับตัวเชื้อเพลิง และตัวออกซิไดซ์เคลื่อนที่เข้าสู่

ส่วนที่ 2 เรียกว่า หัวเตาซึ่งจะเกิดการเผาไหม้ทำให้เกิดอะตอมขึ้นในเปลวไฟ ระบบเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดซ์ที่นิยมใช้กันในงานอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันแบบเปลวไฟมี 3 วิธี คืออากาศ/อะเซทิลีน (air/acetylene) จะให้อุณหภูมิประมาณ 2,300°C เหมาะสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณของโลหะ เช่น Cu, Mg, Fe อากาศ/โพรเพน (air/C₃H₆) ให้อุณหภูมิประมาณ 1,900 °C เหมาะสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณของอัลคาไลน์ ไนโตรเจนออกไซด์/อะเซทิลีน(N₂O/acetylene) ให้อุณหภูมิประมาณ 2,955 °C เหมาะสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะที่อาจเกิดสารประกอบที่สลายตัวด้วยความร้อนต่ำได้ยาก เช่น Al, Si และ Ca

ค. โมโนโครมาเตอร์ (monochromator) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ เครื่องตัดลำแสง (chopper) มีลักษณะคล้ายใบพัดหมุน ซึ่งจะ ทำให้ลำแสงที่ส่องผ่านเดินทางเป็นช่วงๆ ซิงโครไนเซอร์ (synchronizer) คือตัวที่ทำให้เครื่องขยายสัญญาณปรับตัวให้พอเหมาะกับอัตราการหมุนของเครื่องตัดลำแสง เพื่อทำการขยายสัญญาณเป็นช่วงๆ นั้น

ง. เครื่องตรวจจับ (detector) เป็นเครื่องวัดความเข้มของแสง โดยทำหน้าที่วัดผลที่ได้ ที่นิยมใช้ ได้แก่ photomultiplier tube

5. เครื่องอ่านสัญญาณ (read out) เป็นเครื่องอ่านค่าการดูดกลืนแสงโดยตรง ประกอบด้วยเครื่องขยายสัญญาณและเครื่องบันทึกสัญญาณหรืออาจจะเป็นระบบอ่านสัญญาณอื่นๆ เช่น คอมพิวเตอร์



ภาพที่ 2.19 แสดงแผนภาพองค์ประกอบของเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer [23]

3) ส่วนที่ทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมเสรี (The Atomization Process หรือ Atomizer) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS นั้น จะประสบความสำเร็จมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณของอะตอมเสรีของธาตุที่ทำให้เกิดขึ้น เพราะอะตอมเสรีเป็นตัวดูดกลืนแสงที่จะทำการวัดโดยเลือกใช้ความยาวคลื่นของแสงที่เหมาะสมผ่านเข้าไป ดังนั้น ความสำคัญจึงอยู่ที่การทำให้ธาตุที่มีอยู่ในสารละลายตัวอย่างแตกตัวเป็นอะตอมเสรีที่สถานะพื้นได้มากๆ วิธีที่นิยมใช้กันคือกระบวนการทำให้แตกตัวเป็นอะตอมเสรีด้วยเปลวไฟ (Flame Atomization) ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระในเปลวไฟ สารตัวอย่างที่ใช้ในกระบวนการนี้จะต้องเป็นสารเนื้อเดียว ไม่มีสารแขวนลอยอยู่ ส่วนตัวทำละลายจะเป็นน้ำหรือ สารอินทรีย์ก็ได้ กระบวนการนี้แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ

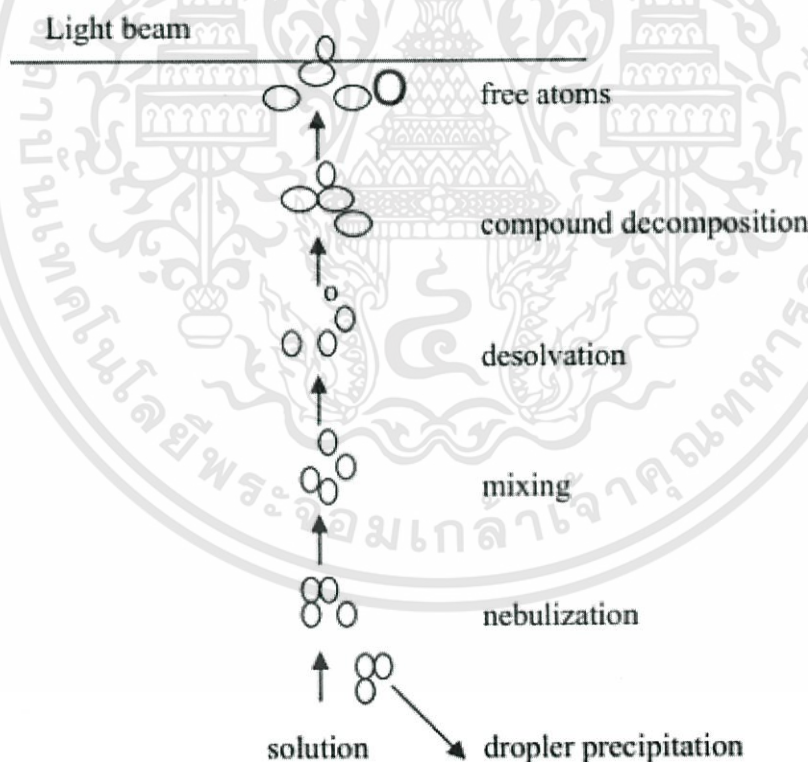
ก. nebulization เป็นกระบวนการที่ทำให้สารแตกตัวเป็นละอองเล็กๆ ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า nebulizer

ข. droplet precipitation เป็นกระบวนการที่ละอองของสารละลายรวมกันเป็นหยดสารละลายขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถแขวนลอยอยู่ในอากาศได้จึงตกลงมาแล้วออกไปทางท่อน้ำทิ้ง

ค. mixing เป็นกระบวนการที่ละอองเล็กของสารละลายผสมกับเชื้อเพลิงและออกซิแดนทีในสเปร์รี่แชมเบอร์ (chamber) ของ nebulizer

ง. desolvation เป็นกระบวนการที่ตัวทำละลายที่อยู่ในละอองเล็กๆถูกกำจัดออกไปทำให้เกิดเป็นอนุภาคเล็กๆของสารประกอบกระบวนการนี้เกิดขึ้นที่ตอนล่างของเปลวไฟ

จ. compound decomposition เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่เปลวไฟ โดยที่พลังงาน ความร้อนจากเปลวไฟจะทำให้สารประกอบกลายเป็นออกไซด์ ซึ่งเป็นโมเลกุลและเป็นอะตอม อิสระ บางครั้งอาจเกิดการกระตุ้นหรืออาจเกิดออกซิเดชันต่อไปได้



ภาพที่ 2.20 แสดง Flame Atomization process [23]

4) ขั้นตอนของการทำวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่จะใช้เทคนิค AAS มีขั้นตอนในการเตรียมความพร้อมดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. เตรียมสารตัวอย่างให้อยู่ในรูปสารละลายที่เหมาะสมและพร้อมที่จะใช้กับเครื่อง AAS

ข. พิจารณาว่าจะทำการวิเคราะห์เพื่อหาอะไร และเลือกวิธีการที่เหมาะสมทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์

ค. จัดเครื่องมือให้พร้อมที่จะทำงานได้ เช่น คอมพิวเตอร์ ไมโครโพรเซสเซอร์ ควบคุม มี software ที่เก็บข้อมูลของธาตุแต่ละชนิดไว้แล้วเป็นเสมือน cook book ให้ผู้วิเคราะห์สามารถเลือกให้ได้ซึ่งมี

- เลือก HCL ของธาตุที่จะทำการวิเคราะห์ใส่เข้าไปในเครื่อง และเลือกกระแสไฟฟ้าที่ต้องใช้
 - จัดเครื่องให้มีสภาพที่เหมาะสมกับเทคนิคที่ใช้เช่น ใช้ Flame หรือ flameless atomization การปรับอัตราการไหลของออกซิเจนที่อากาศและเชื้อเพลิง เป็นต้น
 - จัดความกว้างของช่องแสงขาออกจากโมโนโครเมเตอร์ (slit -width) ให้เหมาะสม
- ง. เลือกโปรแกรมการวัดผล การคำนวณ ตลอดจนการรายงานผลวิเคราะห์

2.8.2 การทำคุณภาพวิเคราะห์ด้วย AAS (Qualitative Analysis)

โดยทั่วไปแล้วเทคนิค AAS นั้นไม่เหมาะสมที่จะใช้สำหรับทำคุณภาพวิเคราะห์ เพราะเสียเวลาไม่สะดวก เนื่องจากต้องเปลี่ยน HCL และต้อง scan ความยาวคลื่น ประกอบกับค่าใช้จ่ายสูงจึงไม่นิยมใช้สำหรับตรวจหา อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้ก็สามารถใช้ได้เช่น ต้องการตรวจสอบว่าสารละลายตัวอย่างมี Pb เป็นองค์ประกอบหรือไม่เราก็ใช้ HCL เป็น Pb และใช้ Flame (air/C₂H₂) เป็น atomizer ใช้ความยาวคลื่นของธาตุ Pb คือ 217 nm สำหรับตรวจวัด หลังจากนำสารละลายตัวอย่างพ่นเข้าไปในเปลวไฟแล้วดูว่าที่ความยาวคลื่น 217 nm มีการดูดกลืนแสงหรือไม่ถ้ามีแสดงว่าสารตัวอย่างมีธาตุ Pb แต่ถ้าไม่มีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นนี้แสดงว่าสารตัวอย่างไม่มี Pb ดังนั้นถ้าต้องการตรวจหาธาตุใดก็สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน

2.8.3 การทำปริมาณวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS (Quantitative Analysis) สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

1) Calibration Method ใช้ในกรณีที่สารตัวอย่างไม่ค่อยมีสิ่งรบกวนและสาร ตัวอย่างเจือจาง ทำการวิเคราะห์ได้โดยเทียบกับสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนแล้ว เป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไปโดยปรับสัญญาณที่ได้จาก blank ให้เป็นศูนย์แล้วจึงวัดค่าแอมพลิจูดของสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน (4-5 ความเข้มข้น) เมื่อใช้ flameless atomization technique อาจใช้วัด peak area หรือความสูงของพีค (peak height) แล้วนำผลมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย จะได้ calibration curve ซึ่งอาจเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งก็ได้การเขียนกราฟอาจใช้เครื่องคอมพิวเตอร์หรือเครื่องคำนวณทำงานให้ถ้าเป็นเส้นตรง least squares fit แต่ถ้าเป็นเส้นโค้ง อาจให้เครื่องลากเส้นโค้งให้ได้ calibration curve ใช้ได้เฉพาะการวิเคราะห์แต่ละครั้งเท่านั้น เพราะ parameter ต่างๆ ที่ใช้อาจเปลี่ยนแปลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ใช้ Factor Method วิธีนี้ใช้ได้เมื่อ calibration curve เป็นเส้นตรง โดยนำสารละลายมา 2 ส่วนเท่าๆ กัน (X และ Y) และมีปริมาตร Vz นำส่วน X มาเติมสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นเป็น Cs ลงไปปริมาตร Vs สำหรับส่วน Y นำมาเติมสารละลาย(อาจเป็นน้ำหรือกรด) ลงไปในปริมาตร Vs แล้วนำสารละลายทั้ง 2 ส่วนไปวัดค่าแอมป์แอมป์แบนซ์ได้เป็น Ax และ Ay ตามลำดับ ถ้าให้ความเข้มข้นสารละลายเป็น Cu จะคำนวณหาความเข้มข้นได้จากสมการ
$$Cu = Ay Vs Cs / (Ax - Ay) Vz$$
 สมการที่ 2.12 วิธีนี้ต้องควบคุมสภาวะต่างๆ ดังนี้

- ก. Calibration curve จะต้องเป็นเส้นตรง
- ข. ค่าแอมป์แอมป์แบนซ์ที่วัดได้ คือ ควรจะต้องเป็นประมาณ 2 เท่าของ A
- ค. Vs ควรน้อยกว่า Vz มากๆ เพื่อไม่ให้เกิดการเจือจางของสารละลายตัวอย่างมากเกินไปเนื่องจากการเติมสารมาตรฐาน
- ง. ความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Cs ควรมากกว่าความเข้มข้นของสารตัวอย่าง Cu มากๆ

3) ใช้ Standard Addition Method เป็นวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับ matrix effects และinterferences เพราะว่า calibration curve ในการวิเคราะห์สารนั้น สัญญาณที่วัดได้ไม่ใช่เป็นแต่เพียงสารที่ทำกรวิเคราะห์เท่านั้น แต่มันรวมถึงสัญญาณต่างๆ จากสารอื่นที่มีอยู่ในตัวอย่างด้วย ทำได้โดยแบ่งสารละลายตัวอย่างออกเป็น 4-5 ส่วน นำแต่ละส่วนมาเติมสารมาตรฐานที่มีความเข้มข้นเท่ากัน แล้วนำไปวัดค่าแอมป์แอมป์แบนซ์แล้วนำมาเขียนกราฟกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมลงไป ด้วย least-squarefit ความเข้มข้นของสารตัวอย่างหาได้จากการ extrapolating ไปตัดแกนความเข้มข้น

4) ใช้วิธีทำให้เจือจาง Dilution Method วิธีนี้ใช้กับสารตัวอย่างที่มี interferences โดยเฉพาะกรณีที่เกิด enhancement คือค่าแอมป์แอมป์แบนซ์จะวัดได้มากกว่า ปกติ เนื่องจากเกิดไอออนเซชัน ทำได้โดยการเติมสารละลายที่ประกอบด้วยธาตุที่ไอออนได้ง่ายๆ ลงไปในสารละลายตัวอย่างและสารละลายมาตรฐาน

5) ใช้วิธี Internal Standard Method วิธีนี้อาศัยหลักการเติมสารมาตรฐาน (reference element) ซึ่งเป็นคนละธาตุกับสารที่จะวิเคราะห์ลงไปในตัวอย่าง และ blank หลังจากวัดค่าแอมป์แอมป์แบนซ์แล้วหาอัตราส่วนของแอมป์แอมป์แบนซ์ระหว่างสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน (A /A)จากนั้นเขียนกราฟกับความเข้มข้นของธาตุที่จะทำการวิเคราะห์จะได้ calibration curve เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างสำหรับวิธีนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ

- ก. สารตัวอย่างต้องไม่มีธาตุที่ใช้เป็นมาตรฐาน (reference element)
- ข. ทั้งสารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะต้องมีลักษณะและคุณสมบัติทางเคมีเหมือนกัน

2.8.4 ผลกระทบของสิ่งรบกวนต่อการวิเคราะห์ (Interference Effects)

ถึงแม้ว่าเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างเฉพาะมาก ทั้งแหล่งกำเนิดและการดูดกลืนแสง แต่ก็มีโอกาสที่สเปกตรัมของธาตุอื่นที่ปนอยู่มารบกวนได้ทำให้ค่า absorbance วัดได้มากหรือน้อยกว่าปกติสิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลวิเคราะห์ผิดพลาดได้ดังนั้นผู้วิเคราะห์ควรศึกษาก่อนว่าสารตัวอย่างเป็นอะไร จะละลายด้วยอะไร มีองค์ประกอบอะไรบ้าง และจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิค

อะไร สิ่งเหล่านี้จะช่วยทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาดน้อยที่สุด สิ่งรบกวนสามารถจำแนกได้ดังนี้

1) Physical effects เป็นผลเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของสารละลายที่จะวิเคราะห์ซึ่งไปเกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของสารละลายเข้าไปใน nebulizer ขนาดของหยดสารละลาย (drop size) ได้แก่ volatility ของตัวสารละลาย surface tension, viscosity ซึ่งสามารถแก้ไขได้คือทำให้สารละลายเจือจางลง หรือเติม organic solvents หรือเตรียมสารละลายให้มี matrix อย่างเดียวกับสารตัวอย่าง

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

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Osman San และคณะ(2009) [26] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงไดอะตอมไมต์ให้บริสุทธิ์ด้วยกรด (5M HCl) เพื่อนำไดอะตอมไมต์ไปใช้ในการผลิตเซรามิก โดยการนำ 10 กรัมของไดอะตอมไมต์มารีฟลักซ์กับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 5 M ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 75 °C ปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง 500 รอบ/นาที จากการศึกษาพบว่าเมื่อนำตัวอย่างไดอะตอมไมต์ไปปรับปรุงด้วยกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมงจะทำให้ได้พื้นที่ผิวของดินเบาสูงที่สุดคือเพิ่มขึ้นจาก 189 m²/g เป็น 222 m²/g แต่ให้ซิลิกาต่ำ คือ 78.66 wt%SiO₂ (คุณภาพที่เหมาะสมในการผลิตเซรามิกที่มีรูพรุนควรมีซิลิกามากกว่า 95 wt%SiO₂) และที่เวลา 240 ชั่วโมงจะทำให้ได้ดินเบาที่บริสุทธิ์สูงโดยมีซิลิกาสูงสุด คือ 98.1 wt%SiO₂เหมาะสำหรับใช้ผลิตเซรามิก

Zhang Jian และคณะ(2013) [27] ได้ทำการศึกษาจลศาสตร์และสมมูลของการดูดซับเมทิลลิโนบลู(MB)ด้วยไดอะตอมไมต์ที่ทำให้บริสุทธิ์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยการเตรียมไดอะตอมไมต์เริ่มจากนำไดอะตอมไมต์ไปแช่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5% ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนในดินเบา หลังจากนั้นนำมากรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนและทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 °C จากนั้นไดอะตอมไมต์ที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงและไดอะตอมไมต์ที่ได้รับการปรับปรุงแล้วไปดูดซับเมทิลลิโนบลู พบว่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล(Q_e)เพิ่มขึ้นจาก 1.72mg/g เป็น 18.1 mg/g , ประสิทธิภาพ(R)ในการกำจัดเมทิลลิโนบลูเพิ่มขึ้นจาก 8.6% เป็น 90.75% ที่ความเข้มข้น100 ppm และพื้นที่ผิวเมทิลลิโนบลู เพิ่มขึ้นจาก 15.97 m²/g เป็น 31.35 m²/g (วิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET) จากการศึกษาจลศาสตร์การดูดซับพบว่าสอดคล้องกับ pseudo-second-order และกระบวนการดูดซับถูกควบคุมด้วยการดูดซับเชิงเคมี จากการศึกษาไอโซเทอมพบว่าแลงเมียร์(Langmuri)ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์(R²)เข้าใกล้ 1 จึงบอกได้ว่ากลไกการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว(Monolayer) และบอกถึงความสามารถในการดูดซับเมทิลลิโนบลูที่สมดุล คือ 27.86 mg/g เมื่อใช้ดินเบาบริสุทธิ์เป็นตัวดูดซับ และจากการศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับพบว่ากระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการดูดความร้อนและเกิดขึ้นเอง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าไดอะตอมไมต์ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสำหรับการดูดซับเมทิลลิโนบลู

Myoung-Eun Lee และคณะ(2015) [28] ได้ทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนักจำพวก Pb^{2+} และ Cu^{2+} ที่มีอยู่ในน้ำเสียโดยใช้ตัวดูดซับเป็น ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์ (Mn_3O_4 -AC) โดยการเตรียม Mn_3O_4 -AC จะเริ่มจากนำ AC 1 กรัม , manganese(III)acetylacetonate 3.2 กรัม และ methy alcohol 46 ml ผสมลงใน bomb โดยทำที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต(Supercritical) ที่ อุณหภูมิ 280 °C ความดัน 13 mPa เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจากนั้นนำมากรองตะกอนและล้างตะกอนด้วยเอทานอลและน้ำกลั่น หลังจากนั้นทำการศึกษา Adsorption kinetic พบว่าสอดคล้องกับ pseudo-second-order มากกว่า pseudo-first-order เพราะให้ค่าความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกับการทดลอง และจากการศึกษา Adsorption isotherm พบว่าแลงเมียร์(Langmuri)ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์(R^2) เข้าใกล้ 1 จึงบอกได้ว่ากลไกการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว(Monolayer) และบอกถึงความสามารถสูงสุดในการดูดซับ $Pb(II)$, $Cu(II)$ ในน้ำเสีย เมื่อใช้ AC เป็นตัวดูดซับ คือ 27.17 mg/g 6.09 mg/g ตามลำดับ และเมื่อใช้ Mn_3O_4 /AC เป็นตัวดูดซับ คือ 59.52 mg/g , 37.04 mg/g ตามลำดับ ดังนั้นจึงบอกได้ว่าความสามารถในการดูดซับ $Pb(II)$ และ $Cu(II)$ ในน้ำเสียจะเพิ่มขึ้น 2.2 และ 6.1 เท่าตามลำดับ เมื่อเติม Mn_3O_4 ลงบน AC เนื่องจาก Mn_3O_4 จะไปช่วยลดความต้านทานของการแพร่ภายในอนุภาคและทำให้พื้นผิวของ AC มีประจุลบมากขึ้นจึงเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction) กับโลหะหนักเพิ่มมากขึ้นด้วย

Z. Al-Qodah และคณะ(2007) [29] ได้ทำการศึกษาการดูดซับเมทิลลินบลู(MB)ด้วยไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก(H_2SO_4)และความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลลินบลู โดยการปรับปรุงไดอะตอมไมต์เริ่มจากนำ 30 กรัมของดินเบาไปแช่ในกรดซัลฟิวริกที่สภาวะอุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปกรองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นและเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากการศึกษาจลศาสตร์การดูดซับพบว่าสอดคล้องกับ pseudo-second-order เนื่องจากให้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล(Q_e)ใกล้เคียงกับการทดลอง จากการศึกษาไอโซเทอมพบว่าแลงเมียร์ (Langmuri)ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์(R^2)เข้าใกล้ 1 จึงกล่าวได้ว่ากลไกการดูดซับเมทิลลินบลูด้วยไดอะตอมไมต์เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer) ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลลินบลูที่สมดุล คือ 100 ,66 และ 48 mg/g เมื่อใช้ไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรด,ปรับปรุงด้วยความร้อน และไดอะตอมไมต์ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงเป็นตัวดูดซับตามลำดับ และความสามารถสูงสุดในการดูดซับเมทิลลินบลูด้วยไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดคือ 126.6 ,128.2 และ129.9 mg/g ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ50 °Cตามลำดับ และจากการศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับจะให้ค่าเอนทัลปีมาตรฐานเป็นบวก เอนโทรปีมาตรฐานเป็นบวกและพลังอิสระมาตรฐานเป็นลบ จึงกล่าวได้ว่าการดูดซับเมทิลลินบลูด้วยไดอะตอมไมต์ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยกรดเป็นกระบวนการดูดความร้อน(endothermic)และเกิดขึ้นเองได้

A.Chaisena และ K. Rangsiwatananon (2004) [30] ศึกษาผลของการปรับปรุงไดอะตอมไมต์ด้วยความร้อนและกรด โดยกรดที่ใช้ในการทดลองนี้มี 3 ชนิด ชนิดละ 6 M ได้แก่กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) , กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดไนตริก (HNO_3) ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100 °C เป็นอุณหภูมิรีฟลักซ์ (reflux) จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา(Calcined)ไดอะตอมไมต์ที่ 900, 1,000 และ 1,100 °C ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของ Si/Al เพียงเล็กน้อยโดยที่อุณหภูมิสูงๆจะให้สัดส่วนของ Si/Al มากที่สุด แต่จะส่งผลต่อพื้นผิวของไดอะตอมไมต์ที่อุณหภูมิ 1,100 °C ทำให้พื้นผิวของไดอะตอมไมต์เรียบขึ้น และผลของการปรับปรุงด้วยกรดทั้ง 3 ชนิดพบว่ากรดซัลฟิวริก 6 M ที่อุณหภูมิรีฟลักซ์ 100 °C จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C ให้สัดส่วนของ Si/Al มากที่สุดและเหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวรองรับสำหรับคะตะลิสต์ (Catalyst supporter) และตัวดูดซับ (Absorbent) เนื่องจากมีซิลิกาที่โครงสร้างอสัณฐานสูงและมีสิ่งเจือปนต่ำ

Wenbin Yu และคณะ (2015) [31] ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเบนซีนระหว่างตัวดูดซับ ไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยกรด (2M HCl) [Diatomite] กับปฏิกิริยา Silylation ไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยกรด (2M HCl) โดยใช้หมู่ฟังก์ชัน Phenyltriethoxysilane [PTES-Diatomite] แล้วทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD, N_2 adsorption-desorption, DRIFT, NMR และ XPS ผลจากการตรวจสอบพบว่า Diatomite มีการจัดเรียงตัวโครงสร้างแบบอสัณฐาน มีรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ เมื่อทำการศึกษาการดูดซับไนโตรเจนพบว่าเมื่อเรานำ Diatomite มาทำปฏิกิริยา Silylation ทำให้ตัวดูดซับมีรูพรุนขนาดกลางลดลง มีรูพรุนขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นและทำให้พื้นที่ผิวกับปริมาตรของตัวดูดซับลดลง ผลจากเทคนิค NMR แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของ silanol [Si-OH] ใน Diatomite มีมากกว่า PTES-Diatomite เมื่อนำ Diatomite และ PTES-Diatomite มาทำการดูดซับเบนซีน พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวและ PTES-Diatomite มีประสิทธิภาพการดูดซับเบนซีนได้ดีกว่าและเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากมีหมู่ Phenyl บนพื้นผิวซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการดูดซับ

Mohammad Irani และคณะ(2011) [32] ได้ทำการศึกษาการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเพอร์ไลต์, โดโลไมต์ และ ไดอะตอมไมต์ ที่มาจากแหล่งธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ โดยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองคือที่ pH=6 จากการศึกษากลศาสตร์การดูดซับพบว่าสอดคล้องกับ Double-exponential และจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับพบว่า การดูดซับตะกั่วด้วยเพอร์ไลต์และโดโลไมต์เป็นตัวดูดซับสอดคล้องกับแลงเมียร์(Langmuri)เพราะให้ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์(R^2)เข้าใกล้ 1 และการดูดซับตะกั่วด้วยไดอะตอมไมต์เป็นตัวดูดซับสอดคล้องกับฟรุนดลิช(Freundlich)เพราะให้ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์(R^2)เข้าใกล้ 1 จึงบอกได้ว่ากลไกการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว(Monolayer) และจากการศึกษาอุณหภูมิศาสตร์การดูดซับพบว่ากระบวนการดูดซับตะกั่วด้วยเพอร์ไลต์เป็นกระบวนการคายความร้อนและเกิดขึ้นเอง กระบวนการดูดซับตะกั่วด้วยโดโลไมต์ และไดอะตอมไมต์เป็นกระบวนการดูดความร้อนและเกิดขึ้นเอง และจากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ไดอะตอมไมต์เป็นตัวดูดซับจะให้ค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ รองลงมาคือโดโลไมต์ และเพอร์ไลต์ตามลำดับ และพื้นที่ผิวของไดอะตอมไมต์, โดโลไมต์ และเพอร์ไลต์ คือ $4.11 \text{ m}^2/\text{g}$, $2.71 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $1.92 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ(วิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเมื่อใช้ไดอะตอมไมต์เป็นตัวดูดซับจะให้ค่าประสิทธิภาพสำหรับการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไดอะตอมไมต์ (diatomite) โดยไดอะตอมไมต์ที่เลือกใช้เป็นเกรดการค้า โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงโดยการนำไปรีฟลักซ์(reflux)ด้วยกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4 : Sulfuric acid) เปรียบเทียบกับไดอะตอมไมต์ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์เป็นอย่างไร

เมื่อปรับปรุงไดอะตอมไมต์ด้วยกรดซัลฟิวริกแล้ว ไดอะตอมไมต์ชนิดที่มาจากแหล่งธรรมชาติและไดอะตอมไมต์ชนิดที่ได้รับการปรับปรุงจะถูกนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์ทางกายภาพและเคมีด้วยเทคนิคต่างๆดังนี้ วิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD), ตรวจสอบทางองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ภายในไดอะตอมไมต์ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence, XRF), ตรวจสอบลักษณะของรูพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM), ตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของไดอะตอมไมต์ที่ได้รับการปรับปรุงแล้วและยังไม่ได้ปรับปรุงด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)) และเครื่องมือวิเคราะห์พื้นที่ผิวขนาดรูพรุนและปริมาตรของรูพรุนของตัวดูดซับโดยใช้วิธีบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller Method, BET)

หลังจากตรวจสอบเอกลักษณ์ของไดอะตอมไมต์แล้ว นำไดอะตอมไมต์ทั้งสองชนิดมาทดสอบการดูดซับ(Adsorption)สารโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์ และทำการวิเคราะห์ปริมาณสารโลหะหนักที่ถูกดูดซับด้วยไดอะตอมไมต์ทั้งสองชนิดโดยใช้เครื่องมืออะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS)

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.1.1 ชุดเครื่องแก้ว
- 3.1.2 ชุดรีฟลักซ์
- 3.1.3 ครุชีเบล (Crucible)
- 3.1.4 เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง Mettler Toledo , ME-204E
- 3.1.5 Hotplate stirrer Model HTS-1003
- 3.1.6 เครื่องกรองแบบลดความดัน (Ultrafiltration) MILLIPORE , WP6122050
- 3.1.7 กระดาษกรองเบอร์ 42 Whatman , Cat No.1442 090
- 3.1.8 เตาอบ (Oven) MEMMERT , Modell 100-800
- 3.1.9 เตาเผา (Furnace) Nabertherm
- 3.1.10 ขวดปรับปริมาตร 100 ml , 250 ml และ 500 ml
- 3.1.11 เครื่องเขย่าแบบตั้งโต๊ะ รุ่น Gallenkamp บริษัท Thai polymedic ประเทศอังกฤษ

3.2 สารเคมี

- 3.2.1 ไดอะตอมไมต์บริสุทธิ์ บริษัทสหชัยเคมีคอล อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.2 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความบริสุทธิ์ 98.0% บริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 3.2.3 สารละลายเลด (II)ไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) เข้มข้น 1000 ppm
- 3.2.4 สารละลายแคดเมียม (II) ไนเตรต ($Cd(NO_3)_2$) เข้มข้น 1000 ppm
- 3.2.5 น้ำกลั่น
- 3.2.6 น้ำปราศจากไอออน (deionized water)
- 3.2.7 พาราฟินออย (paraffin oil)

3.3 เครื่องมือในการตรวจสอบเอกลักษณ์

- 3.3.1 เครื่องวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)
- 3.3.2 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคการวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบ (X-ray Fluorescence, XRF)
- 3.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
- 3.3.4 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวขนาดรูพรุนและปริมาตรของรูพรุนของตัวดูดซับโดยใช้วิธีบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller Method, BET)
- 3.3.5 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS)

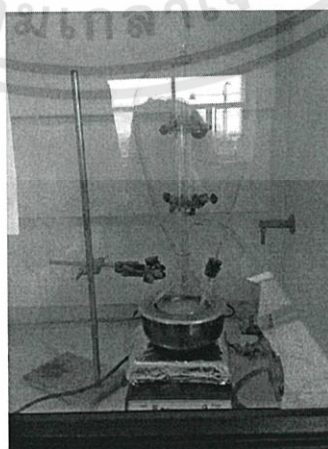
3.4 วิธีการปรับปรุงไดอะตอมไมต์

3.4.1 การเตรียมไดอะตอมไมต์

- 1) ชั่งไดอะตอมไมต์บริสุทธิ์ 30 กรัมจำนวน 2 ชุด บรรจุลงในครุชีเบล
- 2) นำไดอะตอมไมต์ที่บรรจุอยู่ในครุชีเบลไปเผา (Calcine) ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.4.2 การปรับปรุงไดอะตอมไมต์ด้วยกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)

- 1) จัดเตรียมชุดรีฟลักซ์ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 การจัดเตรียมชุดรีฟลักซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) นำไดอะตอมไมต์ 30 กรัม ที่ผ่านการเผา (Calcine) ใส่ลงในขวดก้นกลม จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 6 M ด้วยอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1g : 10ml เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนและโลหะออกไซด์บางตัว เช่น Al_2O_3, Na_2O, Fe_2O_3 เป็นต้น

3) นำไปรีฟลักซ์ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4) นำไปกรองแบบลดความดันด้วยเครื่องกรองลดความดัน และล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิห้อง 10 ครั้ง

5) นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

6) นำตะกอนที่ได้จากการอบไปเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

7) นำไดอะตอมไมต์ที่ได้ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ผลผลิต

3.4.3 วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb)

1) เตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb) ที่ความเข้มข้น 1,2,3,4,5,6 และ 7 ppm ปริมาตร 50 ml โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานตะกั่วเข้มข้น 1,000 ppm จำนวน 10 ml ถ่ายลงในขวดปรับปริมาตร 100 ml จากนั้นทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้ได้สารละลายมาตรฐานตะกั่วที่มีความเข้มข้น 100 ppm จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งโดย ปิเปตสารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 5,10,15,20,25,30 และ 35 ml ถ่ายลงในขวดปรับปริมาตร 500 ml แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3.4.4 การดูดซับของตะกั่วบนไดอะตอมไมต์

1) เตรียมสารละลายตะกั่วที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1,2,3,4 และ 5 ppm ปริมาตร 50 ml โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานตะกั่วเข้มข้น 100 ppm มา 5,10,15,20 และ 25 ml ถ่ายลงในขวดปรับปริมาตร 500 ml ทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จากนั้น ปิเปตสารละลายตะกั่วที่ปรับความเข้มข้นเรียบร้อยแล้วถ่ายลงขวดรูปชมพู่ปริมาตร 250 ml

2) ชั่งไดอะตอมไมต์ชนิดที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว และชนิดที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง 5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุสารละลายตะกั่วทั้ง 5 ความเข้มข้น

3) นำขวดรูปชมพู่ที่ใส่ไดอะตอมไมต์ที่ได้รับการปรับปรุงแล้วและยังไม่ได้การปรับปรุงไปเขย่าบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 45 นาทีด้วยความถี่ 180 rpm

4) นำสารละลายในขวดรูปชมพู่มากรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดันเพื่อแยกเอาผงไดอะตอมไมต์ออก

5) นำสารละลายที่กรองเสร็จแล้วไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ซึ่งทำการวัดตะกั่วที่ความยาวคลื่น 217 นาโนเมตร

3.5 การตรวจสอบเอกลักษณ์ (Characterization)

3.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอัญฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาลักษณะโครงสร้างหรือความเป็นผลึกของไดอะตอมไมต์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของ ตัวอย่างที่มุมต่าง ๆ กัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อ ระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่างโดยใช้ Cu K α เป็น X-Ray Source การหาขนาด ผลึกของไดอะตอมไมต์สามารถคำนวณได้จากค่าความสูงกึ่งกลาง (Full Width of Half Maximum, FWHM)

$$\text{Crystalline Size (nm)} = \frac{K\lambda}{\beta_{1/2} \cos\theta_B} \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

เมื่อ	K	คือ Unit Cell Geometry dependent constant
	λ	คือ ความยาวคลื่นของ X-ray
	$\beta_{1/2}$	คือ ค่าความสูงกึ่งกลางของพีค
	θ_B	คือ Bragg angle

การเตรียมสารตัวอย่าง

- 1) ชั่งไดอะตอมไมต์ 2 กรัม (หากตัวอย่างมีน้อย สามารถอัดบนแผ่นวางตัวอย่างแบบ zero background ได้)
- 2) นำมาอัดด้วยแรงกระทำสม่ำเสมอเท่ากันทุกทิศทางโดยบริเวณผิวหน้าของตัวอย่างต้องเรียบสม่ำเสมอ ตัวอย่างที่ดีต้องมีการจัดเรียงตัวของผลึกอย่างอิสระ (random orientation) หากตัวอย่างเป็นก้อน ต้องตัดและขัดหน้าตัวอย่างให้เรียบ ขนาดก้อนตัวอย่างประมาณ 10 x 10 เซนติเมตร
- 3) นำสารตัวอย่างเข้าเครื่อง X-ray Diffractometer เพื่อตรวจสอบเอกลักษณ์

3.5.2 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสารด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น SRS 3400 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยอาศัยการวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence) ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณของสารตัวอย่างที่ใช้คือ 0.005 กรัม และใช้กรดบอริก (Boric acid) เป็น binder

การเตรียมสารตัวอย่าง (ชนิดอัดเม็ด)

- 1) ชั่งสาร Boric Acid (H_3BO_3) และไดอะตอมไมต์ด้วยอัตราส่วน 3 : 1
- 2) เทสารที่ชั่งได้ลงในครกอะเกต
- 3) เติมสารละลาย Acetone
- 4) บดสารให้เข้ากัน จนมีลักษณะเป็นผงละเอียด
- 5) เหมงที่ได้ลงในเบ้าสำหรับอัดสารตัวอย่าง แล้วนำเข้าเครื่องอัดไฮดรอลิก (ความดัน ประมาณ 10 torr เวลา ประมาณ 2 min)
- 6) เมื่อได้เม็ดสารตัวอย่างแล้วทำความสะอาดเม็ดสารด้วยสารละลาย Alcohol
- 7) ชั่งปริมาณเม็ดสารที่ได้ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล
- 8) นำสารตัวอย่างเข้าเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer เพื่อตรวจสอบเอกลักษณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว

BET เป็นวิธีศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน พื้นที่ผิวสัมผัสรู-พรุน โดยอาศัยเทคนิคการดูดซับก๊าซไนโตรเจน หรือ N₂ Adsorption โดยใช้ Quantachrome Instruments ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ 100 มิลลิกรัม ซึ่งจะถูกนำมาให้ความร้อนก่อนทดสอบ (Out Gas) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้การคำนวณด้วยวิธี BET (BET calculation method)

3.5.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) หลักการคือการใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องลงไปบนพื้นที่ผิวของตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ลำแสงอิเล็กตรอนนั้นจะทำให้เกิดอันตรกิริยากับตัวอย่างทำให้มีอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวของตัวอย่าง ซึ่งอิเล็กตรอนดังกล่าวจะถูกตรวจวัดและแสดงเป็นภาพลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง

การเตรียมสารตัวอย่าง

1) เนื่องจากไดอะตอมไมต์มีลักษณะที่เป็นผงจึงสามารถนำไปติดบน stub ได้เลย โดยพยายามติดให้อนุภาคเรียงตัวในลักษณะชั้นเดียวไม่เกาะกลุ่ม เพื่อให้การฉาบผิว ทำได้ทั่วถึง และไม่เกิดปัญหาการ Charge up

2) นำสารตัวอย่างที่เตรียมได้ตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

3.5.5 การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับโดยเทคนิคอะตอมมิกแอ็บซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

ศึกษาเพื่อหาปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับโดยไดอะตอมไมต์ที่ชนิดที่ถูกปรับปรุงแล้วและไดอะตอมไมต์ชนิดที่มาจากแหล่งธรรมชาติเพื่อหา Adsorption isotherm ของไดอะตอมไมต์ทั้งสองชนิดที่เตรียมขึ้น

$$\text{Adsorption capacity } (q_e) = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{M} \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

$$\text{Adsorption efficiency } (Q) = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

โดย C₀ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตัวอย่าง (mg/L)

C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายตัวอย่าง (mg/L)

M คือ ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (g)

V คือ ปริมาตรของสารละลายทั้งหมด (ml)

การเตรียมสารตัวอย่าง

1) นำสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb) ที่ความเข้มข้น 1,2,3,4,5,6 และ 7 ppm ปริมาตร 50 ml ที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic adsorption spectrophotometer เพื่อนำผลมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายจะได้ calibration curve

ของสารละลายตะกั่ว

2) นำสารละลายมาตรฐานแคดเมียม (Cd) ที่ความเข้มข้น 1,2,3,4,5,6 และ 7 ppm ปริมาตร 50 ml ที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic adsorption spectrophotometer เพื่อนำผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายจะได้ calibration curve ของ สารละลายแคดเมียม

3) นำสารละลาย ตะกั่ว และแคดเมียม หลังจากการดูดซับด้วยไดอะตอมไมต์ที่ ความเข้มข้น เริ่มต้น 1,2,3,4 และ 5 ppm มาตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียมที่ เหลือด้วย เครื่อง Atomic adsorption spectrophotometer

4) นำผลที่ได้คำนวณหา Adsorption isotherm การดูดซับของ ตะกั่วและแคดเมียม ดัง สมการที่ 3.2 และสมการที่ 3.3

3.5.6 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของไดอะตอมไมต์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy ,FT-IR)

เครื่องตรวจวัดสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบอินฟราเรด เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และพันธะเคมี ในโมเลกุลรวมถึงสามารถบอกปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด ในการตรวจสอบตัวอย่างจะนำตัวอย่างประมาณ 0.005 กรัม มาบดผสมกับ KBr ที่เป็น binder จากนั้นนำไปอัดให้เป็นแผ่นกลมบางเพื่อนำไปตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันต่อไป

การเตรียมสารตัวอย่าง

1. นำไดอะตอมไมต์ ประมาณ 0.005 กรัม มาบดผสมกับ KBr ที่เป็น binder
2. จากนั้นนำไปอัดให้เป็นแผ่นกลมบางด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก
3. นำสารตัวอย่างตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrophotometer

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติ และไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก เพื่อศึกษาคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับ ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ในส่วนแรก คือ ผลของตัวดูดซับที่ได้จากแหล่งธรรมชาติและจากการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก ส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณสมบัติของตัวดูดซับโดยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (FT-IR), การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD), ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับด้วยเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF), การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาเพื่อดูขนาดอนุภาคของตัวดูดซับด้วยเทคนิค (SEM), และการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับด้วยวิธี BET ส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ, ศึกษาผลของขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่มีต่อการดูดซับโลหะหนักและการวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับ โดยใช้สมการของ Langmuir และ Freundlich

4.1 ผลการปรับปรุงตัวดูดซับ

4.1.1 ผลการปรับปรุงไดอะตอมไมต์ด้วยกรดซัลฟิวริก(H_2SO_4)

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงไดอะตอมไมต์โดยใช้ไดอะตอมไมต์จากแหล่ง ธรรมชาติ ดั้งนั้นก่อนนำไดอะตอมไมต์มาใช้จำเป็นต้องปรับปรุงไดอะตอมไมต์ด้วยกรด ซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 6M ที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปเผาที่ อุณหภูมิ $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อกำจัดออกไซด์ของ โลหะบางชนิดออกไป ผลจากขั้นตอนของการ กำจัดโลหะออกไซด์ ทำให้น้ำหนักของไดอะตอมไมต์ที่ได้หลังจากการปรับปรุงน้อยกว่าไดอะตอมไมต์ก่อนทำการปรับปรุง ซึ่งคำนวณเป็นร้อยละของผลผลิตที่ได้ ประมาณ 91.40 ดัง แสดงในตารางที่ 4.1 โดยไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว พบว่าลักษณะ ของไดอะตอม- ไมต์สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่านั้นไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ยังมีลักษณะเป็น ผง ละเอียดสีขาวเหมือนกับไดอะตอมไมต์ก่อนทำการปรับปรุง ซึ่งจากงานวิจัยของอภีรักษ์และคณะ [30] มีการรายงานว่าหลังจากการเผาไดอะตอมไมต์ที่อุณหภูมิสูง ไดอะตอมไมต์ สามารถเปลี่ยนเป็นสีชมพู หรือสีเหลืองอ่อนหรือสีน้ำตาล เนื่องจากองค์ประกอบของเหล็กที่ อยู่ในไดอะตอมไมต์เปลี่ยนเป็นเหล็ก ออกไซด์ (Fe_2O_3) ส่วนไดอะตอมไมต์ที่เผาแล้วแต่ยังคง เป็นสีขาวนั้น เป็นไดอะตอมไมต์ที่มีคุณภาพดี เนื่องจากมีสิ่งเจือปนต่ำ

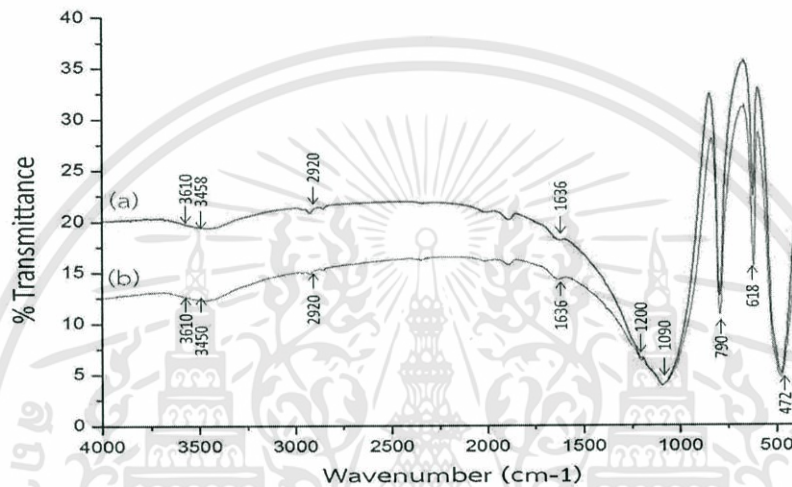
ตารางที่ 4.1 ร้อยละผลผลิตของไดอะตอมไมต์ หลังผ่านการปรับปรุงด้วยกรดและความร้อน

Sample	น้ำหนักสารก่อนปรับปรุง (g)	น้ำหนักสารหลังปรับปรุง (g)	% Yield
Diatomite	25.0010	22.8528	91.4000

4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณสมบัติของตัวดูดซับ

4.2.1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับจากแหล่งธรรมชาติและปรับปรุงด้วยกรดโดยการวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform infrared spectroscopy หรือ FT-IR)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ โดยการวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier-Transform Infrared spectroscopy หรือ FT-IR) ของตัวดูดซับ ในช่วงเลขคลื่น (Wave numbers) 4000 ถึง 400 cm^{-1} แสดงภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 สเปกตรัม FT-IR ของไดอะตอมไมต์ (a) จากแหล่งธรรมชาติ (b) ผ่านการปรับปรุงด้วยกรด

จากภาพที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบแถบการสั่นของไดอะตอมไมต์ ที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ และที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก ตามลำดับ พบแถบการสั่นของซิลานอล (silanol) ที่ปรากฏทั้งไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติและที่ปรับปรุงด้วยกรด โดยมีเลขคลื่น $\sim 3610 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นแถบการสั่นของพันธะ Si-O-H จะเห็นได้ว่าไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกจะมีพันธะนี้มากกว่าไดอะตอมไมต์ในธรรมชาติ และที่แถบการสั่น $\sim 3450-3458 \text{ cm}^{-1}$, $\sim 1636 \text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นโมเลกุลของน้ำอาจเนื่องมาจากมีความชื้นเกิดขึ้นและที่แถบการสั่น $\sim 2920 \text{ cm}^{-1}$ จะเป็นการสั่นของ C-H₃ ที่แถบการสั่น $\sim 1200 \text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของพันธะ Si-O, ที่แถบการสั่น $\sim 790 - 1090 \text{ cm}^{-1}$ เป็นแถบการสั่นของพันธะ Si-O-Si, ที่แถบการสั่นของพันธะ $\sim 618 \text{ cm}^{-1}$ เป็นแถบการสั่นของพันธะ O-Si-O และที่แถบการสั่น $\sim 472 \text{ cm}^{-1}$ จะเป็นการสั่นของพันธะ Si-O-Al [30] ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าไดอะตอมไมต์ที่ถูกปรับปรุงด้วยกรดไม่ได้ถูกกรดทำลายโครงสร้างทางเคมีเนื่องจากมีแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันเหมือนกับไดอะตอมไมต์ที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง

ซึ่งจากภาพที่ 4.1 สามารถอธิบายแถบการสั่นและการจำแนกรูปแบบการสั่นของไดอะตอมไมต์ได้ดังตารางที่ 4.2

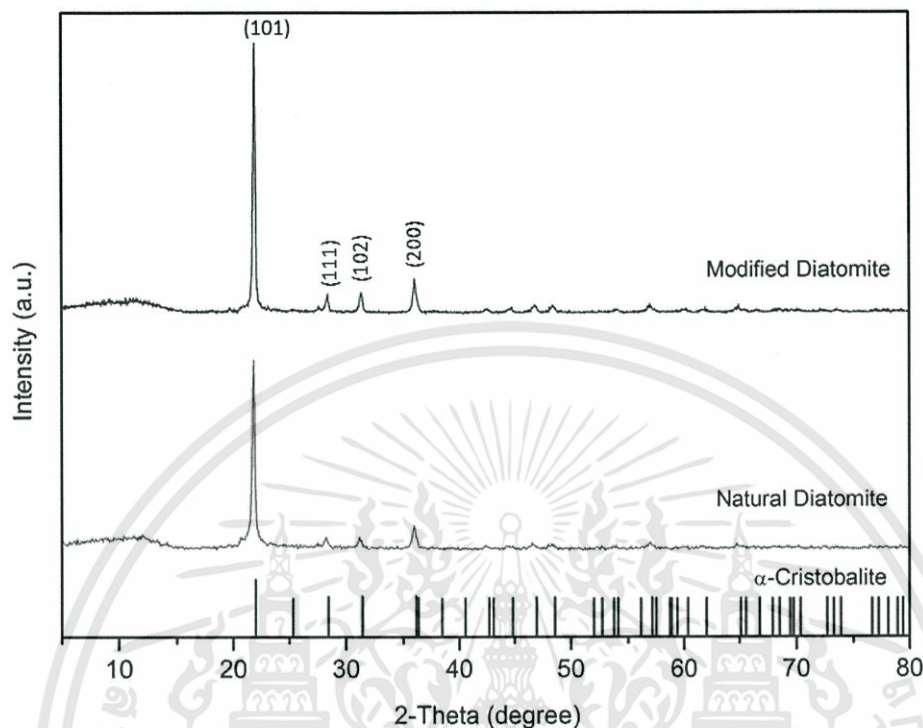
ตารางที่ 4.2 แถบการสั่นและการจำแนกรูปแบบการสั่นของไดอะตอมไมต์ ที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ และที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก

แถบการสั่น (cm^{-1})		Assignment
ไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติ	ไดอะตอมไมต์ปรับปรุงด้วยกรด	
3610	3610	การสั่นแบบยืดหดของ SiO-H
3458	3450	การสั่นแบบยืดหด O-H (โมเลกุลน้ำ)
2920	2920	การสั่นแบบยืดหดของ C-H ₃
1636	1636	การสั่นแบบโค้งงอ O-H (โมเลกุลน้ำ)
1200	1200	การสั่นแบบยืดหดของ Si-O
1090	1090	การสั่นแบบยืดหดของ Si-O-Si
790	790	การสั่นแบบโค้งงอของ Si-O-Si
618	618	การสั่นแบบโค้งงอของ O-Si-O
472	472	การสั่นแบบโค้งงอของ Si-O-Al

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับจากแหล่งธรรมชาติและปรับปรุงด้วยกรด โดยเทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction หรือ XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือความเป็นผลึกของสาร ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer นอกจากนี้ XRD ยังช่วยยืนยันโครงสร้างของสารที่สังเคราะห์ได้ โดยเทียบกับโครงสร้างผลึกมาตรฐานของสารนั้นๆ โดยไดอะตอมไมต์เป็นซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก แต่ถึงจะทราบเช่นนั้นก็ยังไม่สามารถอธิบายโครงสร้างที่แน่นอนของไดอะตอมไมต์ได้ เนื่องจากถึงแม้ซิลิกาจะมีสูตรเคมีเหมือนกันคือ SiO_2 แต่ซิลิกาก็มีโครงสร้างที่แตกต่างกันหลายชนิด ทั้ง โครงสร้างที่เป็นผลึกและโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน เช่น quartz, tridymite, cristobalite เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องอาศัยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่ออธิบายโครงสร้างซิลิกาใน ไดอะตอมไมต์ รูปที่ 4.2 เป็น XRD pattern ที่แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและ ความเป็นผลึกของไดอะตอมไมต์ธรรมชาติ และไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรด ซัลฟิวริก เข้มข้น 6M พบว่าไดอะตอมไมต์ธรรมชาติมีพีคขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 21.80° , 28.20° , 31.16° และ 38.96° และไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก พีคขึ้น ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 21.92° , 28.40° , 31.32° และ 36.00° โดยพีคของทั้งไดอะตอมไมต์ ธรรมชาติและไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการปรับปรุงแสดงถึงระนาบ (101), (111), (102) และ (200) ตามลำดับ ซึ่งเป็นระนาบของผลึกซิลิกา และใกล้เคียงกับโครงสร้างซิลิกาชนิด α - Cristobalite (JCPDS card no.39-1425, $a = 4.973 \text{ \AA}$, $b = 4.973 \text{ \AA}$, $c = 6.924 \text{ \AA}$) การ

ปรากฏของโครงสร้างซิลิกาชนิด α - Cristobalite ใน XRD Pattern แสดงให้เห็นว่าทั้ง ไดอะตอมไมต์ธรรมชาติและไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการปรับปรุงเป็นซิลิกาที่มีความเป็นผลึกสูง



ภาพที่ 4.2 รูปแบบ XRD ของตัวดูดซับไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติและที่ผ่านการปรับปรุง เทียบกับ โครงสร้างมาตรฐานของ α - Cristobalite (JCPDS no.39-1425)

4.2.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับจากแหล่งธรรมชาติและปรับปรุงด้วย กรดโดยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

จากการศึกษาไดอะตอมไมต์ พบว่าไดอะตอมไมต์เป็นสารที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เป็นซาก ฟอสซิลของสาหร่ายเซลล์เดียวที่อาศัยอยู่ในน้ำ ดังนั้นไดอะตอมไมต์จึงมีลักษณะบาง ประการที่แตกต่าง กัน เช่น มีสีแตกต่างกันตามแหล่งที่พบและสิ่งเจือปน เช่น สีชมพู น้ำตาล ส้ม เทา และสีขาว นอกจากนี้ไดอะตอมไมต์ยังมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี ต่างกันด้วย จึงต้องมีการวิเคราะห์ องค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมต์ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer ซึ่งผลการ วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมต์ โดยธรรมชาติและไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการปรับปรุง ด้วยกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 6M แสดงดังตารางที่ 4.3 ในรูปสารประกอบออกไซด์ของธาตุต่างๆ พบว่าองค์ประกอบหลักทาง เคมีทั้งของไดอะตอมไมต์ธรรมชาติและไดอะตอมไมต์หลังผ่านการ ปรับปรุงแล้ว คือ ซิลิกา (SiO_2) มีประมาณร้อยละ 86.7 และ 92.7 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ รองลงมา ได้แก่ โซเดียม ออกไซด์ (Na_2O) และอะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งไดอะตอมไมต์ธรรมชาติและไดอะตอมไมต์ที่ ผ่าน การปรับปรุงแล้วมีอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา (SiO_2/Al_2O_3) เท่ากับ 47.12 (หรือ $Si/Al = 40.08$) และ 34.08 (หรือ $Si/Al = 29.11$) ตามลำดับ โดยหลังจากการ ปรับปรุงไดอะตอม ไมต์ด้วยกรดซัลฟิวริก ที่อุณหภูมิ $100^\circ C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเผาที่ อุณหภูมิ $1100^\circ C$ แล้ว พบว่าสารประกอบออกไซด์บางตัวมีปริมาณลดลง เนื่องจาก สารประกอบออกไซด์บางชนิดที่สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

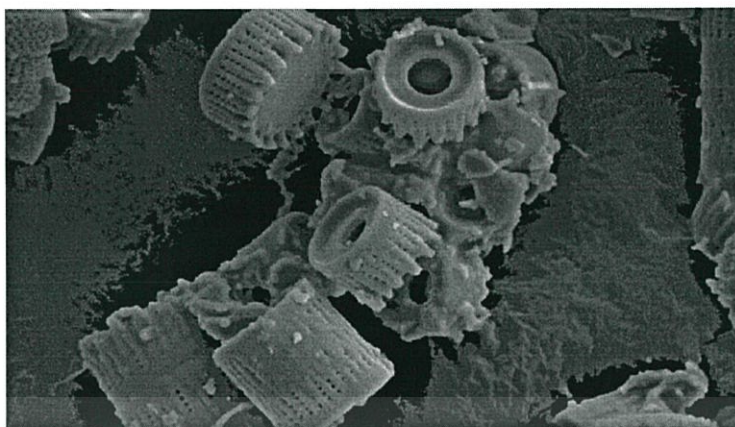
ละลายได้ในกรดซัลฟิวริก จะถูกกำจัดออกจาก โครงสร้างของไดอะตอมไมต์ และล้างออกไปใน ขั้นตอนการล้างตะกอน ส่วนซิลิกาเป็น สารประกอบออกไซด์ที่ไม่ละลายในกรดซัลฟิวริก จึงไม่ได้ถูก กำจัดไปด้วย และเมื่อ สารประกอบออกไซด์บางตัวถูกกำจัดไปแต่ซิลิกายังคงเดิม จึงทำให้เปอร์เซ็นต์ ของซิลิกาที่มี ในไดอะตอมไมต์เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมต์โดยธรรมชาติและไดอะตอมไมต์ที่ ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก

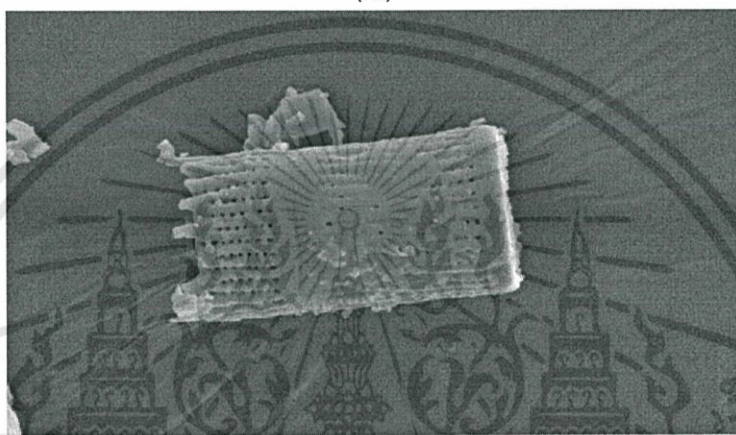
Chemical (% weight)	Natural diatomite	Modified Diatomite
SiO ₂	86.700	92.700
Al ₂ O ₃	1.840	2.720
Na ₂ O	4.410	3.170
Fe ₂ O ₃	1.220	0.907
CaO	0.394	0.303
K ₂ O	0.169	0.152
TiO ₂	0.184	-
V ₂ O ₅	1.110	-
La ₂ O ₃	3.840	-
Si/Al ratio	40.080	29.110

4.2.4 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับในระดับอนุภาค (Scanning Electron Microscope, SEM)

การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (Scanning electron microscope) จากการตรวจสอบลักษณะ ทางสัณฐานวิทยาของไดอะตอมไมต์ ที่กำลังขยาย 1500 เท่า และ 2000 เท่า พบว่า โครงสร้างของไดอะตอมไมต์ที่สมบูรณ์มีรูปทรงกระบอกคล้ายท่อ โครงสร้างเป็นรูพรุน ดังภาพที่ 4.3 ขนาดของอนุภาคของไดอะตอมไมต์อยู่ในช่วง 4-10 ไมโครเมตร เมื่อผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) และเผาที่อุณหภูมิสูง ที่กำลังขยาย 1000 เท่า พบว่าโครงสร้างหลักของไดอะตอมไมต์ยังคงเหมือนเดิม แต่พื้นผิวราบเรียบขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.4

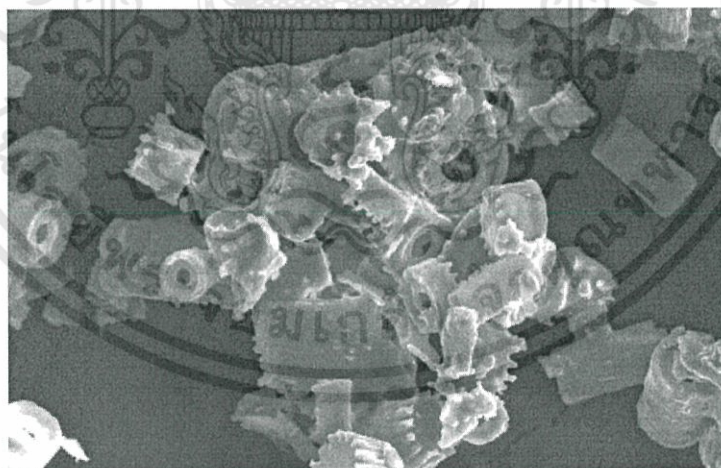


(ก.)



(ข.)

ภาพที่ 4.3 รูปร่างสัณฐานวิทยาของไดอะตอมไมต์ ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (ก.) และกำลังขยาย 2000 เท่า (ข.)



ภาพที่ 4.4 รูปร่างสัณฐานวิทยาของไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก และเผาที่อุณหภูมิสูง กำลังขยาย 1000 เท่า

4.2.5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ของตัวดูดซับด้วยวิธีบีอีที (Bruner-Emmet-Teller หรือ BET)

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ด้วยการดูดซับและการคายซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิเดือดของ BET พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของได

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมไมต์ธรรมชาติ กับไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 6M และเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส พบว่า ไดอะตอมไมต์ในธรรมชาติ มีพื้นที่ผิว 41.84 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุน 27.18 อังสตรอม และปริมาตรรูพรุน 0.02843 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ สำหรับ ไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก มีพื้นที่ผิว 45.33 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุน 33.96 อังสตรอม และปริมาตรรูพรุน 0.03848 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ จากทฤษฎีของ BET หลังจากผ่านการปรับปรุงแล้ว ไดอะตอมไมต์มีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยมากขึ้น ดังแสดง ในตารางที่ 4.4 ทั้งนี้ เนื่องจากในกระบวนการปรับปรุงไดอะตอมไมต์ด้วยกรดซัลฟิวริกนั้น กรดซัลฟิวริกจะไปละลายเอาสารประกอบออกไซด์บางตัวออกไป ทำให้เกิดช่องว่างในรูพรุน มากขึ้น พื้นที่ผิวของไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกแล้วจึงมากกว่าไดอะตอมไมต์ธรรมชาติ

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับที่มาจากแหล่งธรรมชาติและที่ปรับปรุงด้วยกรดโดย BET

Sample	Surface Area (m^2/g)	Pore Volume (cm^3/g)	Pore Diameter (\AA)
Natural Diatomite	41.84	0.02843	27.18
Modified Diatomite	45.33	0.03848	33.96

4.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

4.3.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยไดอะตอมไมต์เป็นตัวดูดซับ

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของโลหะหนักโดยไดอะตอมไมต์ เป็นตัวดูดซับเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการดูดซับทำการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_e$ กับ $1/C_e$ สำหรับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ สำหรับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ค่าตัวแปรต่างๆ ที่นำมาใช้ แสดงดังตารางที่ 4.5, 4.6, 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลจากการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วด้วยไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติ

ความเข้มข้นก่อนดูดซับ C_0 (ppm)	ความเข้มข้นหลังดูดซับ C_e (ppm)	ความสามารถในการดูดซับ q_e (mg/g)	$1/C_e$	$1/q_e$	$\log C_e$	$\log q_e$
1	0.0960	0.0090	10.4168	111.1111	-1.0177	-2.0458
2	0.2680	0.0173	3.7313	57.8035	-0.5719	-1.7619
3	0.5325	0.0247	1.8779	40.4858	-0.2737	-1.6073
4	0.7730	0.0323	1.2936	30.9597	-0.1118	-1.4908
5	0.9245	0.0408	1.0817	24.5098	-0.0341	-1.3893

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลจากการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วด้วยไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรด

ความเข้มข้น ก่อนดูดซับ C_0 (ppm)	ความเข้มข้น หลังดูดซับ C_e (ppm)	ความสามารถ ในการดูดซับ q_e (mg/g)	$1/C_e$	$1/q_e$	$\log C_e$	$\log q_e$
1	0.0220	0.0098	45.4546	102.2704	-1.6576	-2.0098
2	0.0310	0.0197	32.2581	50.7898	-1.5986	-1.7058
3	0.1050	0.0289	9.5238	34.5447	-0.9788	-1.5384
4	0.1650	0.0384	6.0606	26.0756	-0.7825	-1.4162
5	0.2570	0.0474	3.8911	21.0846	-0.5901	-1.3239

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลจากการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับแคดเมียมด้วยไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติ

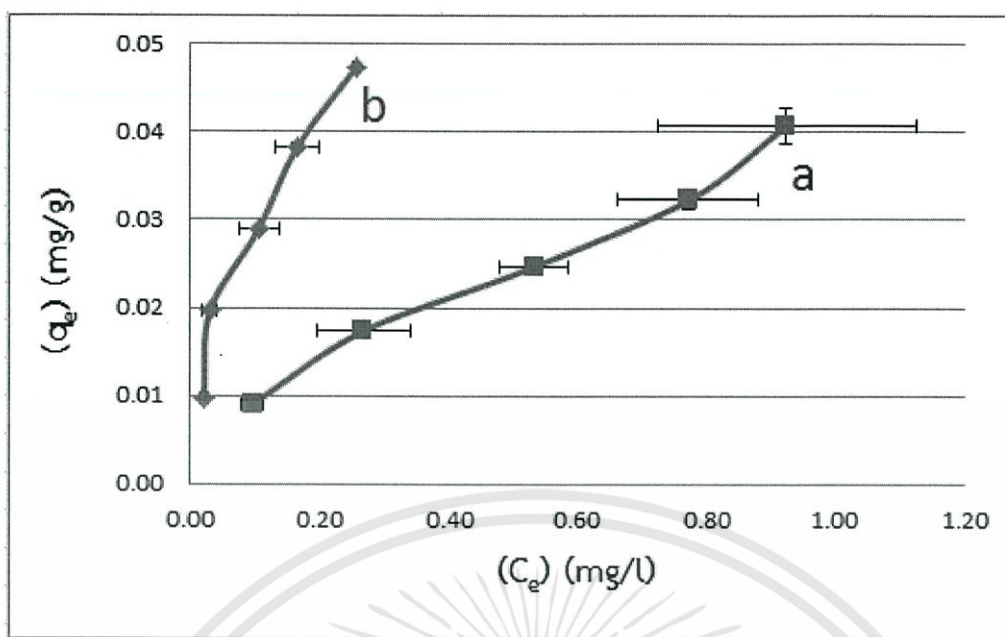
ความเข้มข้น ก่อนดูดซับ C_0 (ppm)	ความเข้มข้น หลังดูดซับ C_e (ppm)	ความสามารถ ในการดูดซับ q_e (mg/g)	$1/C_e$	$1/q_e$	$\log C_e$	$\log q_e$
1	0.0050	0.0099	200.0000	100.5025	-2.3010	-2.0022
2	0.0150	0.0199	66.6667	50.3778	-1.8239	-1.7022
3	0.0280	0.0297	35.7143	33.6474	-1.5528	-1.5269
4	0.0560	0.0394	17.8571	25.3549	-1.2518	-1.4041
5	0.2890	0.0471	3.4602	21.2269	-0.5391	-1.3269

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลจากการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับแคดเมียมด้วยไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรด

ความเข้มข้น ก่อนดูดซับ C_0 (ppm)	ความเข้มข้น หลังดูดซับ C_e (ppm)	ความสามารถ ในการดูดซับ q_e (mg/g)	$1/C_e$	$1/q_e$	$\log C_e$	$\log q_e$
1	0.0010	0.0099	1000.0000	100.1001	-3.0000	-2.0004
2	0.0050	0.0199	200.0000	50.1253	-2.3010	-1.7001
3	0.0060	0.0299	166.6667	33.4001	-2.2219	-1.5238
4	0.0100	0.0399	100.0000	25.0627	-2.0000	-1.3990
5	0.0550	0.0495	18.1818	20.2225	-1.2596	-1.3058

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติและไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกโดยใช้ตัวดูดซับ 5.0000 กรัม สารละลายเลด(II)ไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) และสารละลายแคดเมียม(II)ไนเตรต($Cd(NO_3)_2$) ที่ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 45 นาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยกรัมของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ) และความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือที่สภาวะสมดุล (C_e) (มิลลิกรัมต่อลิตร)

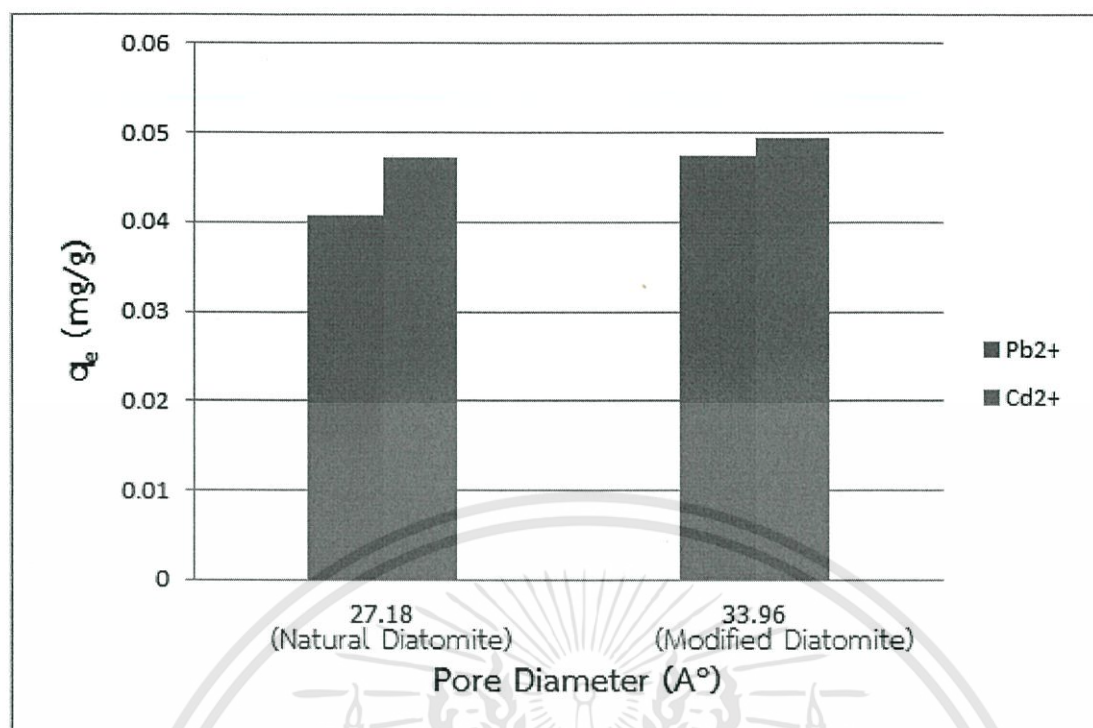
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



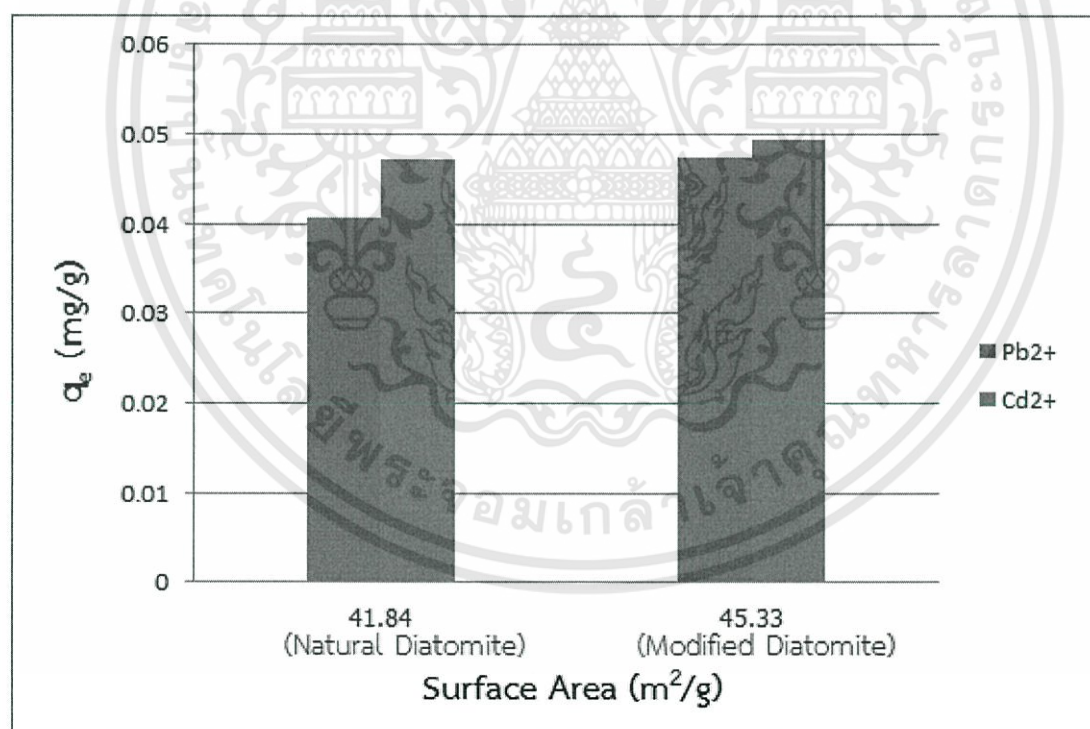
ภาพที่ 4.5 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของ (a) ไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติ (b) ไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรด

พบว่าเมื่อความเข้มข้นโลหะหนักเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณการดูดซับโลหะหนักต่อกรัมตัวดูดซับจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของของโลหะหนักในสารละลายเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย จากภาพที่ 4.5 พบว่าตัวดูดซับไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติและที่ปรับปรุงด้วยกรดสามารถดูดซับตะกั่วในสารละลายเลด(II)ไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) สูงสุดที่ 0.0408 และ 0.0474 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมตัวดูดซับตามลำดับ และตัวดูดซับทุกตัวมีประสิทธิภาพการดูดซับมากที่สุดในค่าความเข้มข้นที่น้อยและค่อยๆลดลงเมื่อความเข้มข้นมากขึ้น โดยประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมด้วยไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติคือ 90.40% และ 99.50% ตามลำดับ และด้วยไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดคือ 97.80% และ 99.90% ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดเป็นตัวดูดซับที่มีความสามารถและมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีกว่าไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติ

4.3.2 การศึกษาผลของขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่มีต่อการดูดซับตะกั่วในสารละลายเลด (II) ไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) และการดูดซับแคดเมียมในสารละลายแคดเมียม (II) ไนเตรต ($Cd(NO_3)_2$)



ภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ (A°) กับปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยกรัมของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)



ภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (m²/g) กับปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยกรัมของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)

จากภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ (A°) กับปริมาณ ของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยกรัมของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ) พบว่าไดอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ต่างจากแหล่งธรรมชาติและที่ปรับปรุงด้วยกรด มีขนาดรูพรุน 27.18 และ 33.96 อัง ส ต ร อ ม ตามลำดับ ที่ความเข้มข้น 5 ppm สามารถดูดซับตะกั่วได้ปริมาณ 0.0408 และ 0.0474 มิลลิกรัม ตะกั่วต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ และสามารถดูดซับแคดเมียมได้ ปริมาณ 0.0471 และ 0.0495 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ เมื่อรูพรุนมี ขนาดใหญ่ขึ้น ความสามารถในการดูดซับ โลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้น เนื่องจาก อนุภาคของโลหะหนักเข้าไปยึดเกาะในรูพรุนตัวดูดซับ ได้ง่ายขึ้น และแคดเมียมเป็นสารที่ถูกดูดซับมากกว่าตะกั่วเนื่องจากโครงสร้างของไดอะตอมไมต์เป็นแบบ Soft framework และแคดเมียมเป็นไอออนที่ soft มากกว่า ตะกั่ว ทำให้แคดเมียมมีการดูดซับกับ โครงสร้างไดอะตอมไมต์ได้ดีกว่าจึงมีการดูดซับที่มากกว่า [33] และไดอะตอมไมต์เป็นตัวดูดซับที่ดี เนื่องจากไดอะตอมไมต์มีคุณสมบัติความเป็นผลึก ทำให้รูพรุนมีความเป็นระเบียบเมื่อมีการถ่ายโอนมวล (Mass transfer) ของโลหะหนักเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ จะทำให้ถ่ายโอนมวลสะดวกและง่าย เนื่องจากมีความต้านทานน้อยภายในรูพรุนนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน รูพรุนจะไม่มีระเบียบทำให้มีความต้านทานภายในรูพรุนมากการถ่ายโอนมวล (Mass transfer) ของโลหะหนักเข้าไปภายในรูพรุนก็จะยากตามไปด้วย อีกทั้งยังมีปัจจัยของการกระจายตัวของขนาดรูพรุนที่สามารถอธิบายในเรื่องการดูดซับที่ได้กล่าวไปข้างต้นได้อีกด้วย และจากภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (m^2/g) กับปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยกรัม ของ ตัวดูดซับ ที่สภาวะ สมดุล (q_e) (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ) พบว่าไดอะตอมไมต์จากแหล่ง ธรรมชาติและที่ปรับปรุงด้วยกรดมี พื้นที่ผิว 41.84 และ 45.33 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ppm สามารถดูด ซับตะกั่วได้ปริมาณ 0.0408 และ 0.0474 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมตัวดูดซับตามลำดับ และสามารถดูดซับ แคดเมียม ได้ปริมาณ 0.0471 และ 0.0495 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ เมื่อพื้นที่ ผิวมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้น และอีกเช่นเดียวกันจะเห็น ว่า ไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรด มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นเนื่องจากตัว ดูดซับมีคุณสมบัติ ความเป็นผลึก มีขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง ดังนั้นขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวไม่ใช่แค่สอง ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ แต่ยังมีปัจจัยของโครงสร้างตัวดูดซับและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนที่มีผล ต่อการดูดซับอีกด้วย

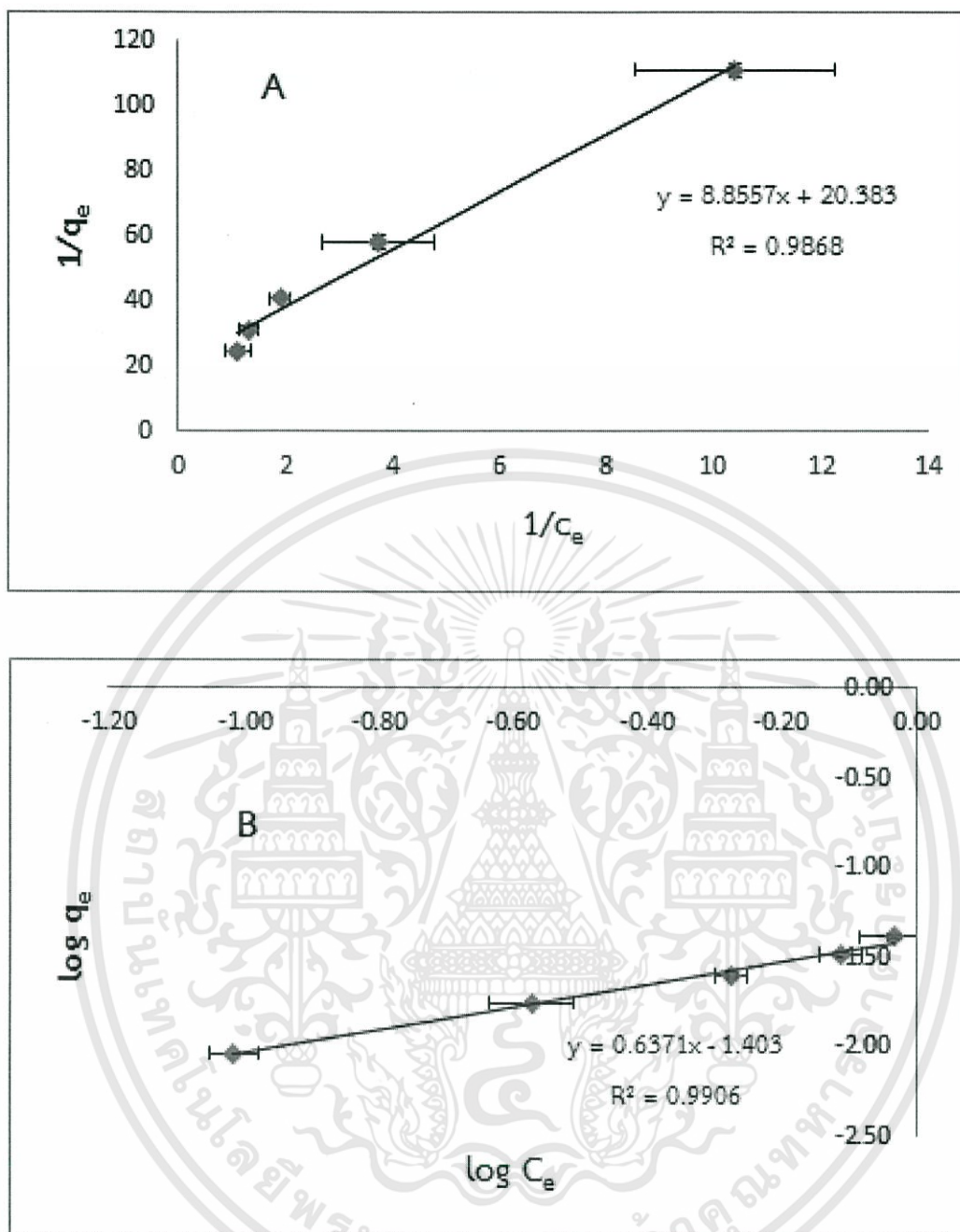
4.3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับโดยใช้สมการของ Langmuir และ Freundlich

การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับโลหะหนักที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ด้วยสมการของ Langmuir และ Freundlich โดยใช้ไดอะตอมไมต์เป็นตัวดูดซับ แสดงดังภาพที่ 4.8, 4.9, 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ จากกราฟหาค่าความชันและจุดตัดแกน เพื่อใช้ในการคำนวณน้ำหนักของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนัก ของตัวดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับบนพื้นผิวเกือบ สมบูรณ์ (q_m) และค่าคงที่ (K_L) ของสมการ Langmuir รวมทั้งค่าคงที่การดูดซับ (K_F) และ ค่าคงที่ (n_F) ของสมการ Freundlich แสดงดังตารางที่ 4.9 จากตารางที่ 4.9 พบว่า ตะกั่วที่ถูกดูดซับด้วยไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติ มี สัม ป ระ ส ี ท ธิ ตัวกำหนด (R^2) จากสมการของ Langmuir เท่ากับ 0.9868 และสมการของ Freundlich เท่ากับ 0.9906 และสำหรับตะกั่วที่ถูกดูดซับด้วยไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วย กรดมีสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) จากสมการของ Langmuir เท่ากับ 0.8918 และสมการ ของ Freundlich เท่ากับ 0.9154 และ แคดเมียมที่ถูกดูดซับด้วยไดอะตอมไมต์จากแหล่ง ธรรมชาติ มีสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) จากสมการ ของ Langmuir เท่ากับ 0.9962 และ สมการของ Freundlich เท่ากับ 0.8714 และแคดเมียมที่ถูก ดูดซับด้วยไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดมีสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) จากสมการของ Langmuir

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

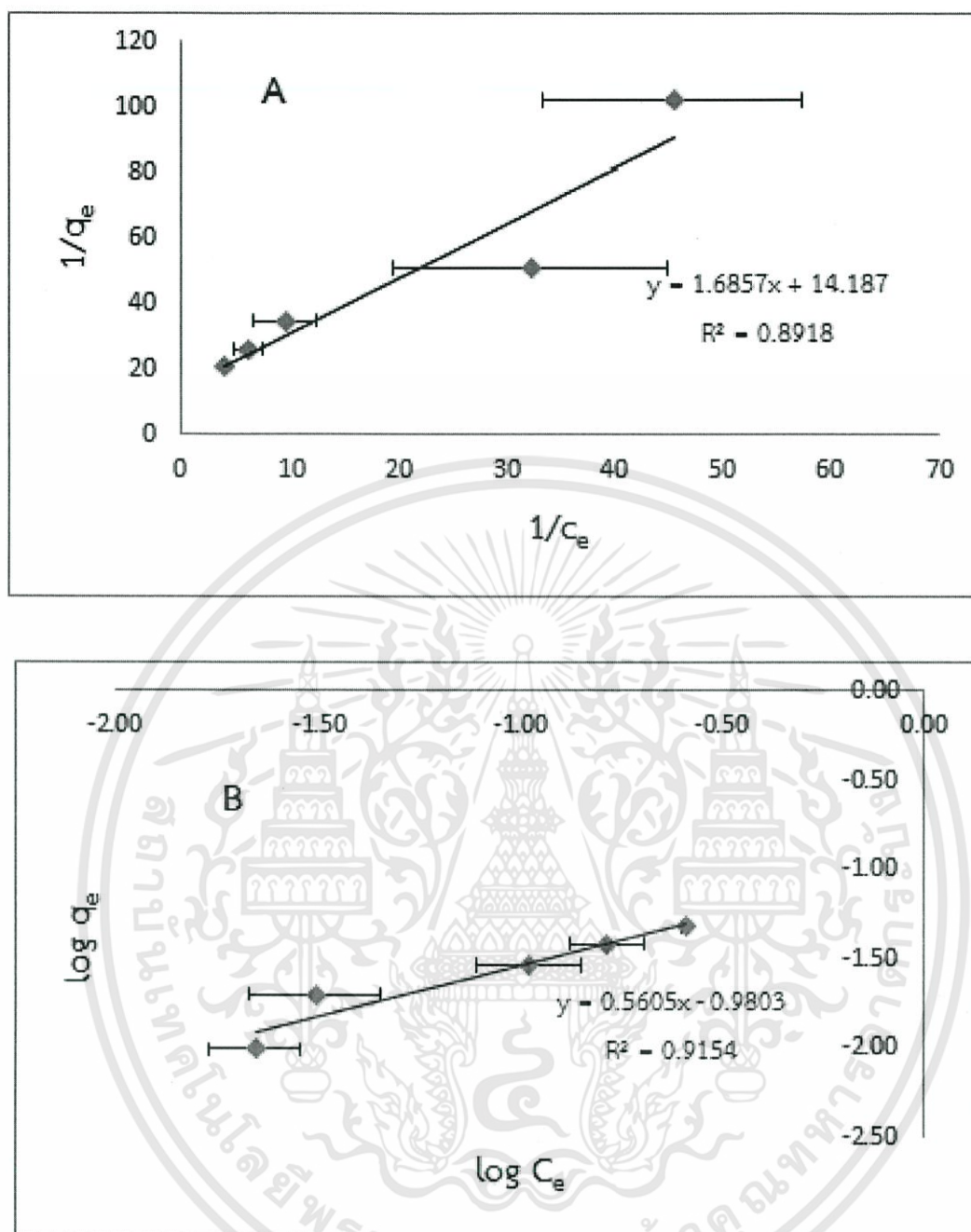
เท่ากับ 0.9551 และสมการของ Freundlich เท่ากับ 0.8729 ซึ่งกล่าวได้ว่าสมการของ Freundlich เหมาะสมที่จะใช้อธิบายสมการดูดซับตะกั่วบนไดอะตอมไมต์มากกว่าสมการของ Langmuir เพราะมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่า ผลการทดลองนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Guodong Sheng และคณะ [34] สามารถสรุปสมการของฟรอนด์ลิชได้ดังตารางที่ 4.10 และกล่าวได้ว่าสมการของ Langmuir เหมาะสมที่จะใช้อธิบายสมการดูดซับแคดเมียมบนไดอะตอมไมต์มากกว่าสมการของ Freundlich เพราะมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่า ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Majeda A.M. Khraishah และคณะ [35] และสามารถสรุปสมการแลงเมียร์ได้ดังตารางที่ 4.11

จากข้อมูลข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่า ตะกั่วที่ถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติและที่ปรับปรุงด้วยกรดอาจเป็นตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สำหรับค่า q_m มีค่าเท่ากับ 0.0491 และ 0.0705 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนค่าคงที่ K_L มีค่าเท่ากับ 2.3017 และ 8.4161 ตามลำดับ และค่าคงที่การดูดซับ (K_f) มีค่าเท่ากับ 0.0395 และ 0.1046 ตามลำดับ และค่าคงที่ (n_f) มีค่าเท่ากับ 1.5696 และ 1.7841 ตามลำดับ และแคดเมียมที่ถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติและที่ปรับปรุงด้วยกรด อาจเป็นตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สำหรับค่า q_m มีค่าเท่ากับ 0.0504 และ 0.0450 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนค่าคงที่ K_L มีค่าเท่ากับ 48.6902 และ 279.8768 ตามลำดับ และค่าคงที่การดูดซับ (K_f) มีค่าเท่ากับ 0.0951 และ 0.1992 ตามลำดับ และค่าคงที่ (n_f) มีค่าเท่ากับ 2.6185 และ 2.4366 ตามลำดับ



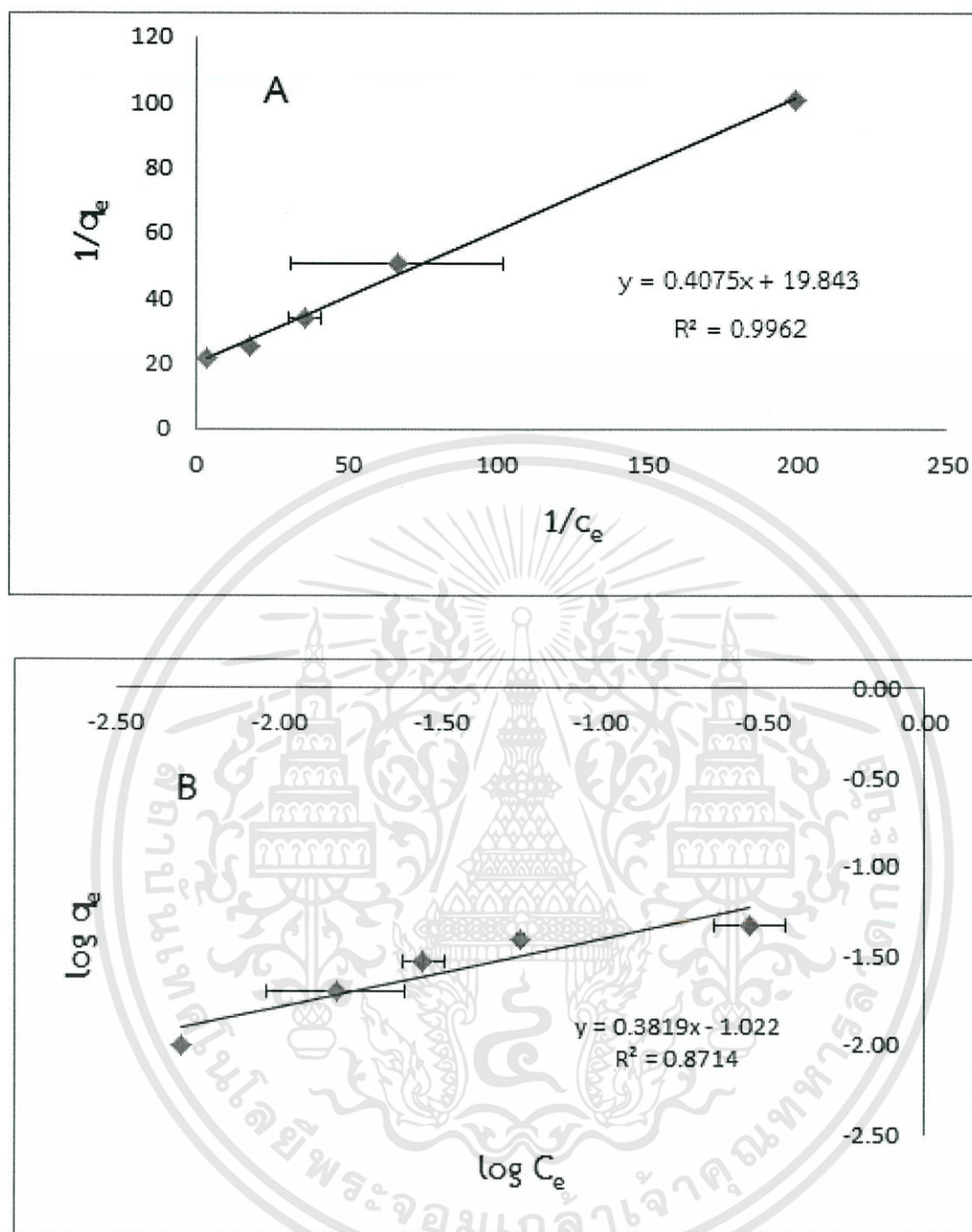
ภาพที่ 4.8 กราฟวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับตะกั่วด้วยตัวดูดซับไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติ ด้วยสมการของ A) Langmuir B) Freundlich

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



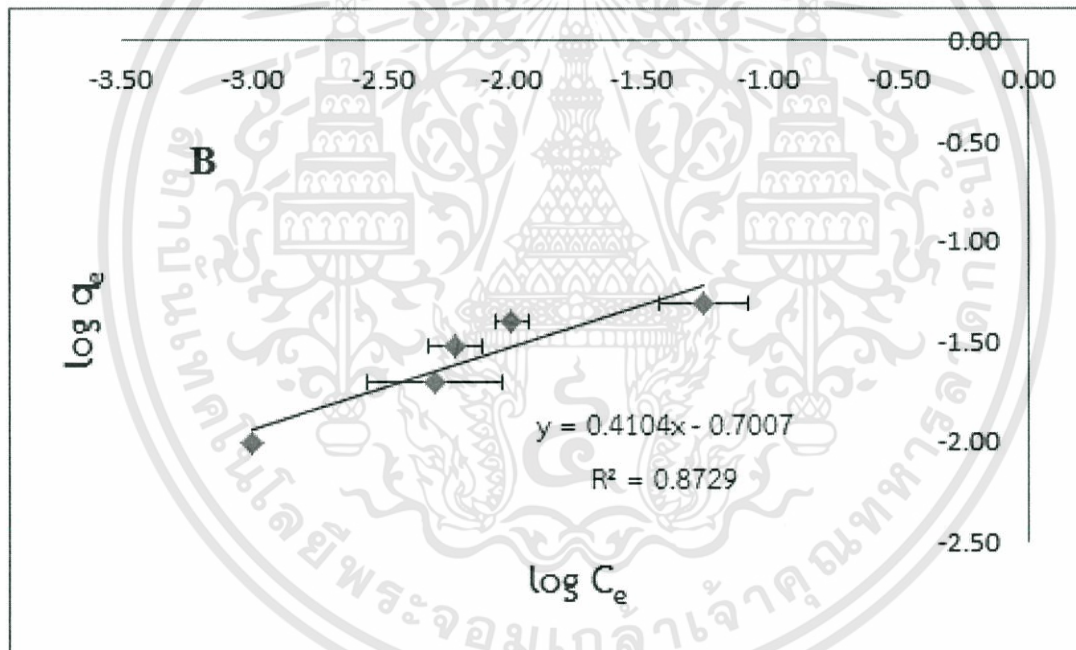
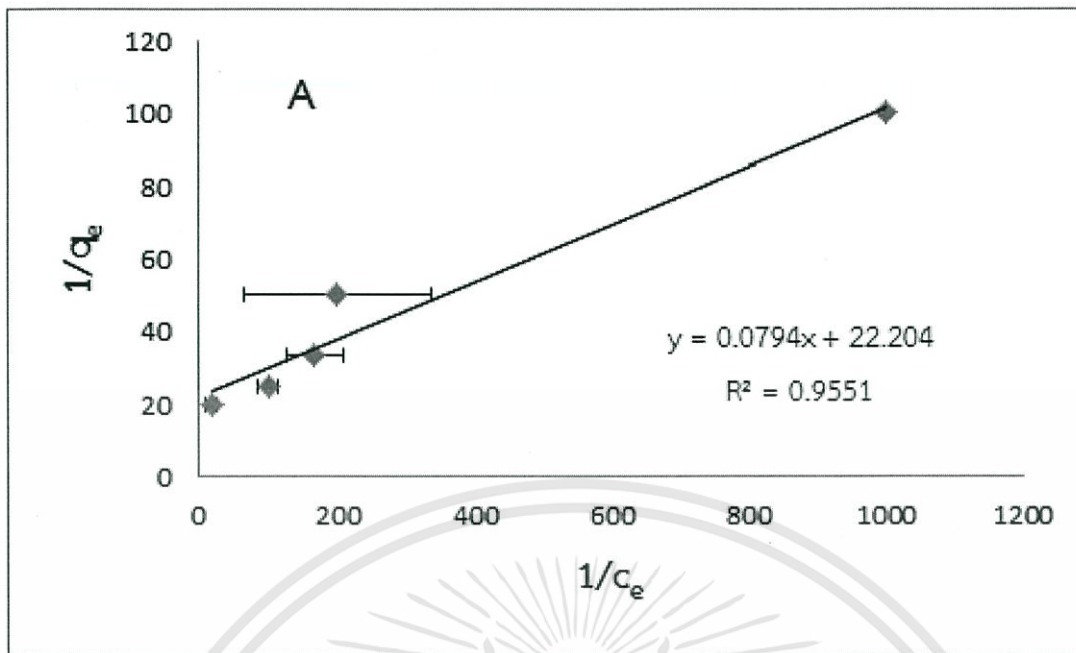
ภาพที่ 4.9 กราฟวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับตะกั่วด้วยตัวดูดซับไดอะตอมไมต์ปรับปรุงด้วยกรด ด้วยสมการของ A) Langmuir B) Freundlich

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 กราฟวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับแคดเมียมด้วยตัวดูดซับไตอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติ ด้วยสมการของ A) Langmuir B) Freundlich

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 กราฟวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับแคดเมียมด้วยตัวดูดซับไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดด้วยสมการของ A) Langmuir B) Freundlich

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าตัวแปรที่ได้จากการคำนวณสมการของ Langmuir และสมการของ Freundlich

Adsorbent	Adsorbate	Langmuir			Freundlich		
		q_m	K_L	R^2	K_f	n_f	R^2
Diatomite treated with 6M H ₂ SO ₄	Pb ²⁺	0.0705	8.4161	0.8918	0.1046	1.7841	0.9154
Diatomite		0.0491	2.3017	0.9868	0.0395	1.5696	0.9906
Diatomite treated with 6M H ₂ SO ₄	Cd ²⁺	0.0450	279.8768	0.9551	0.1992	2.4366	0.8729
Diatomite		0.0504	48.6902	0.9962	0.0951	2.6185	0.8714

ตารางที่ 4.10 สมการพหุนามของการดูดซับตะกั่ว

Adsorbent	สมการ
	สมการพหุนาม
Diatomite treated with 6M H ₂ SO ₄	$q_e = 0.1046C_e^{0.5605}$
Diatomite	$q_e = 0.0395C_e^{0.6371}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาศึกษาการดูดซับสารตะกั่ว โดยใช้สารละลายเลด (II) ในเทรต เป็นแหล่งวิเคราะห์ และมีไดอะตอมไมต์เป็นตัวดูดซับ ซึ่งใช้เวลาในการดูดซับ 45 นาทีในสภาวะอุณหภูมิห้อง โดยศึกษาศึกษาการดูดซับตะกั่วจากสารละลายเลด (II) ในเทรต ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่าไดอะตอมไมต์ชนิดที่มาจากแหล่งธรรมชาติและชนิดที่ปรับปรุงด้วยกรด สามารถดูดซับตะกั่วและแคดเมียมได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถดูดซับตะกั่วได้ปริมาณ 0.0408 และ 0.0474 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อกรัมตัวดูดซับ จากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction หรือ XRD) พบว่าไดอะตอมไมต์ชนิดที่มาจากแหล่งธรรมชาติและชนิดที่ปรับปรุงด้วยกรด มีโครงสร้างที่เป็นผลึกสูง และจากการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวตัวดูดซับด้วยวิธีบีอีที (BET) พบว่าไดอะตอมไมต์ชนิดที่มาจากแหล่งธรรมชาติและชนิดที่ปรับปรุงด้วยกรด มีขนาดรูพรุน 27.18 และ 33.96 อังสตรอมตามลำดับ และมีพื้นที่ผิว 41.84 และ 45.33 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งไดอะตอมไมต์ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยกรดพบว่ามีสารประกอบออกไซด์บางชนิดมีปริมาณลดลง เนื่องจากสารประกอบออกไซด์เหล่านั้นสามารถละลายได้ในกรดซัลฟิวริก และถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของไดอะตอมไมต์ทำให้ไดอะตอมไมต์มีรูพรุนและพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อนุภาคของโลหะหนักเข้าไปยึดเกาะในรูพรุนและบนพื้นผิวของตัวดูดซับได้ง่ายขึ้น จึงเกิดการดูดซับโลหะหนักได้ดียิ่งขึ้นและโครงสร้างความเป็นผลึกของไดอะตอมไมต์ทำให้มีความสามารถในการเป็นตัวดูดซับดั่งนั้นขนาดรูพรุน พื้นที่ผิว การกระจายตัวของขนาดรูพรุน และโครงสร้างของตัวดูดซับ เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับโลหะหนักบนไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติและที่ปรับปรุงด้วยกรด

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ โดยใช้สมการของ Langmuir และ Freundlich ได้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยกรัมของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) และความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือที่สภาวะสมดุล (C_e) ของตัวดูดซับ ไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติ คือ $q_e = \frac{(0.0504)(48.6902)(C_e)}{1 + (48.6902)(C_e)}$ และ $q_e = 0.0395C_e^{0.6371}$ ตามลำดับ และสำหรับไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรด คือ $q_e = \frac{(0.0450)(279.8768)(C_e)}{1 + (279.8768)(C_e)}$ และ $q_e = 0.1046C_e^{0.5605}$ ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) จากสมการของ Langmuir และ Freundlich ของการดูดซับตะกั่วบนไดอะตอมไมต์ชนิดที่มาจากแหล่งธรรมชาติ คือ 0.9868 และ 0.9906ตามลำดับ และไดอะตอมไมต์ชนิดที่ปรับปรุงด้วยกรด คือ 0.8918 และ 0.9154ตามลำดับ และไดอะตอมไมต์ชนิดที่ปรับปรุงด้วยกรด คือ 0.9551 และ 0.8729ตามลำดับ พบว่าสมการของ Freundlich จะสามารถอธิบายการดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าสมการของ Langmuir ดังนั้นการดูดซับตะกั่วจึงเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว อธิบายได้ว่าการดูดซับเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดเป็นแรงทางเคมีที่ไม่สามารถผันกลับได้ การดูดซับตะกั่วด้วยไดอะตอมไมต์ สามารถอธิบายขั้นตอนการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นลำดับได้ดังนี้ [36]

- 1) การเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากสารละลายผ่านชั้นของเหลวไปสู่ผิวภายนอกของไดอะตอมไมต์
- 2) โลหะหนักแพร่เข้าไปภายในรูพรุนของไดอะตอมไมต์
- 3) เกิดการดูดซับของโลหะหนักภายในรูพรุนของไดอะตอมไมต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรนำโคอะตอมไมต์จากแหล่งที่มาที่แตกต่างกันมาเป็นตัวดูดซับ เพื่อเปรียบเทียบหาตัวดูดซับที่เหมาะสม
- 2) การปรับปรุงโคอะตอมไมต์ด้วยกรดซัลฟิวริก 6 โมลลาร์ ควรทำการทดลองใช้กรดที่ปริมาณอื่นๆเพื่อศึกษาว่าที่ปริมาตรใดที่ทำให้โคอะตอมไมต์มีความบริสุทธิ์มากที่สุด
- 3) ควรศึกษาตัวดูดซับที่ปรับปรุงด้วยกรดเพียงอย่างเดียว เปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่ปรับปรุงด้วยกรดและความร้อน
- 4) นอกจากศึกษาปัจจัยทางด้านความเข้มข้นของสารละลายเลด (II) ในเตรตแล้ว ควรศึกษาปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องในเรื่องของการดูดซับอันได้แก่ ระยะเวลาในการดูดซับ อัตราเร็วในการปั่นกววน ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ และอุณหภูมิในการดูดซับด้วย เพราะปัจจัยด้านความเข้มข้นเป็นเพียงปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับ
- 5) ควรศึกษาไอโซเทอมการคายซับของโลหะหนักในโคอะตอมไมต์ เพื่อใช้ในการหาปริมาณในการคายซับซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้



เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2553. “การดูดซับโลหะหนัก.”
- [2] ปัญญาณัติจักร์. 2556. “การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางเพื่อดูดซับโครเมียม (III) ไอออนจากน้ำเสียในการวิเคราะห์ค่า COD.” ภาควิชาเคมีคณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยรังสิต.
- [3] ไดอะตอมไมต์. [Online]. Available : http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2552/ichem0952ts_ch2.pdf
- [4] สารโลหะหนัก. [Online]. Available : <http://www.naka.co.in/web/index.php/blog/item/59-trace-element>
- [5] มลพิษจากโลหะหนัก. [Online]. Available http://www.il.mahidol.ac.th/emedial/ecology/chapter2/chapter2_airpolution11.htm
- [6] นางสาวสุทธินี มีสุข. มลพิษของโลหะหนัก. [Online]. Available : http://www.reo13.go.th/KM_reo13/data_know/54-06-02_metal.pdf
- [7] โลหะหนัก ตะกั่ว. [Online]. Available : http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2552/ichem0952ts_ch2.pdf
- [8] ชีรพล คังคะเกตุ. 2556. “ตะกั่วกับความเป็นพิษ.” สิ่งแวดล้อม. 17 : 83-88.
- [9] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. แคดเมียม. [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2121/cadmium>.
- [10] เกียรติศักดิ์ อุดมศิลป์โรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : มิตรนราการพิมพ์.
- [11] เดชา ฉัตรศิริเวช. 2552. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [12] ทฤษฎีการดูดซับ (Adsorption isotherm). [Online]. Available : http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/chem0451sk_ch1.pdf
- [13] Danald, L. 1995. “Environmental Soil Chemistry.” USA Academic Press. 99-139.
- [14] Eckenfelder, W.W. 1996. “Industrial Water Pollution Control.” Confederation of British Industry Publishing. New York. 263-291.
- [15] บุญชัย โชติวิริยวานิชย์. 2533. “การปรับปรุงสมการความสัมพันธ์ของการดูดซับก๊าซผสม โดยวิธีทางเทอร์โมไดนามิกส์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [16] เครื่องวิเคราะห์ความเป็นผลึก โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์. [Online]. Available : <http://www.sec.psu.ac.th/home/ebook/sec-magazine-2557-04-ftir/sec-magazine-2557-04-ftir.pdf>

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [17] N. Inchaurren, J. Font, C.P. Ramos. P. Haure. 2016. "Natural diatomites: Efficient green catalyst for Fenton-like oxidation of Orange II." *Applied Catalysis B: Environmental* 181. 481–494.
- [18] กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM). [Online]. Available : <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/192/SEM.pdf>
- [19] กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM). [Online]. Available : <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/192/SEM.pdf>
- [20] เครื่องวัดพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาครูพรุน โดยวิธีบีอีที (BET). [Online]. Available : http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2550/ichem0850nt_ch2.pdf
- [21] สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. "การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์." [Online]. Available : <http://www.nst.or.th/article/article494/article49418.htm>
- [22] เครื่องตรวจวัดสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบอินฟราเรด. [Online]. Available: <http://www.sec.psu.ac.th/home/ebook/sec-magazine-2557-04-ftir/sec-magazine-2557-04-ftir.pdf>
- [23] เทคนิคการตรวจสอบเอกลักษณ์ อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี [AAS]. [Online]. Available : http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/chem0451sk_ch1.pdf
- [24] เทคนิคการตรวจสอบเอกลักษณ์อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี[AAS]. [Online]. Available : [http://eresearch.library.ssru.ac.th/bitstream/123456789/329/10/ird_286_56%20\(9\).pdf](http://eresearch.library.ssru.ac.th/bitstream/123456789/329/10/ird_286_56%20(9).pdf)
- [25] การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้เครื่อง AAS. [Online]. Available : <http://www2.diw.go.th/Research/เอกสารเผยแพร่/เครื่องAAS.pdf>
- [26] Şan. O, Remzi. G and Cem Özgür. "Purification of diatomite powder by acid leaching for use in fabrication of porous ceramics." *Int. J. Miner. Process.* 2009 (93) : 6–10.
- [27] Zhang J, Ping Q, Niu M, Shi H, and Li Na. "Kinetics and equilibrium studies from the methylene blue adsorption on diatomite treated with sodium Hydroxide." *Applied Clay Science.* 2013(83–84) : 12–16.
- [28] Myoung-Eun Lee, Jin Hee Park, Jae Woo Chung, Chae-Young Lee, Seoktae Kang. "Removal of Pb and Cu ions from aqueous solution by Mn₃O₄-coated activated carbon." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 21. 2015 : 470-475.
- [29] Z. Al-Qodah, W.K. Lafi, Z. Al-Anber, M. Al-Shannag and A. Harahsheh. "Adsorption of methylene blue by acid and heat treated diatomaceous silica." *Desalination.* 2007 (217) : 212–224.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [30] A. Chaisena, K. Rangriwatananoue. "Effects of Thermal and acid treatments on some physic-chemical properties of Lampang diatomite." *Suranaree J. Technol.* 2004(11) : 289-299.
- [31] Wenbin Y, Liangliang Deng, Peng Yuan, Dong Liu, Weiwei Yuan, Peng Liu, Hongping He, Zhaohui Li and Fanrong Chen. "Surface silylation of natural mesoporous/macroporous diatomite for adsorption of benzene." *Journal of Colloid and Interface Science.* 2015 (448) : 545-552.
- [32] Mohammad I, Mehdi A, Mohammad Ali Mousavian. "Comparative study of lead sorption onto natural perlite, dolomite and diatomite." *Chemical Engineering Journal* 2011 (178) : 317- 323
- [33] Sheng Deng, Peng Wang, Guangshan Zhang, Yuan Dou. "Polyacrylonitrile-based fiber modified with thiosemicarbazide by microwave irradiation and its adsorption behavior for Cd(II) and Pb(II)." *Journal of Hazardous Materials.* 2016(307) : 64-72.
- [34] Guodong Shenga, Suowei Wang, Jun Hua, Yi Lu, Jiaying Li, Yunhui Dong, iangkeWang. "Adsorption of Pb(II) on diatomite as affected via aqueous solution chemistry and temperature." *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2009(339) : 159-166.
- [35] Majeda A.M. Khraisheh , Yahya S. Al-degs, Wendy A.M. McMinn. "Remediation of wastewater containing heavy metals using raw and modified diatomite." *Chemical Engineering Journal* 2004(99) : 177-184 .
- [36] Wan Ngha, W.S. Kamari, A. and Koay, Y.J. "Equilibrium and kinetics studies of adsorption of copper (II) on chitosan and chitosan/PVA beads." *International Journal of Biological Macromolecules.* 34 : 155-161.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

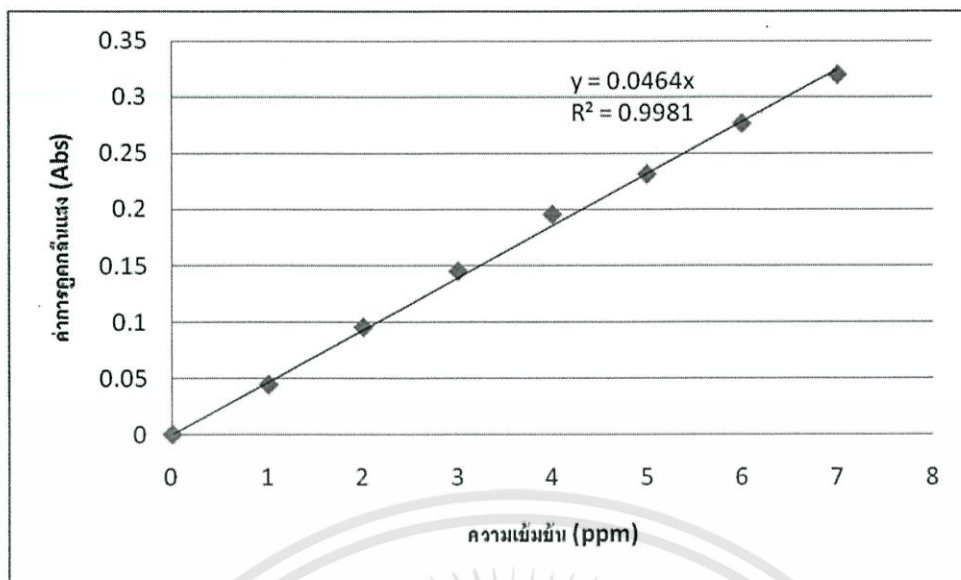
1. การสร้างกราฟมาตรฐานตะกั่ว (Pb) (Standard Calibration Curve)

1.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb) ที่ความเข้มข้น 1,2,3,4,5,6 และ 7 ppm ปริมาตร 50 ml โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานตะกั่วเข้มข้น 1,000 ppm จำนวน 10 ml ถ่ายลงในขวดปรับปริมาตร 100 ml จากนั้นทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้ได้สารละลายมาตรฐานตะกั่วที่มีความเข้มข้น 100 ppm จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งโดย ปิเปตสารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 5,10,15,20,25,30 และ 35 ml ถ่ายลงในขวดปรับปริมาตร 500 ml แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

1.2 นำสารละลายที่เตรียมได้ไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ซึ่งทำการวัดตะกั่วที่ความยาวคลื่น 217 นาโนเมตร

ตารางที่ ก1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายเลด (II) ไนเตรต

ความเข้มข้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)
1	0.0441
2	0.0952
3	0.1448
4	0.1953
5	0.2313
6	0.2763
7	0.3197



ภาพที่ ก1 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายเลด (II) ในเทรต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณ

1. การคำนวณหาร้อยละผลผลิตของสารไดอะตอมไมต์

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

2. การคำนวณหาความสามารถในการดูดซับ

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

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นของสารละลายเลด (II) ไนเตรต, แคดเมียม (II) ไนเตรต ก่อนการดูดซับ (mg/l)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายเลด (II) ไนเตรต, แคดเมียม (II) ไนเตรต หลังการดูดซับ (mg/l)

V = ปริมาตรของสารละลาย (l)

M = น้ำหนักของสาร (g)

3. การคำนวณค่าประสิทธิภาพการดูดซับ

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

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นของสารละลายเลด (II) ไนเตรต, แคดเมียม (II) ไนเตรต ก่อนการดูดซับ (mg/l)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายเลด (II) ไนเตรต, แคดเมียม (II) ไนเตรต หลังการดูดซับ (mg/l)

ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการทดลอง

1. ผลการศึกษาการดูดซับตะกั่วด้วยไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติและที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก

ตารางที่ ค1 ข้อมูลต่างๆที่ได้จากการทดลองใช้ไดอะตอมไมต์จากแหล่งธรรมชาติในการดูดซับตะกั่วในสารละลายเลด (II) ไนเตรต โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	ความเข้มข้น ก่อนดูดซับ (ppm)	น้ำหนักไดอะตอมไมต์(g)	ความเข้มข้น หลังดูดซับ (ppm)	ความสามารถใน การดูดซับ (mg/g)	ประสิทธิภาพใน การดูดซับ (%)
1	1	5.0002	0.0960	0.0090	90.40
2	2	5.0002	0.2680	0.0173	86.60
3	3	5.0000	0.5325	0.0247	82.25
4	4	5.0002	0.7730	0.0323	80.68
5	5	5.0002	0.9245	0.0408	81.51

ตารางที่ ค2 ข้อมูลต่างๆที่ได้จากการทดลองใช้ไดอะตอมไมต์ที่ปรับปรุงด้วยกรดในการดูดซับตะกั่วในสารละลายเลด (II) ไนเตรต โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	ความเข้มข้น ก่อนดูดซับ (ppm)	น้ำหนักไดอะตอมไมต์(g)	ความเข้มข้น หลังดูดซับ (ppm)	ความสามารถใน การดูดซับ (mg/g)	ประสิทธิภาพใน การดูดซับ (%)
1	1	5.0008	0.0220	0.0098	97.80
2	2	5.0002	0.0310	0.0197	98.45
3	3	5.0003	0.1050	0.0289	96.50
4	4	5.0000	0.1650	0.0384	95.87
5	5	5.0002	0.2570	0.0474	94.86

ภาคผนวก ง

ข้อมูลผลการทดลอง

1. การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของไดอะตอมไมต์ด้วย BET

Sample weight	: 0.0517 g.	Analysis gas	: NITROGEN
Adsorbate (DRP)	: Nitrogen	Bath Temp.	: 77.35
Outgas Temp	: 300 °C	Outgas Time	: 18.1 hrs.
Analysis Time	: 335.5 min		

ตารางที่ ง1 ข้อมูลจากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวไดอะตอมไมต์

P/Po	Volume [cc/g] STP	1 / (W ((Po/P) - 1))
2.3294e-01	4.4538	5.455E+01
2.5874e-01	4.9999	5.586E+01
2.8326e-01	5.6222	5.624E+01
3.0798e-01	6.1901	5.752E+01

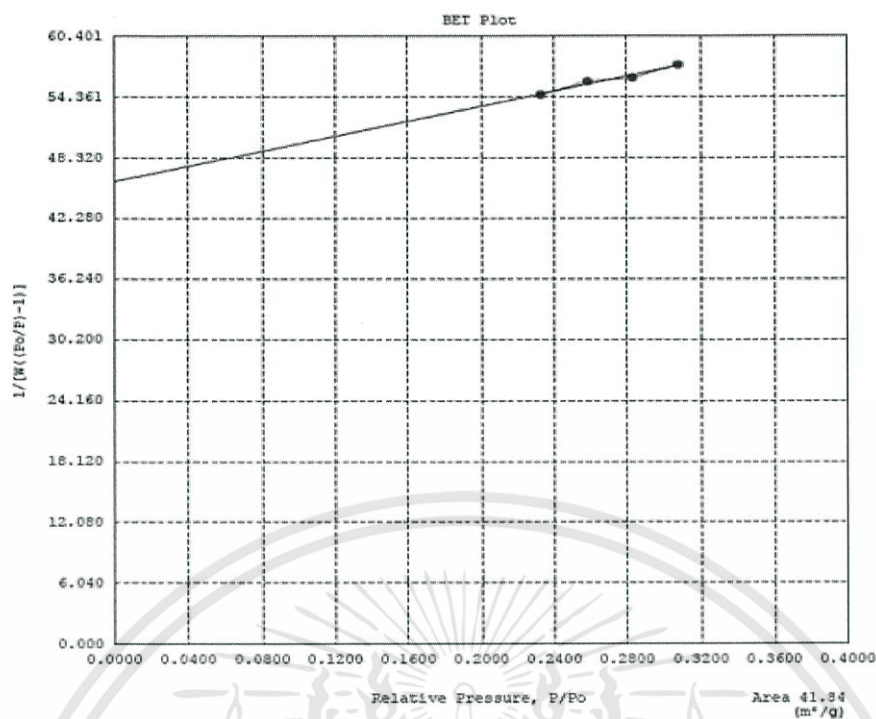
$$\text{Area} = 4.184\text{E}+01 \text{ m}^2/\text{g}$$

$$\text{Slope} = 3.727\text{E}+01$$

$$\text{Y - Intercept} = 4.595\text{E}+01$$

$$\text{Correlation Coefficient} = 0.982615$$

$$C = 1.811\text{E}+00$$



รูปที่ ง1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวที่ผิวไดอะตอมไมต์

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET	4.184E+01 m ² /g
Langmuir Surface Area	-1.384E+01 m ² /g
t-Method External Surface Area	1.904E+01 m ² /g
t-Method Micro Pore Surface Area	2.281E+01 m ² /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Diameter less than 31642.8 Å at P/Po = 0.99940	2.843E-02 cc/g
t-Method Micro Pore Volume	-3.991E-04 cc/g

PORE SIZE DATA A

average Pore Diameter	2.718E+01 Å
-----------------------	-------------

2.การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของผิวของไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก ด้วย BET

Sample weight	: 0.0364 g.	Analysis gas	: NITROGEN
Adsbate (DRP)	: Nitrogen	Bath Temp.	: 77.35
Outgas Temp.	: 300 °C	Outgas Time	: 11.6 hrs.
Analysis Time	: 267.9 min		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๖2 ข้อมูลจากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการปรับปรุง

P/Po	Volume [cc/g] STP	1 / (W ((Po/P) -1))
1.5791e-01	2.9391	5.105E+01
1.8330e-01	3.4837	5.155E+01
2.0824e-01	4.0008	5.260E+01

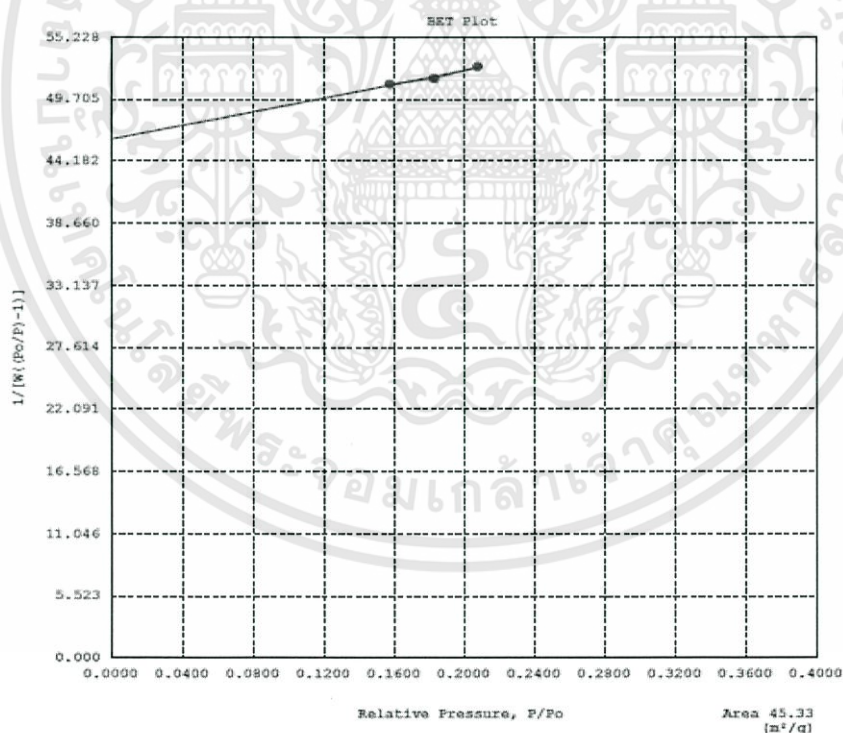
$$\text{Area} = 4.533\text{E}+01 \text{ m}^2/\text{g}$$

$$\text{Slope} = 3.071\text{E}+01$$

$$\text{Y - Intercept} = 4.611\text{E}+01$$

$$\text{Correlation Coefficient} = 0.978516$$

$$\text{C} = 1.666\text{E}+00$$



รูปที่ ๖2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการปรับปรุง

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET

4.533E+01 m²/g

Langmuir Surface Area

-3.903E+01 m²/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

t-Method External Surface Area	2.656E+01 m ² /g
t-Method Micro Pore Surface Area	1.878E+01 m ² /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Diameter less than 31642.8 Å at P/Po = 0.99940	3.848E-02 cc/g
t-Method Micro Pore Volume	-1.618E-03 cc/g

PORE SIZE DATA A

average Pore Diameter	3.396E+01 Å
-----------------------	-------------



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติผู้วิจัย

1.1 ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ-สกุล นาย มนต์รี ทองคำ.....

ตำแหน่งปัจจุบัน..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.

ประวัติการศึกษา

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

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) Methanol synthesis, Dimethyl Ether synthesis, Reaction and catalytic engineering.....

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ).....

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

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

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

การสังเคราะห์พลังงานเชื้อเพลิงทางเลือกโดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์บนตัวเร่งปฏิกิริยา

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

การสังเคราะห์พลังงานเชื้อเพลิงทางเลือกบนตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์(II) Ni(II)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

งานวิจัยที่กำลังดำเนินการ

เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ (ทุนพัฒนางานวิจัยประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ปีงบประมาณ 2556 : หัวหน้าโครงการวิจัย)

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

- 1 M. Thongkam, G. Yang, T. Vitidsant and N. Tsubaki. “Novel three-component zeolite capsule catalyst for direct synthesis of isoparaffin”, *Journal of the Japan Petroleum Institute* **52(4)**: 216-219 (2009).
- 2 B. Boonchom, M. Thongkam, S. Kongtaweelert, N. Vittayakorn. “A simple route to synthesize new binary cobalt iron cyclotetraphosphate $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ using aqueous and acetone media”, *Journal of Alloys and Compound*, **486**:689-692(2009).
- 3 B. Boonchom, M. Thongkam, S. Kongtaweelert, N. Vittayakorn. “Flower-like microparticles and novel superparamagnetic properties of new binary $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ obtained by a rapid solid state route at ambient temperature”, *Materials Research Bulletin*, **44**:2206-2210(2009).
- 4 Banjong Boonchom, Chanaiporn Danvirutai and Montree Thongkam. “Non-isothermal decomposition kinetics of synthetic serrabrancaite ($\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) precursor in N_2 atmosphere”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **99**:357–362(2010).
- 5 Banjong Boonchom and Montree Thongkam. “Kinetics and thermodynamics of the formation of $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ ”, *Journal of Chemical & Engineering Data.*, **55**: 211–216(2010).
- 6 Chesta Ruttanapun, Banjong Boonchom, Montree Thongkam, Samart Kongtaweelert, Chanchana Thanachayanont and Aree Wichainchai, “Electrical and optical properties of p-type $\text{CuFe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$ ($x = 0.03, 0.05$) delafossite-oxide “, *Journal of Applied Physics*, **113(2)**:2013.
- 7 Guohui Yang, Montree Thongkam, Tharapong Vitidsant, Yoshiharu Yoneyama, Yisheng Tan, Noritatsu Tsubaki. “A double-shell capsule catalysts with core-shell-like structure for one-step exactly controlled synthesis of dimethyl ether from CO_2 containing syngas”, *Catalysis Today*, **171**: 229-235 (2011).

บทความทางวิชาการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานที่นำเสนอในการประชุมนานาชาติ

1. M. Thongkam, B. Boonchom, T. Vitidsant, N. Tsubaki. "Catalytic Dehydration of Methanol to Dimethyl Ether from Synthesis Gas over Cr/ZnO Capsules Catalysts" The 2nd Asian Conference on Innovative Energy & Environmental Chemical Engineering, Phuket, Thailand (2010).
2. M. Thongkam, B. Boonchom, T. Vitidsant. "Synthesis and characterization of binary copper (II) cobalt(II) hydrogen phosphate hydrate" The 24th International Symposium on Chemical Engineering December 2-4, 2011, Hyundai Hotel, Gyeong-ju, Korea.
3. M.Thongkam, P. Suksomkit, S. Thongkam, B. Boonchom." **Synthesis and characterization of magnesium (II) cobalt(II) hydrogen phosphate**" The 25th International Symposium on Chemical Engineering December 14-15, 2012, Okinawa Convention Hall, Okinawa, Japan.
4. S.Thongkam, P. Suksomkit, M. Thongkam, B. Boonchom." **Preparation and characterization of copper (II) cobalt(II) hydrogen phosphate hydrate**" The 25th International Symposium on Chemical Engineering December 14-15, 2012, Okinawa Convention Hall, Okinawa, Japan.
5. S. Thongkam, Y. Yoneyama, N. Tsubaki, M. Thongkam." **Low-temperature Fischer-Tropsch synthesis in slurry-phase reactors on the catalytic performance of Ru-Co/SiO₂ catalysts**" The 4th Asian Conference on Innovative Energy & Environmental Chemical Engineering(ASCON-IEEChE) , November 9-12, 2014, The Ocean Resort, Yeosu, Korea(Rep.)
6. A. Konjareon, S. Thongkam, B. Boonchom, M. Thongkam." **Low-temperature synthesis of DME as a clean fuel over CuZnO/AlPO₄ nanocatalysts**" The 4th Asian Conference on Innovative Energy & Environmental Chemical Engineering(ASCON-IEEChE) , November 9-12, 2014, The Ocean Resort, Yeosu, Korea(Rep.)

ภาคผนวก จ



แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 2 รอบ 12 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2559

แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ) แหล่งเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์

๑ ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การดูดซับสารตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไดอะตอมไมต์

(ภาษาอังกฤษ) Adsorption of Lead from synthetic waste water by Diatomite

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2559

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2559

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดที่ 1 42,500 บาท 85 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ต/ว) 1 ต.ค. 58

งวดที่ 2 7,500 บาท 15 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ต/ว) 1 ก.ค. 59

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน

สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน

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

จำนวนเงินที่ได้รับและจำนวนเงินที่ใช้จ่าย

งวดเงินที่ได้รับ	จำนวนเงินที่ได้รับ(บาท)	เมื่อ (ระบุวัน เดือน ปี)
งวดที่ 1	42,500	1 ต.ค. 58
งวดที่ 2	7,500	1 ก.ค. 59
ดอกเบี้ย ครั้งที่ 1	-	-
ฯลฯ		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวม	50,000	①
-----	--------	---

งวดที่	จำนวนเงินที่ใช้จ่าย (บาท)	
งวดที่ 1	42,500	1 ต.ค. 58
งวดที่ 2	7,500	1 ก.ค. 59
ฯลฯ		-
รวม	50,000	②

จำนวนเงินคงเหลือ ① - ② 0 บาท

[Handwritten Signature]

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงินโครงการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้