



การดัดแปลงพื้นผิวตัวดูดซับสำหรับกำจัดไอออนตะกั่ว  
จากสารละลาย

Modification of Adsorbent Surface for Removal of  
Lead(II) Ion from Aqueous Solution

วริทย์ จันท์สุวรรณ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2559  
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

**ชื่อเรื่อง :** การดัดแปลงพื้นผิวดูดซับสำหรับกำจัดไอออนตะกั่วจากสารละลาย

**ผู้วิจัย :** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ

**พ.ศ. :** 2559

## บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้นำดินเหนียวมาทำการดัดแปรพื้นผิวทางเคมีด้วยแมงกานีสออกไซด์ โดยแมงกานีสออกไซด์ขนาดระดับไมโครเมตรเคลือบบนผิวของอนุภาคดินเหนียวทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้น เมื่อนำดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวดังกล่าวมาเป็นตัวดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลาย โดยวิธีแบทช์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับคือสภาวะ pH เท่ากับ 6 ความเข้มข้นของดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์เท่ากับ 5 g/L ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนตะกั่วอยู่ในช่วง 50-500 mg/L การประเมินรูปแบบการดูดซับโดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir), ฟรุนดิช (Freundlich) และดูบินิน-ราดัสเควิช (Dubinin-Radushkevich) พบว่าการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ไอโซเทอม พบว่าความสามารถสูงสุดของการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่ากับ 38.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิวพบว่าดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์มีความจุการดูดซับไอออนตะกั่วมากกว่าถึงประมาณ 38 เท่า จากไอโซเทอมของดูบินิน-ราดัสเควิชสามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์เป็นแบบเคมี ในขณะที่ดินเหนียวที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิวเป็นการดูดซับทางกายภาพ จากการศึกษาจลนศาสตร์เคมีของการดูดซับพบว่า การดูดซับไอออนตะกั่วด้วยที่ดินเหนียวที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo second order) โดยกลไกการดูดซับน่าจะเกิดจากกลไกทางเคมีที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง  $H^+$  และพันธะ  $MnO$  กับไอออนตะกั่วในสารละลาย

**คำสำคัญ:** การดูดซับ, ตะกั่ว, ดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์

**Title** : Modification of adsorbent surface for removal of lead(II) ion from aqueous solution

**Researcher** : Asst.Prof.Dr.Woravith Chansuvarn

**Year** : 2016

### ABSTRACT

The objective of this work was to study the adsorption efficiency of natural clay and its surface modified with manganese oxide for removal of Pb(II) ion. The adsorption of Pb(II) from aqueous solution onto raw natural clay (NC) and manganese oxide-modified natural clay (MnO-NC) was evaluated based on batch experiment. The adsorption efficiency of MnO-NC onto Pb(II) was investigated as a function of the initial pH of 6, equilibrium time of 30 min, adsorbent concentration of 5 g/L and initial concentration of Pb(II) solution in the range of 50-500 mg/L. The adsorption isotherms of Langmuir, Freundlich and Dubinin-Radushkevich were used to describe the equilibrium isotherm. It is observed that the data from MnO-NC adsorbents fitted well to the Langmuir isotherm. The maximum monolayer adsorption capacities of MnO-NC were estimated as 38.76 mg/g. By comparing with NC, the amount of Pb(II) adsorbed onto MnO-NC was more than NC by about 38 times under the optimized adsorption condition. According to Dubinin-Radushkevich isotherm, the adsorptive mechanism of Pb(II) onto MnO-NC was chemisorption, whereas the NC showed the mechanism as physical in nature. The kinetic studies of Pb(II) demonstrated that the adsorption of Pb(II) onto MnO-NC and NC adsorbents followed a pseudo second-order model with a good correlation. The adsorption mechanism was processed via chemical ion exchange between  $H^+$  and bonded MnO groups and Pb(II) ions in solution.

**Keywords:** Adsorption, lead, natural clay modified with MnO

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
ทฤษฎีการดูดซับ	4
การดูดซับทางกายภาพ	4
การดูดซับทางเคมี	5
สมดุลการดูดซับ	6
ไอโซเทอมของการดูดซับ	9
ทฤษฎีการดูดซับของ BET	11
จลนพลศาสตร์การดูดซับ	12
โลหะตะกั่ว	15
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
<b>บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย</b>	
เครื่องมือ	18
สารเคมี	18
วิธีการทดลอง	19

<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง</b>	
เอกลักษณ์ทางกายภาพ	22
ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว	25
ไอโซเทอมการดูดซับ	28
ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์	34
กลไกการดูดซับไอออนตะกั่ว	36
<b>บทที่ 5 อภิปรายผลการวิจัย</b>	37
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก	41
ประวัติผู้วิจัย	44



## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย จากงบประมาณรายได้ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี พ.ศ. 2559

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่อนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์และอุปกรณ์ต่าง ๆ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์และคำแนะนำ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อน พี่ และน้องทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ตลอดจนช่วยแก้ไข ปัญหาจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ประเภทไอโซเทอมการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด	7
รูปที่ 2.2 ประเภทไอโซเทอมของการดูดซับของ IUPAC	7
รูปที่ 4.1 สเปกตรัม FTIR ของ (ก) ดินเหนียวที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิว และ (ข) ดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์	23
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM (ก) ดินเหนียวที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิว และ (ข) ดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์	24
รูปที่ 4.3 ผลของ pH ของสารละลายต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว	25
รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว	26
รูปที่ 4.5 ผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว	27
รูปที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่ว	28
รูปที่ 4.7 กราฟไอโซเทอมของแลงเมียร์ของดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์	29
รูปที่ 4.8 กราฟไอโซเทอมของ Freundlich ของดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์	30
รูปที่ 4.9 กราฟไอโซเทอมของ Dubinin-Radushkevich ของดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์	31
รูปที่ 4.10 กราฟจลพลศาสตร์การดูดซับไอออนตะกั่ว (ก) pseudo-first-order, (ข) pseudo-second-order และ (ค) intra-particle diffusion	35

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ	5
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุใน NC และ MnO-NC ด้วยเทคนิค XRF	22
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET	23
ตารางที่ 4.3 ไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, และ Dubinin-Radushkevich	32
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดไอออนตะกั่ว	33
ตารางที่ 4.5 ปัจจัยของจลนพลศาสตร์การดูดซับไอออนตะกั่ว	34





# บทที่ 1

## บทนำ

### ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการพัฒนาอุตสาหกรรม หรือการใช้สารเคมี ปุ๋ยในเกษตรกรรมนับได้ว่าเป็นสภาพปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์เป็นอย่างมาก เพราะมนุษย์อาจได้รับผลกระทบเหล่านั้นโดยตรงเช่น การสูดดม การกลืนกิน การสัมผัสผ่านทางผิวหนัง เป็นต้น หรืออาจได้รับทางอ้อมเช่น การสะสมในห่วงโซ่อาหาร การปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เป็นต้น การปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำไม่ว่าจะเป็นแหล่งน้ำผิวดิน น้ำบาดาลหรือน้ำทิ้งอุตสาหกรรม เป็นปัญหาที่สำคัญต่อสิ่งแวดล้อม สิ่งมีชีวิตและมนุษย์ เนื่องจากโลหะหนักย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติได้ช้าและน้อยมาก ดังนั้นเมื่อมีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจะทำให้เกิดการสะสม เมื่อระยะเวลาผ่านไปปริมาณโลหะหนักที่สะสมอาจเพิ่มมากขึ้นและมีความเป็นพิษมากขึ้นด้วย ตะกั่ว (lead, Pb) เป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่มีอันตรายสูง การแพร่กระจายอาจเกิดจากหลายแหล่ง เช่นน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้ตะกั่วในกระบวนการผลิต อุตสาหกรรมสี แบตเตอรี่ ขยะอิเล็กทรอนิกส์ และอื่นๆ การปนเปื้อนสารตะกั่วในแหล่งน้ำเป็นอันตรายอย่างยิ่ง เนื่องจากจะเกิดการแพร่กระจายได้ง่าย การสะสมของตะกั่วในแหล่งน้ำยังส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหาร สัตว์น้ำ พืชน้ำ และจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์ ความเป็นพิษของสารตะกั่วเป็นอันตรายที่ร้ายแรง เมื่อเข้าไปสะสมในร่างกายของมนุษย์ปริมาณมากอาจทำให้ร่างกายทำงานผิดปกติมีผลถึงขั้นพิการและเสียชีวิตได้

ปัญหาการปนเปื้อนของสารตะกั่วในลำห้วยคลิตี้ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี เป็นตัวอย่างกรณีศึกษาที่สำคัญ สาเหตุปัญหาเกิดจากการรั่วไหลของหางแร่จากบ่อกักเก็บตะกอนกากแร่ของโรงแร่คลิตี้ของบริษัทเอกชน ได้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในหมู่บ้านคลิตี้ล่างจำนวนมาก จากผลรายงานพบว่าระดับตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน พืช ผัก มีระดับตะกั่วสูงเกินค่ามาตรฐาน และยังส่งผลกระทบต่อเด็กที่เกิดขึ้นพบว่ามียุติกาจำนวนมากมีพัฒนาการผิดปกติ สาเหตุหนึ่งที่สำคัญมาจากการใช้น้ำอุปโภค บริโภคของประชาชน เนื่องจากความเป็นพิษสูงของโลหะตะกั่ว องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้กำหนดปริมาณมากที่สุดที่มีได้ (maximum permissible limit) ในน้ำดื่มต้องไม่เกิน 3–10 ไมโครกรัมต่อลิตร (Shahid et al. 2012) สำหรับประเทศไทยได้กำหนดปริมาณตะกั่วในมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมไว้ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีการกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียหรือน้ำทิ้งอุตสาหกรรมมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) การกรองแบบอัลตราฟิลเตรชั่น (ultrafiltration) กระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าผ่านเยื่อกรอง (electrodialysis) กระบวนการออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) กระบวนการตกตะกอนและตกตะกอนด้วยเคมี (precipitation and coagulation) และกระบวนการดูดซับ (adsorption) (Fu and Wang, 2010) ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป แต่วิธีการดูดซับเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากการลงทุนไม่สูง แต่มีข้อจำกัดหลายประการเช่นกัน ดังนั้นการพัฒนาตัวดูดซับชนิดใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงและต้นทุนต่ำ วิธีการดูดซับเป็นปรากฏการณ์เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของแข็งโดยเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายระหว่างพื้นที่ผิวของของแข็ง การดูดซับจะเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือว่าความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นที่ผิวกับพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด ๆ อนุภาคสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่เป็นสารดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ตัวดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการบำบัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียมีอยู่หลายประเภท แม้ว่าถ่านกัมมันต์จะเป็นที่นิยมในการใช้เป็นตัวดูดซับ แต่เนื่องจากมีราคาสูงและมีการสูญเสียเกิดขึ้นระหว่างการกลับคืนสภาพ (regeneration) ได้มีการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือกากวัสดุอุตสาหกรรม (Giraldo-Gutiérrez and Moreno-Piraján, 2008; Mouni et al., 2011; Lo et al., 2012; Cechinel et al., 2014; Owamah, 2014, Jiang et al., 2009; Das et al., 2013) การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือของเสียทางอุตสาหกรรมได้นำมาเป็นสารดูดซับหรือปรับปรุงพื้นผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น ดินเหนียวหรือดิน (Jiang et al., 2009; Das et al., 2013) ไม้ไผ่ (Lo et al., 2012) กากชา (Amarasinghe and Williams, 2007) เปลือกข้าว (Wang, 2008; Naiya et al., 2009) เปลือกผลไม้ (Zein et al., 2010; Chong et al., 2013)

ในงานวิจัยนี้ได้สนใจนำดินเหนียวมาทำการตัดแปรพื้นผิวทางเคมีด้วยแมงกานีสออกไซด์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายโดยวิธีแบทช์ (batch) โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น pH ปริมาณตัวดูดซับ (adsorption dose) เวลา (equilibrium time) และอุณหภูมิ (temperature) การศึกษาอันดับจลนพลศาสตร์การดูดซับ (adsorptive kinetics) และศึกษาแบบจำลองการดูดซับ (adsorption isotherm)

## วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วโดยใช้ดินเหนียวที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์เป็นตัวดูดซับ

2) เพื่อศึกษากลไกการดูดซับไอออนตะกั่วโดยใช้ดินเหนียวที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ประสิทธิภาพการดูดซับของดินเหนียวที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์สำหรับการกำจัดไอออนตะกั่วในสารละลาย

2) กลไกการดูดซับไอออนตะกั่วโดยใช้ดินเหนียวที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารดูดซับ (adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิว (surface free energy) ต่ำจะถูกดูดซับได้ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างสารดูดซับกับสารดูดซับ ปริมาณการดูดซับขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ธรรมชาติของสารดูดซับกับสารดูดซับ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ พลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ และสภาวะการดูดซับ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้น ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับ (อาจเป็นของแข็งของเหลวหรือแก๊ส) กับสารดูดซับ (ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง) ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเข้มข้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง

การดูดซับเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส (interface) โดยที่มีภูมิภาคหนึ่งเป็นของแข็งเสมอ และเป็นภูมิภาคคายความร้อน โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวหน้าของของแข็งของสารดูดซับ ดังนั้นการดูดซับด้วยของแข็งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของของสารดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดที่พื้นผิวของของแข็งซึ่งเป็นสารดูดซับมีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของของเหลวนั้น การดูดซับบนผิวของแข็ง แบ่งออกได้ตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิดคือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

#### การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) อาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อนๆ เรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) หรือพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่สารดูดซับแทน การดูดซับทางกายภาพไม่มีแรงกระตุ้น (activation energy) มาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ง่ายและการดูดซับเกิดขึ้นกันได้หลายชั้น (multilayer) โดยแต่ละชั้นจะ

ซ้อนทับกันอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร และเกิดขึ้นได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำ

### การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมชั้นใหม่โดยมีพันธะเคมีที่แข็งแรง แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ มีพลังงานกระตุ้น (activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ยากและการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว

### ตารางที่ 2.1 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนของการดูดซับ 50-400 kJ/mol	ค่าความร้อนของการดูดซับประมาณ 20 kJ/mol หรือน้อยกว่า
เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง	เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ
ไม่เกิดการผันกลับ	เกิดการผันกลับได้เป็นส่วนใหญ่
เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว	เกิดการดูดซับหลายชั้น
มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้อง	ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้องในกระบวนการ
แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดที่แข็งแรง (เกิดพันธะเคมี)	แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ (แรงแวนเดอร์วาลส์)

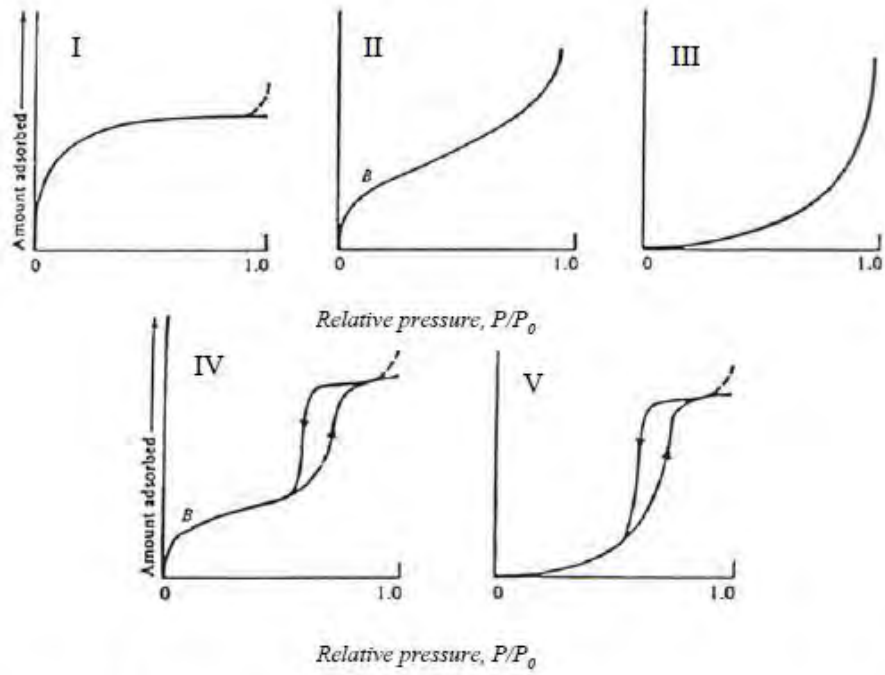
นอกจากการแบ่งประเภทการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีแล้วยังอาจแบ่งประเภทการดูดซับตามกลไกเพิ่มเติมได้อีก คือ การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (exchange adsorption) เป็นการดูดซับที่อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณผิว เมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงกันข้าม และการดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (specific adsorption) เกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึด

เหนียวของโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวดูดซับ พฤติกรรมการดูดซับนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพและเคมี

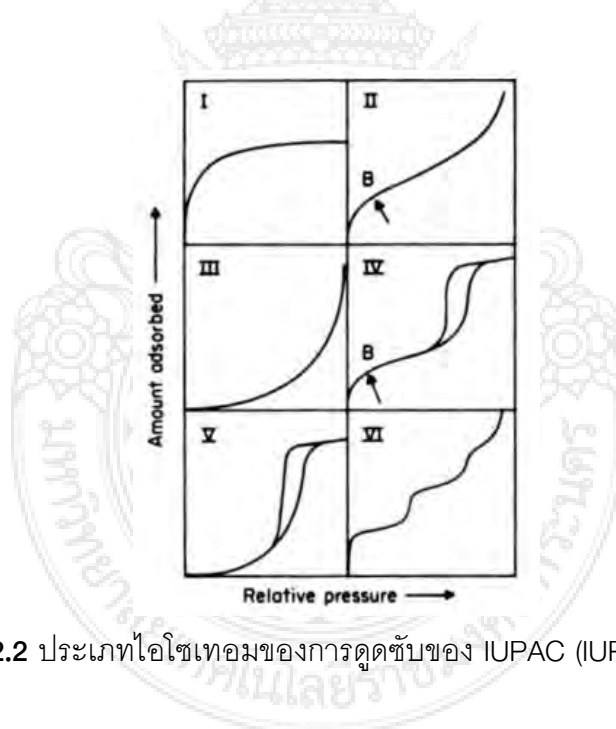
### สมดุลการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของเหลวกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนวัฏภาคของแข็ง กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ โดยสารที่ถูกดูดซับและมีการคายการดูดซับ (desorption) ไปพร้อมกัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ โดยการแสดงด้วยรูปกราฟ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งเป็นตัวแทนในการอธิบายการกระจายตัวของตัวถูกดูดซับระหว่างวัฏภาคของเหลวและของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุลและจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหรือคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับขึ้น โมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่สามารถจะเกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิวตัวดูดซับอ่อนลงเนื่องจากตำแหน่งพื้นผิวมีน้อยลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้โดยทำให้เกิดเป็นการดูดซับชั้นที่สองหรือชั้นที่สามเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดการดูดซับชั้นที่สองก่อนที่ชั้นแรกจะเต็มทุกตำแหน่งและในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงขึ้น รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายแบบแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ ชนิดสารที่ถูกดูดซับ และอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิวของสารดูดซับ ในปี ค.ศ.1940 ได้มีการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับของสมดุลวัฏภาคแก๊สกับของแข็งขึ้นโดย Brunauer, Deming, Deming และ Teller เรียกว่า BDDT ได้แบ่งลักษณะไอโซเทอมการดูดซับออกเป็น 5 แบบ ดังรูปที่ 2.1 (Wang et al., 2012) ซึ่งการแบ่งประเภทไอโซเทอมการดูดซับของ BDDT ได้เป็นหลักในการแบ่งประเภทไอโซเทอมการดูดซับของ IUPAC และปัจจุบันได้มีการเสนอประเภทไอโซเทอมการดูดซับเพิ่มอีก 1 ประเภท ซึ่งทำให้ไอโซเทอมการดูดซับของ IUPAC สมบูรณ์ เป็น 6 ประเภท ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ประเภทไอโซเทอมการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด (Wang et al., 2012)



รูปที่ 2.2 ประเภทไอโซเทอมของการดูดซับของ IUPAC (IUPAC, 1985)

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแต่ละประเภทอธิบายได้ดังนี้

- แบบ I เป็นไอโซเทอมของการดูดซับลักษณะเฉพาะของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า 2 nm (microporous adsorbent) การดูดซับส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก ลักษณะไอโซเทอมจะเป็นโค้งเข้า (concave) หากแกน  $P/P_0$  สารดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก สารดูดซับมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อย ดังนั้นการดูดซับจะถูกจำกัดเนื่องจากไม่สามารถเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ การบรรจุโมเลกุลลงในรูขนาดเล็กของสารดูดซับนี้ได้อย่างสมบูรณ์ และมีการอิ่มตัวที่แน่นอนโดยเกิดการเรียงเป็นชั้นเดียว ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Langmuir หรือ L-shape isotherm
- แบบ II เป็นรูปแบบปกติของไอโซเทอมที่เกิดในสารดูดซับที่ไม่มีรูพรุน (nonporous) หรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (microporous) โดยในแบบนี้จะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) อย่างสมบูรณ์ก่อนจึงเกิดเป็นหลายชั้น (multilayer) ในต่อมา จากไอโซเทอมตรงบริเวณจุดเปลี่ยนโค้งหรือจุด B (break through) จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียวนั้นเสร็จสมบูรณ์ จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Sigmoid หรือ S-shape isotherm)
- แบบ III เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก จากกรณีนี้จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ ในแบบที่ III จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบ II ซึ่งเส้นกราฟจะโค้งออก (convex) จากแกน  $P/P_0$  จำนวนสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างไม่จำกัด ซึ่งเป็นแบบพิเศษ
- แบบ IV เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer) ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าเต็มใน รูพรุนอีกครั้ง และการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่น ภายในรูพรุนของ



- ของแข็ง (Capillary Condensation in Pores) โดยลักษณะของกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับชนิดที่ 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้ง จะแสดงถึงการดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์
- แบบ V เป็นไอโซเทอมรูปแบบพิเศษ มีความคล้ายกับแบบ III เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีค่าน้อย ซึ่งจะพบในสารดูดซับที่มีขนาดรูพรุนในช่วงเดียวกับไอโซเทอมแบบ IV สำหรับไอโซเทอมแบบ III และแบบ V นี้จะคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยากเนื่องจากชั้นการดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์
- แบบ VI เป็นการดูดซับแบบ multilayer เป็นชั้น ๆ ขึ้นบนผิวของ nonporous โดยความสูงของแต่ละชั้นจะเป็นความสามารถของ monolayer ในชั้นนั้น ๆ

### ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใด ๆ

#### 1) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ.1916 แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายสุดโดยมีสมมติฐานคือ

- 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)
- 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนแน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน
- 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ
- 4) โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้

สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่าย ๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง ในขณะที่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการ

ดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และ จะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ ดังนี้

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad \dots\dots(2.1)$$

เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ(g) ที่ภาวะสมดุล หรือเรียกว่าหรือ ค่าการดูดซับที่สมดุล

$q_m$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer)

$b$  คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

สมการ 2.2 จัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรง คือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad \dots\dots(2.2)$$

จากสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ (สมการ 2.3) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  ค่า  $q_m$  และ  $b$  หาได้จากความชัน (slope) และจุดตัดแกน (intercept) สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังอาจ แสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (separation factor or equilibrium parameter,  $R_L$ ) ดังสมการ

$$R_L = \frac{1}{1 + b C_0} \quad \dots\dots(2.3)$$

เมื่อ  $C_0$  คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) โดยค่า  $R_L$  จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า  $R_L > 1$  การดูดซับไม่ดี (unfavorable),  $R_L = 1$  การดูดซับเป็นเส้นตรง (linear),  $0 < R_L < 1$  การดูดซับดี (favorable) และ  $R_L = 0$  การดูดซับเกิดผันกลับได้ (irreversible)

## 2) ไอโซเทอมแบบ Freundlich (Freundlich isotherm)

สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นที่ผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอมแบบ Freundlich เป็นไอโซ

เทอมที่พัฒนาจากไอโซเทอมแบบแลงก์เมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว (heterogeneous) โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (multilayer)

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad \dots\dots(2.4)$$

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad \dots\dots(2.5)$$

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

$q_e$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

$K_F$  คือค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

$n$  คือค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $\log K_F$  จากสมการการดูดซับแบบ Freundlich ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากความชันของกราฟระหว่าง  $\log C_e$  กับ  $\log q_e$  โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก หรือค่า  $n$  น้อยแสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูง ๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ค่า  $1/n$  อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับ ถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง แต่ค่ามากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และถ้าน้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

### ทฤษฎีการดูดซับของ BET

ในปี ค.ศ.1938 Brunauer, Emmett และ Teller ได้ทำการปรับปรุงสมการของ Langmuir เพื่อให้อธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น เรียกว่า สมการของ BET สมมติฐานเบื้องต้นของสมการนี้คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับในชั้นแรกจะเป็นพื้นผิวในการเกาะของสารที่ถูกดูดซับในชั้นที่สองและชั้นต่อ ๆ ไป ดังนั้นโมเลกุลในชั้นที่สองจะเกาะอยู่บนสารที่ถูกดูดซับไม่ใช่พื้นผิวของการดูดซับ จึงเหมือนอยู่ในภาวะอิมมัตวของของเหลว แตกต่างจากในชั้นแรกที่มีโมเลกุลสัมผัสกับพื้นผิวของสารดูดซับโดยตรง

$$\frac{1}{W \left( \frac{P_0}{P} \right) - 1} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C-1 \left( \frac{P_0}{P} \right)}{W_m C} \quad \dots\dots(2.6)$$

- เมื่อ  $P$  คือความดันของการดูดซับ  
 $P_0$  คือความดันอิ่มตัว  
 $W$  คือน้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับ  
 $W_m$  คือน้ำหนักของสารที่ปกคลุมเต็มชั้นหนึ่ง  
 $C$  คือค่าคงที่

ในปัจจุบันการใช้สมการการดูดซับของ BET เพื่อหาขนาดพื้นที่ของตัวดูดซับได้รับการยอมรับทั่วไป ซึ่งพื้นที่ผิวสามารถหาได้จากการหาปริมาณแก๊สดังกล่าวมาเปลี่ยนจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ปกคลุมพื้นผิวเต็มหนึ่งชั้น คูณด้วยพื้นที่สำหรับการปกคลุมด้วยแก๊สหนึ่งโมเลกุล จากนั้นนำพื้นที่ทั้งหมดไปหารด้วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่นำมาทดสอบจะได้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับนั้น สมการ BET นี้ใช้ได้ในช่วงความดันสัมพัทธ์ไม่เกิน 0.2 การหาพื้นที่ผิว (surface area) โดยวิธี BET เป็นการวัดพื้นที่ผิวโดยการคำนวณการดูดซับของแก๊ส คือการสร้างไอโซเทอมของการดูดซับ สภาวะที่เกิดการดูดซับทางกายภาพ โดยใช้การดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่ำ เส้นไอโซเทอมของการดูดซับจะเป็นเส้นตรงความชันและจุดตัดบนแกนจะให้ปริมาณของแก๊สซึ่งใช้เพื่อจัดโมโนเลเยอร์ เมื่อรู้พื้นที่ของแต่ละโมเลกุลสามารถคำนวณพื้นที่ของการดูดซับได้

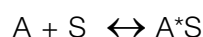
### จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมกันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (pseudo-first order) และอันดับสอง (pseudo-second order) ซึ่งเป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ นอกจากนี้ยังพบขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนของสารดูดซับมีส่วนสำคัญในขั้นตอนการดูดซับ ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุน (intraparticle diffusion) จึงเป็นอีกสมการจลนพลศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้อธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วย

### 1) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง

จากสมมุติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับและการดูดซับเป็นการ

ดูดซับทางเคมี สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren จากปฏิกิริยาการดูดซับ



โดยที่ A คือ ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) และ S คือตัวดูดซับ (adsorbent) และ A\*S คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (adsorbed compound) สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง ได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad \dots\dots(2.7)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (นาที่<sup>-1</sup>)

$q_t$  คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (mg/g)

$q_e$  คือค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สมดุล (mg/g)

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.7) โดยมีขอบเขตตั้งแต่  $t=0$  จนถึง  $t=t$  และตั้งแต่  $q_t=0$  จนถึง  $q_t=t$  จะได้สมการคือ

$$\log \frac{q_e}{q_e - q_t} = \frac{k_1}{2.303} t \quad \dots\dots(2.8)$$

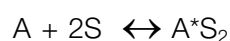
จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad \dots\dots(2.9)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log(q_e - q_t)$  กับ  $t$  จะได้ความชันเท่ากับ  $-k_1/2.303$  และได้จุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log q_e$

## 2) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

สมการจลนพลศาสตร์สำหรับอธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่นิยมอีกสมการหนึ่งคือสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง บนสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับ



สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองสามารถเขียนอัตราเร็วการดูดซับได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad \dots\dots(2.10)$$

โดยที่  $k$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (นาที่<sup>-1</sup>)

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.10) โดยมีขอบเขตตั้งแต่  $t=0$  จนถึง  $t=t$  และตั้งแต่  $q_t=0$  จนถึง  $q_t=t$  จะได้สมการคือ

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} - k_2 t \quad \dots\dots(2.11)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad \dots\dots(2.12)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/q_t$  กับ  $t$  จะได้ความชันเท่ากับ  $1/q_e$  และได้จุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/k_2 q_e^2$

### 3) การแพร่ภายในรูพรุน (intraparticle diffusion)

จลนพลศาสตร์การดูดซับนอกจากจะสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่ผิวตัวดูดซับแล้ว จลนพลศาสตร์การดูดซับอาจจะสอดคล้องกับการแพร่ภายในรูพรุนด้วย ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุนจึงเป็นอีกสมการหนึ่งที่ถูกใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับ สมการการแพร่ภายในรูพรุนของ Weber และ Morris สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$q_t = k_i t^{0.5} + C \quad \dots\dots(2.13)$$

โดยที่  $k$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (mg/g min) เมื่อเขียนระหว่าง  $q_t$  กับ  $t^{0.5}$  จะได้ความชันของกราฟเท่ากับ  $k_i$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $C$  ซึ่งค่า  $C$  จะบอกถึงผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์ม ยิ่งค่า  $C$  มากผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์มยิ่งมาก

## โลหะตะกั่ว

โลหะหนัก (heavy metal) หมายถึงโลหะที่มีความหนาแน่นเกินกว่า  $5 \text{ g/cm}^3$  โลหะตะกั่ว (lead) สัญลักษณ์ธาตุคือ Pb เป็นธาตุที่มีอยู่ในธรรมชาติที่จัดอยู่ในหมู่ที่ IV ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 82 เลขมวล 207.19 จุดหลอมเหลว (melting point)  $3,640^\circ\text{C}$  จุดเดือด (boiling point)  $1,749^\circ\text{C}$  ตะกั่วมีสมบัติทางกายภาพและเคมีคล้ายดีบุก นำมาทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย ทนต่อการผุกร่อนได้ดี ละลายน้ำได้น้อย ในธรรมชาติตะกั่วมีกำเนิดจากหินอัคนีและหินแปรมีประมาณ 10–20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบในรูปของสารประกอบตะกั่วซัลไฟด์ ตะกั่วซัลเฟต ตัวอย่างแร่ที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ แร่ galenite หรือ galena ซึ่งเป็นซัลไฟด์ของตะกั่ว แร่ cerussite ( $\text{PbCO}_3$ ), anglesite ( $\text{PbSO}_4$ ), pyromorphit ( $\text{PbCl}_2 \cdot 3\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ ), minium ( $\text{Pb}_3\text{O}_4$ ), wulfenite ( $\text{PbMnO}_4$ ), crocote ( $\text{PbCrO}_4$ ), ZnS และ pyrite

ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีลักษณะอ่อนทำให้หลอมเหลวได้ง่ายและสามารถพิมพ์แบบออกมาเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ดี จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย มีการนำตะกั่วมาใช้ตั้งแต่สมัยโบราณ ในปัจจุบันก็ยังมีการใช้ตะกั่วในงานต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย ภาวะตะกั่วเป็นพิษเป็นโรคที่พบได้บ่อยในประเทศไทย อาการของตะกั่วเป็นพิษเป็นอาการที่เกิดขึ้นกับอวัยวะหลายระบบและคล้ายกับอาการของโรคอื่น ๆ

ตะกั่วเป็นสารที่พบปนเปื้อนทั่วไป ในสมัยอดีตเด็กเป็นโรคพิษตะกั่วจากการรับประทานสีทาบ้าน หรือใช้มือจับของที่ติดสีดังกล่าว ในปัจจุบันสีทำด้วยตะกั่วมีน้อยลง แหล่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดพิษสำหรับผู้ใหญ่คือจากอุตสาหกรรมได้แก่ โรงงานทำแบตเตอรี่และโรงงานอื่น ๆ ที่มีการใช้ตะกั่วอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ สำหรับประชาชนโดยทั่วไปอาจได้รับตะกั่วจากอากาศ ซึ่งมักมีตะกั่วปนเปื้อนจากการใช้เตตระเอทิลเลด (tetraethyl lead) ในน้ำมันรถยนต์ นอกจากนี้ยังมีแหล่งอื่น ๆ อีกจำนวนมากที่อาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะตะกั่วเป็นพิษได้แก่ หัวกระสุนตะกั่วที่ตกค้างในร่างกาย การทำงานในสนามยิงปืน ยาสูบไซเปร หมึก แป้งทาตัวเด็ก (จ๋ยฮู้) ภาชนะเซรามิกส์ ที่มีตะกั่ว ท่อประปาที่ทำด้วยตะกั่ว ผลิตภัณฑ์จากแบตเตอรี่และอาหารที่มีตะกั่วปนเปื้อน เหล้าไวน์ เครื่องยนต์ที่ใช้ตะกั่วเป็นส่วนประกอบ การเจียรในพลอยที่ใช้จานตะกั่ว ตะกั่วที่ใช้เป็นตัวพิมพ์หนังสือ ตะกั่วถ่วงน้ำหนักม่าน สีที่ทาของใช้ของเด็ก เป็นต้น

ตะกั่วเป็นธาตุที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมทั่ว ๆ ไป ปกติผู้ใหญ่จะรับประทานอาหารโดยมีตะกั่วปนเปื้อนอยู่ด้วยประมาณวันละ 150 ไมโครกรัม อาหารเด็กอาจมีตะกั่วปนประมาณวันละ 100 ไมโครกรัมและรับตะกั่วในน้ำดื่มประมาณ 100 ไมโครกรัมต่อวัน นอกจากนี้คนเรายังรับตะกั่ว

ทางการหายใจ โดยทั่วไปอากาศอาจจะมีปริมาณตะกั่ว 1-2 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ประมาณกันว่าถ้าปริมาณตะกั่วในอากาศ 1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะทำให้ตะกั่วในเลือดสูงขึ้น 1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์ลิตร โดยสรุปคนหนึ่งอาจรับตะกั่วเข้าไปในร่างกายวันละ 0.1-2 มิลลิกรัม ในจำนวนนี้ประมาณ ร้อยละ 75 เข้าทางทางเดินอาหารและร้อยละ 25 เข้าทางการหายใจ การดูดซึมตะกั่วไปทางเดินอาหาร ผู้ใหญ่จะดูดซึมเข้าไปในร่างกายประมาณร้อยละ 10 ส่วนเด็กจะดูดซึมมากกว่าถึงร้อยละ 40 ดังนั้นเด็กที่รับประทานสารที่ปนเปื้อนตะกั่วทางปากอาจจะมีอาการเป็นพิษมากกว่า ส่วนตะกั่วที่เข้าไปในทางเดินหายใจ ถ้าขนาดของผงฝุ่นที่มีตะกั่วยิ่งเล็กลงการดูดซึมนั้นก็ยิ่งมาก ผงฝุ่นตะกั่วที่เล็กกว่า 0.5 ไมโครเมตร ร่างกายสามารถดูดซึมได้ถึงร้อยละ 90 การกระจายของตะกั่วในร่างกาย เนื่องจากปกติตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายจะถูกกำจัดออกไปช้า ๆ ผลทำให้ตะกั่วมีการสะสมขึ้นในคนทั่วไปตะกั่วอาจจะสะสมในร่างกายประมาณ 200 มิลลิกรัม ส่วนในคนงานที่ทำงานเกี่ยวกับสารตะกั่วอาจจะสะสมถึง 500 มิลลิกรัม

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sari et al. (2007) ได้ใช้ดินเหนียวจากเมือง Celtek ประเทศตุรกี ซึ่งเป็นดินที่ใช้ทำอิฐก่อสร้าง ดินเหนียว Celtek เป็นตัวดูดซับไอออนตะกั่วและโครเมียมโดยวิธีแบทช์ ปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับ คือปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัม ที่ pH 6 ระยะเวลาในการกวนที่ 30 นาที พบว่าพฤติกรรมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมของ Langmuir ดีกว่าไอโซเทอมของ Freundlich พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุด (maximum monolayer adsorption capacity,  $q_m$ ) สำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 18.08 mg/g สอดคล้องกับรายงานของ Ozdes et al. (2011) ใช้ดินเหนียวแร่อิลไลต์ (illite clay) ประเทศตุรกีสำหรับดูดซับไอออนตะกั่วและโครเมียม พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 53.76 mg/g ในสภาวะปริมาณดิน 1.0 g/L pH เท่ากับ 4 และระยะเวลาการกวน 240 นาที

ดินเหนียวแร่ kaolinite ได้นำมาใช้กำจัดไอออนตะกั่วโดยวิธีการดูดซับ Gupta et al. (2005) พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 11.52 mg/g Jiang et al. (2009) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วระหว่างดินเหนียวแร่ kaolinite ธรรมชาติกับดินเหนียวแร่ kaolinite ที่ผ่านการดัดแปลงพื้นผิว พบว่าดินเหนียวแร่ kaolinite ที่ผ่านการดัดแปลงพื้นผิวมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนตะกั่วดีกว่าประมาณ 4.5 เท่า พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 4.73 mg/g และ 32.2 mg/g สำหรับดินเหนียวแร่ kaolinite ธรรมชาติและ



ดินเหนียวแร่ kaolinite ที่ผ่านการดัดแปลงพื้นผิว ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานของ [Jiang et al. \(2010\)](#) ที่ทดสอบดินเหนียวแร่ kaolinite ธรรมชาติ ประเทศจีน ดูดซับไอออนตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิล และทองแดง พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 2.35 mg/g



## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือ (apparatus)

- 1) อะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (AAS), iCE3000 series, Thermo Scientific, USA
- 2) เตาอบไฟฟ้า, Binder FD115, Germany
- 3) เครื่องชั่งละเอียด, AND HM-200, Japan
- 4) Magnetic stirrer, CAT M6, SCHOTT, Germany
- 5) pH meter, Lab860, SCHOTT, Germany
- 6) Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), Nicolet 6700, Thermo Scientific, USA
- 7) X-ray fluorescence (XRF), Horiba Japan
- 8) Scanning electron microscope (SEM), JEOL, USA
- 9) Centrifuge, PLC-012E Universal centrifuge, USA
- 10) BET (BELSORP-mini, BEL, Japan)

#### 3.2 สารเคมี (reagents)

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองเป็นเกรดวิเคราะห์ (reagent grade)

- 1) Lead(II) nitrate ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ), QRec, New Zealand
- 2) Nitric acid (70%  $\text{HNO}_3$ ), BDH, England
- 3) Sulfuric acid (99%  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), BDH, England
- 4) Sodium hydroxide ( $\text{NaOH}$ ), QRec, New Zealand
- 5) Manganese chloride ( $\text{MnCl}_2$ ), QRec, New Zealand
- 6) Hydrochloric acid ( $\text{HCl}$ )
- 7) Acetic acid ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )
- 8) Sodium acetate ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ )

### 3.3 วิธีการทดลอง (methodology)

#### 3.3.1 การเตรียมดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์

นำดินเหนียวอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วบดให้ละเอียด คัดเลือกขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 500 ไมโครเมตร แล้วเก็บในเดซิเคเตอร์ การเตรียมดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ (MnO-NC) ดำเนินตามขั้นตอนจากรายงานวิจัยของ Sari and Tuzen (2013) โดยนำดินเหนียว 15 กรัมผสมกับ 100 mL ของ 6 mol/L NaOH แล้วกระตุ้นโดยให้ความร้อนที่ 90°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นรินสารทั้งหมดที่ผ่านการกระตุ้นลงในสารละลาย  $MnCl_2$  ปริมาตร 100 mL (ปรับค่า pH เป็น 2 ด้วย HCl) แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองจะได้ตะกอน  $Mn(OH)_2$  บนผิวของอนุภาคดินเหนียว แล้วนำตะกอนผสมกับ 100 mL ของ 6 mol/L NaOH แล้วตั้งทิ้งให้สัมผัสกับอากาศมากที่สุดเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วทำการกรองและล้างตะกอนหลาย ๆ รอบ จนกระทั่งน้ำล้างตะกอนเป็นกลาง แล้วจึงอบตะกอนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บในเดซิเคเตอร์ก่อนนำไปใช้เป็นตัวดูดซับ

#### 3.3.2 การทดสอบเอกลักษณ์

ดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ทำการทดสอบเอกลักษณ์โดยการศึกษาหมู่ฟังก์ชันโดยวิธี FTIR และการหาพื้นที่ผิวและรูพรุนโดยวิธี BET และตรวจเอกลักษณ์พื้นผิวด้วยเทคนิค SEM และหาองค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค XRF

#### 3.3.3 การหาประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (point of zero charge, pzc)

นำดินปริมาณ 0.1 กรัม ใส่ในหลอดเซนติฟิวส์ PETE ขนาด 50 mL ปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 3.0 ถึง pH 12.0 ด้วยสารละลายกรดไนตริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำไปกวนที่ความเร็วคงที่ 700 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นวัดค่า pH ของสารละลาย เขียนกราฟระหว่างค่า pH เริ่มต้น (initial pH) และสุดท้าย (final pH) ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับหาได้จากวิธีการแบบดริฟท์เทส (drift test)

#### 3.3.4 การศึกษาการดูดซับโลหะตะกั่ว

ซึ่งดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ใส่ในหลอดเซนติฟิวส์ PETE ขนาด 50 mL เติมสารละลายโลหะตะกั่วเข้มข้น 20 mg/L ปริมาตร 10 mL กวนโดยใช้เครื่องกวนสารละลายที่ความเร็วรอบคงที่ 700 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นแยกสารละลายโดยการหมุนเหวี่ยงที่

ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที แล้วกรองผ่านกระดาษกรอง สารละลายที่ได้ นำไปวัดปริมาณไอออนตะกั่วที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ประสิทธิภาพของการดูดซับไอออนตะกั่วของดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ โดยการเปรียบเทียบปริมาณไอออนตะกั่วก่อนและหลังการดูดซับด้วยดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ ประสิทธิภาพของการดูดซับไอออนตะกั่วคำนวณจากสมการ

$$AC = \frac{(C_0 - C_e)}{mass} \times V \quad \dots\dots(3.1)$$

$$\%RE = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad \dots\dots(3.2)$$

เมื่อ AC คือ ปริมาณของโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (adsorption capacity)

RE คือ ประสิทธิภาพการกำจัด (removal efficiency)

$C_0$  คือ ความเข้มข้นไอออนตะกั่ว (mg/L) เริ่มต้น

$C_e$  คือ ความเข้มข้นไอออนตะกั่ว (mg/L) ที่สมดุล

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)

mass คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

### 3.3.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว

#### 1) ปัจจัย pH

- ดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ 0.10 กรัม ใส่ในหลอด PETE ขนาด 50 mL เติมสารละลายมาตรฐานไอออนตะกั่วเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 10 mL ที่ปรับค่า pH เป็น 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ด้วย dil.HNO<sub>3</sub> และ dil.NaOH
- กวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 60 นาที
- กรองสารละลายแล้วนำสารละลายไปวัดปริมาณไอออนตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

#### 2) ระยะเวลาสัมพัทธ์ (equilibrium time)

- ดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ 0.10 กรัม ใส่ในหลอด PETE ขนาด 50 mL เติมสารละลายมาตรฐานไอออนตะกั่วเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 10 mL ที่ pH ของสารละลาย เท่ากับ 6

- กวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที

- กรองสารละลายแล้วนำสารละลายไปวัดปริมาณไอออนตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

### 3) ปริมาณของตัวดูดซับ (adsorbent dosage)

- ดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์น้ำหนักที่แตกต่างกันคือ 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 กรัม ใส่ในหลอด PETE ขนาด 50 mL เติมสารละลายมาตรฐานไอออนตะกั่วเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 10 mL ที่ pH ของสารละลายเท่ากับ 6

- กวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 60 นาที

- กรองสารละลายแล้วนำสารละลายไปวัดปริมาณไอออนตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

### 4) ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่ว

- ดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ 0.10 กรัม ใส่ในหลอด PETE ขนาด 50 mL เติมสารละลายมาตรฐานไอออนตะกั่วเข้มข้นตั้งแต่ 20-200 mg/L ปริมาตร 10 mL ที่ pH ของสารละลายเท่ากับ 6

- กวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 60 นาที

- กรองสารละลายแล้วนำสารละลายไปวัดปริมาณไอออนตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

### 5) การศึกษาอุณหภูมิ

- ดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ 0.10 กรัม ใส่ในหลอด PETE ขนาด 50 mL เติมสารละลายมาตรฐานไอออนตะกั่วเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 10 mL ที่ pH เท่ากับ 6

- กวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60°C

- กรองสารละลายแล้วนำสารละลายไปวัดปริมาณไอออนตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

#### 4.1 เอกลักษณะทางกายภาพของดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

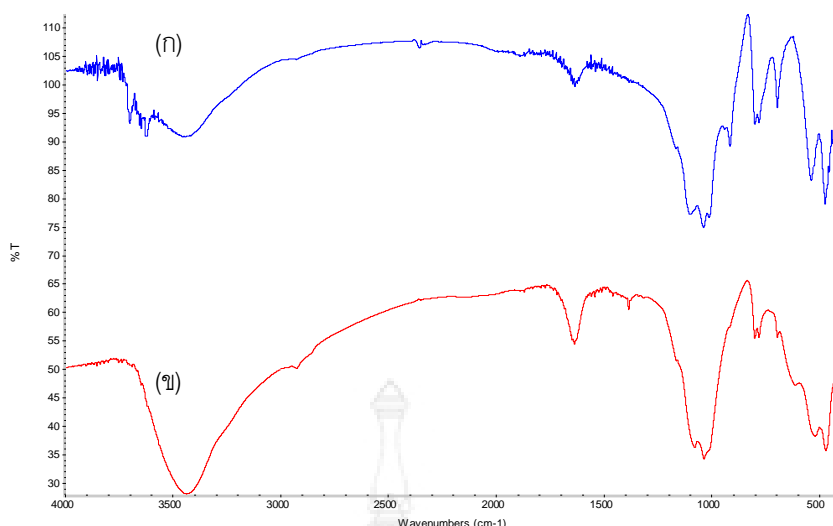
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในดินเหนียวที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิว (NC) และดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ (MnO-NC) ด้วยเทคนิค X-ray fluorescence แสดงดังตารางที่ 4.1 การเปลี่ยนทางกายภาพของดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์จะเป็นสีน้ำตาลเข้มถึงดำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแมงกานีสออกไซด์ได้เคลือบบนผิวของดินเหนียวอย่างสมบูรณ์ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ พบว่าปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการดัดแปรพื้นผิว พบว่าปริมาณแมงกานีสทั้งหมด ( ) ในดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ เท่ากับ 0.24 gMn/gMnO-NC

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุใน NC และ MnO-NC ด้วยเทคนิค XRF

ธาตุองค์ประกอบ	NC	MnO-NC
SiO <sub>2</sub>	68.73%	22.53%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.08%	3.19%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.03%	10.68%
TiO <sub>2</sub>	1.11%	0.24%
CaO	0.46%	0.23%
K <sub>2</sub> O	0.37%	0.004%
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.28	61.73%
ZrO <sub>2</sub>	0.11%	0.028%

##### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR

สเปกตรัมการวิเคราะห์ดินเหนียวที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิว (NC) และดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ (MnO-NC) ด้วยเทคนิค FTIR แสดงดังรูปที่ 4.1



**รูปที่ 4.1** สเปกตรัม FTIR ของ (ก) ดินเหนียวที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิว และ (ข) ดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์

#### 4.1.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET

การวิเคราะห์พื้นที่ผิว (surface area) ปริมาตรรูพรุน (pore volume) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (average pore size) ด้วยเทคนิค BET ของดินเหนียวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าพื้นที่ผิวของดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์มีปริมาณมากกว่าดินเหนียวที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิวประมาณ 10 เท่า ขนาดรูพรุนของดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์มีขนาดเล็กกว่าดินเหนียวที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิวน่าจะเป็นผลมาจากการเคลือบแมงกานีสออกไซด์

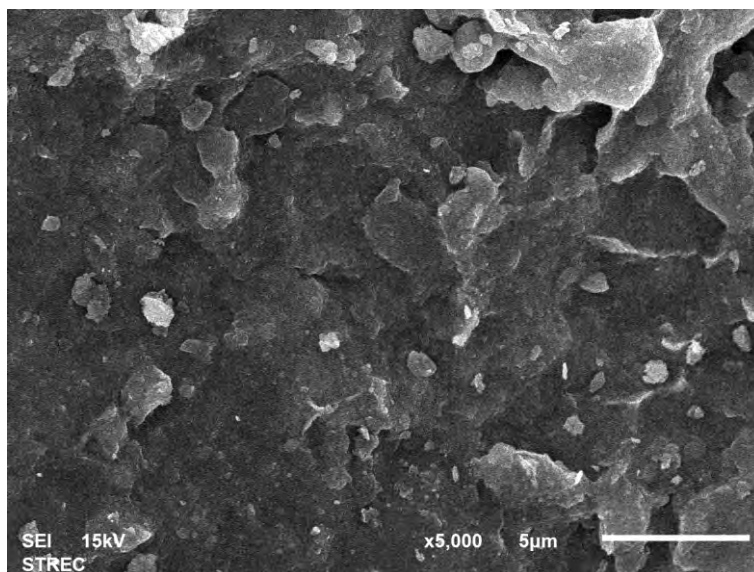
**ตารางที่ 4.2** ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET

ตัวแปร	NC	MnO-NC
พื้นที่ผิว (surface area) m <sup>2</sup> /g	0.81	8.26
ปริมาตรรูพรุน (pore volume) cm <sup>3</sup> /g	0.015	0.154
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (average pore size) nm	36	22

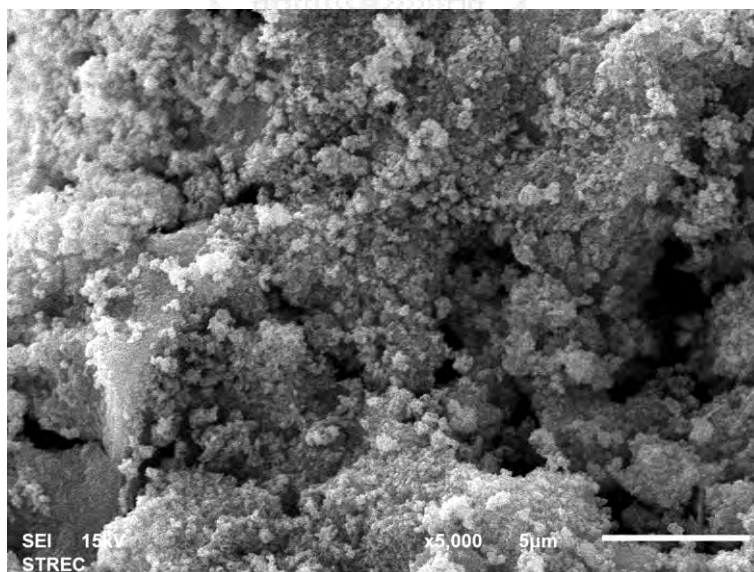
#### 4.1.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) แสดงดังรูปที่ 4.2 พื้นผิวของดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวมีลักษณะเป็นชั้นของผลึกซิลิกาและพื้นผิวค่อนข้างเรียบ เมื่อเทียบกับดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีส

ออกไซด์ มีจะถูกปกคลุมด้วยแมงกานีสออกไซด์ขนาดไมโครเมตรจำนวนมากซึ่งเป็นผลมากจากการ  
ตัดแปรพื้นผิว



(ก)



(ข)

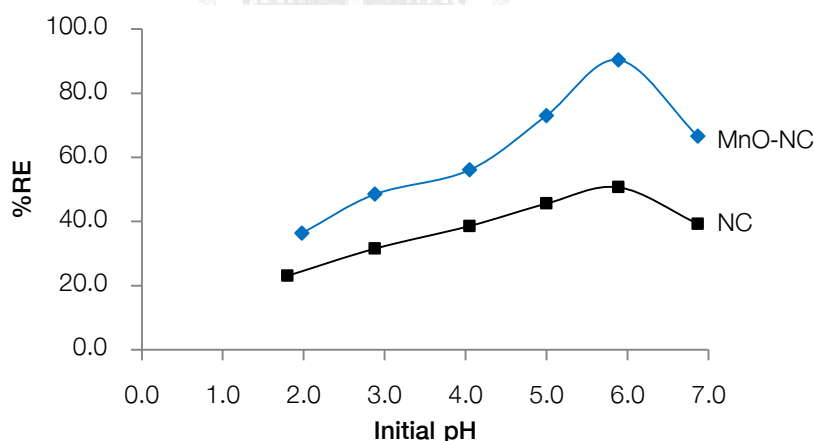
**รูปที่ 4.2** ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM (ก) ดินเหนียวที่ไม่ผ่านการตัดแปรพื้นผิว และ (ข) ดิน  
เหนียวตัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์



## 4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว

### 1) ผลของ pH ของสารละลาย (pH of solution)

การศึกษาอิทธิพลของ pH ต่อการดูดซับไอออนตะกั่วในช่วง pH 2-7 พบว่าความจุการดูดซับ (adsorption capacity) ของทั้งดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ pH เท่ากับ 6 โดยมีประสิทธิภาพการกำจัด (removal efficiency) ประมาณร้อยละ 48 และ 85 สำหรับดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ผลการทดลองสอดคล้องกับรายงานวิจัยที่ระบุว่าความจุการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในสภาวะที่สารละลายเป็นกรดเนื่องจากบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับจะถูก protonate ส่งผลให้เกิดการแข่งขันระหว่างโปรตอนและไอออนโลหะ ในขณะที่ pH มากกว่า 6 ความจุการดูดซับของตัวดูดซับจะลดลงเนื่องจากตะกั่วอยู่ในรูป  $Pb(OH)_2$  ซึ่งมีค่าการละลายต่ำจึงเกิดเป็นตะกอน

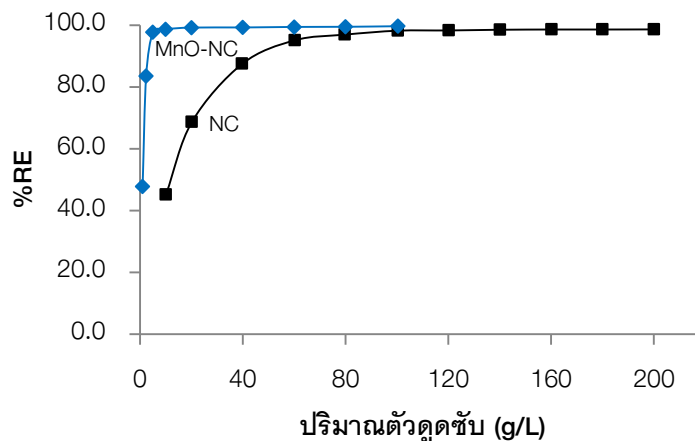


รูปที่ 4.3 ผลของ pH ของสารละลายต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว

### 2. ผลของปริมาณตัวดูดซับ (adsorbent concentration)

การศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วแสดงในรูปที่ 4.4 ปริมาณตัวดูดซับที่ทำการศึกษาในช่วง 10-200 g/L (0.1-2.0 g) และ 1-60 g/L (0.01-0.6 g) สำหรับดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 45.5-98.5 เมื่อความเข้มข้นของดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวเพิ่มขึ้นจาก 10-200 g/L และสำหรับดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 44.7-99.2 เมื่อความเข้มข้นของดิน

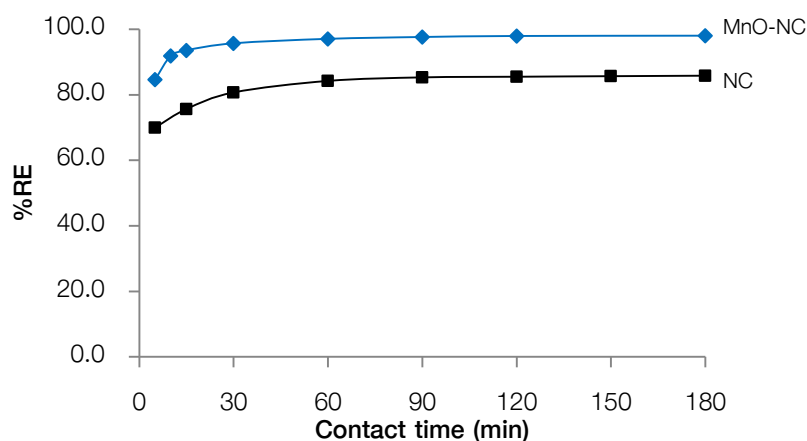
เหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 1-60 g/L ในการทดลองนี้ความเข้มข้นของตัวดูดซับที่เหมาะสมเท่ากับ 60 g/L และ 5 g/L สำหรับดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว

### 3. ผลของระยะเวลาสัมผัส (contact time)

การศึกษาปัจจัยระยะเวลาในการกวนสารละลายโดยใช้สภาวะดังนี้ ค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 6 ปริมาณของตัวดูดซับดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิว 60 g/L (0.6 g/10 mL ของ 20 mg/LPb) และดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ 0.05 g/L (5 g/10 mL ของ 50 mg/LPb) โดยอัตราเร็วในการกวนคงที่ ณ อุณหภูมิห้อง โดยระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตั้งแต่ 5-180 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไอออนตะกั่วของทั้งดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก และเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ในช่วง 5 นาทีแรกประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วมากกว่าร้อยละ 70 และ 84 สำหรับดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ ตามลำดับ และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเวลาตั้งแต่ 60 นาทีเป็นต้นไป ดังนั้นในการทดลองนี้เลือกใช้เวลาสัมผัสเป็น 60 และ 30 นาที สำหรับดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ ตามลำดับ



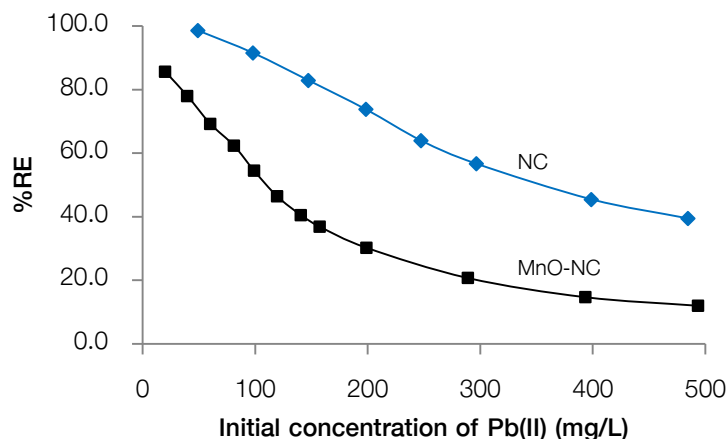
รูปที่ 4.5 ผลของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว

#### 4. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่ว

การศึกษาศักยภาพการดูดซับของไอออนตะกั่วที่มีผลต่อการดูดซับด้วยดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ในระบบแบบbatch โดยมีสภาวะดังนี้

สภาวะการทดลอง	NC	MnO-NC
ช่วงความเข้มข้นไอออนตะกั่วที่ศึกษา (mg/L)	20-500	50-500
pH	6	6
ปริมาณตัวดูดซับ (g/L)	60	5
ระยะเวลาสัมผัส (min)	60	30

ประสิทธิภาพการดูดซับแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าร้อยละการดูดซับของไอออนตะกั่วโดยใช้ทั้งดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ลดลงจากร้อยละ 84.4-36.8 และ 97.0-37.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่ว

### 4.3 ไอโซเทอมการดูดซับ

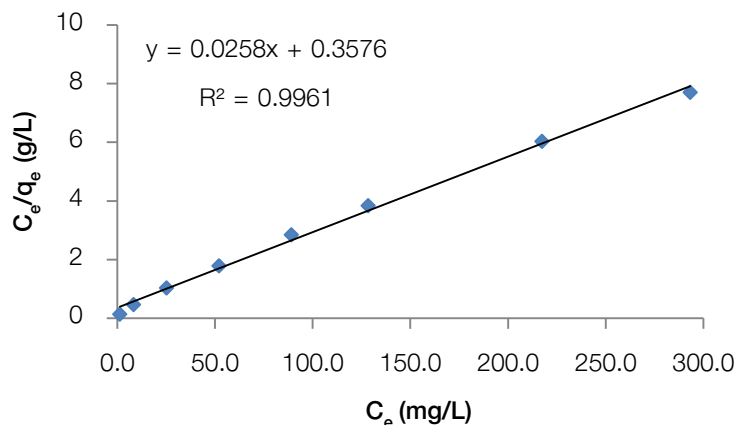
ไอโซเทอมของการดูดซับ อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุล กับจำนวนของตัวถูกดูดซับที่มีการดูดซับ ที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นสมการที่มีประโยชน์สำหรับวิเคราะห์การดูดซับ

#### ไอโซเทอมของแลงเมียร์

สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) มีสมมติฐานที่ว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับบนผิวในตำแหน่งที่แน่นอนของตัวดูดซับ แต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับเกิดการดูดซับบนผิวแบบชั้นเดียวแต่ละพื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะแบบเดียวกัน สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังสมการ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bq_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad \dots\dots(4.1)$$

จากสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ค่า  $q_m$  และ  $b$  หาได้จากความชัน (slope) และจุดตัดแกน (intercept) ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า  $q_m$  เท่ากับ 1.053 และ 38.76 mg/g และ  $b$  เท่ากับ 0.1174 และ 0.0721 L/g โดยมีความเป็นเส้นตรง  $R^2$  เท่ากับ 0.9996 และ 0.9961 สำหรับดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 กราฟไอโซเทอมของแลงเมียร์ของดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์

สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังอาจแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สมภาวะสมดุล (equilibrium parameter,  $R_L$ ) ดังสมการ

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \quad \dots\dots(4.2)$$

เมื่อ  $C_0$  คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกละลาย (mg/L) จากผลการทดลองพบว่าค่า  $R_L$  อยู่ในช่วง 0.041-0.296 และ 0.028-0.220 เมื่อความเข้มข้นของตะกั่วระหว่าง 20–500 mg/L และ 50–500 mg/L สำหรับดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ ตามลำดับ รูปร่างของไอโซเทอมสอดคล้องกับการดูดซับ เนื่องจาก  $0 < R_L < 1$  คือการดูดซับดี

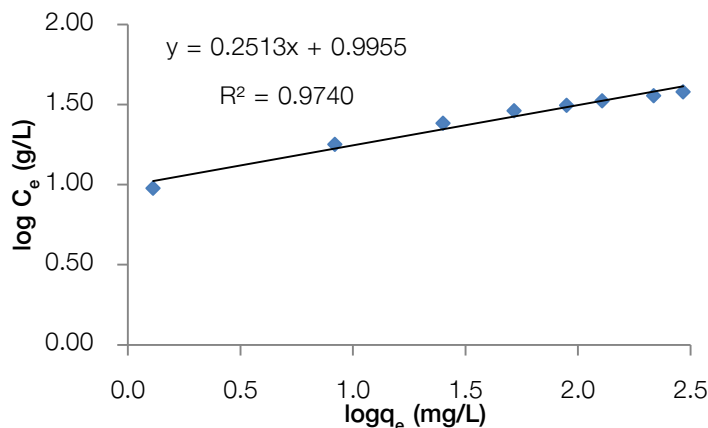
### ไอโซเทอมของ Freundlich

สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกละลายจะเป็นแบบหลายชั้น (multilayer) สมการที่ได้จากการสังเกตและทดลองการดูดซับโดยอาศัยสมมติฐานของทฤษฎีนี้ เป็นแนวความคิดของแบบจำลองแบบหลายชั้น

$$\log q_e = \log K_f + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \quad \dots\dots(4.3)$$

เมื่อ  $K_f$  คือค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g) และ  $n$  คือค่าคงที่แสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  ดังแสดงใน

รูปที่ 4.8 จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $\log K_F$  จากผลพบว่าค่า  $K_F$  เท่ากับ 0.252 และ 9.897 สำหรับดินเหนียวที่ไม่ผ่านการตัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวตัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 กราฟไอโซเทอมของ Freundlich ของดินเหนียวตัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์

ค่า  $1/n$  อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับ จากรูปที่ 4.8 พบว่า  $1/n$  น้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

#### ไอโซเทอมของ Dubinin-Radushkevich (D-R isotherm)

Dubinin-Radushkevich ได้เสนอไอโซเทอมการดูดซับเพื่อประเมินกลไกการดูดซับของตัวดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมีหรือทางกายภาพ สมการของไอโซเทอมของ Dubinin-Radushkevich เขียนได้เป็น

$$\ln q_e = \ln q_m - \beta \varepsilon^2 \quad \dots\dots(4.4)$$

$$\varepsilon = RT \ln \left( 1 + \frac{1}{C_e} \right) \quad \dots\dots(4.5)$$

เมื่อ  $q_e$  คือปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)

$q_m$  คือความจุการดูดซับทางทฤษฎี (mol/g)

$\beta$  คือค่าคงที่การดูดซับของ Dubinin-Radushkevich ( $\text{mol}^2/\text{J}^2$ ) ซึ่งสัมพันธ์กับพลังอิสระการดูดซับเฉลี่ยต่อสารที่ถูกดูดซับ 1 โมล

$\varepsilon$  คือ Polanyi potential (KJ/mol)

$C_e$  คือความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย ณ ภาวะสมดุล (mol/L)

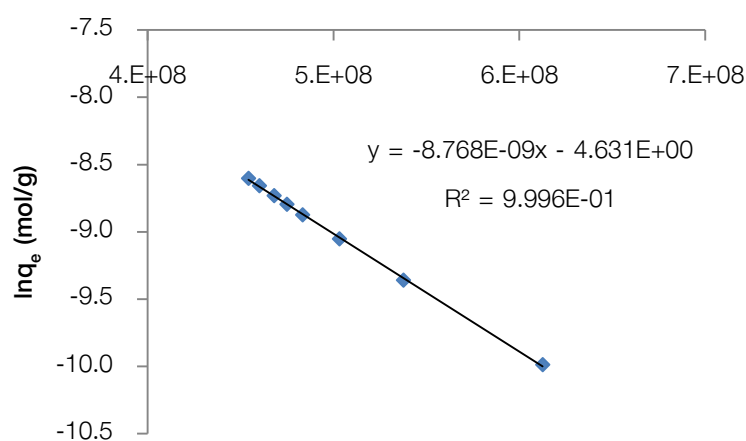
$R$  คือค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol K)

$T$  คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

จากสมการ (4.4) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\ln q_e$  กับ  $E^2$  สามารถหาค่า  $q_m$  และ  $\beta$  ได้จากจุดตัดแกนและความชัน ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าค่า  $q_m$  เท่ากับ 2.92 และ 71.1 mg/g ค่า  $\beta$  เท่ากับ  $3.78 \times 10^{-9}$  และ  $2.24 \times 10^{-9}$  mol<sup>2</sup>/J<sup>2</sup> สำหรับด้วยดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ ตามลำดับ ค่า  $\beta$  จากสมการ Dubinin-Radushkevich เกี่ยวข้องกับพลังงานดูดซับอิสระ ( $E$ ) ของการดูดซับต่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ เมื่อเกิดการเคลื่อนที่จากสารละลายสู่พื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งพลังงานดูดซับอิสระ หาได้จากสมการ

$$E = \frac{1}{\sqrt{2\beta}} \quad \dots\dots(4.6)$$

จากผลการทดลองพบว่าพลังงานดูดซับอิสระด้วยดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์เท่ากับ 3.43 และ 14.95 kJ/mol ตามลำดับ จากสมมติฐานเกี่ยวกับค่าพลังงานดูดซับอิสระ ถ้าน้อยกว่า 8 kJ/mol กลไกการดูดซับจะเป็นแบบกายภาพ แต่ถ้าอยู่ในช่วง 8 ถึง 16 กลไกการดูดซับจะเป็นแบบเคมี ดังนั้นในการทดลองนี้ การดูดซับไอออนตะกั่วด้วยดินเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวมีกลไกการดูดซับแบบกายภาพ ส่วนเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์มีรูปแบบการดูดซับเป็นแบบเคมี (chemisorption)



รูปที่ 4.9 กราฟไอโซเทอมของ Dubinin-Radushkevich ของดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์

ตารางที่ 4.3 ไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir, Freundlich และ Dubinin-Radushkevich

ไอโซเทอม	NC	MnO-NC
<b>Langmuir</b>		
$q_{m(cal)}$ (mg/g)	1.053	38.76
$q_{m(exp)}$ (mg/g)	1.002	38.03
$b$ (L/g)	0.1174	0.0721
$R_L$	0.041-0.296	0.028-0.220
$R^2$	0.9996	0.9961
<b>Freundlich</b>		
$K_f$ (mg/g)	0.252	9.897
$n$	3.25	3.98
$R^2$	0.9051	0.9740
<b>Dubinin-Radushkevich</b>		
$q_m$ (mg/g)	2.92	71.1
$\beta$ (mol <sup>2</sup> /kJ <sup>2</sup> )	$3.78 \times 10^{-9}$	$2.24 \times 10^{-9}$
$E$ (kJ/mol)	3.43	14.95
$R^2$	0.9364	0.9960

ตารางที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยตัวดูดซับที่มีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ พบว่าดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับตัวดูดซับอื่นๆ และถ้าเทียบกับดินเหนียวที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิวพบว่าดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์มีประสิทธิภาพดูดซับไอออนตะกั่วได้ดีกว่าประมาณ 38 เท่า



**ตารางที่ 4.4** เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว

ตัวดูดซับ	สภาวะการทดลอง				$q_m$ (mg/g)	b (L/mg)	$R^2$	Ref.
	dosage (g/mL)	pH	time (min)	T (K)				
Kaolin clay	0.5/20	6.4	60	303	4.73	0.03	0.997	(Jiang et al., 2009)
Modified kaolin clay	0.5/20	6.4	60	303	32.2	0.0504	0.998	(Jiang et al., 2009)
Turkish illitic clay	1/1000	4	240	298	53.76	0.069	0.9990	(Ozdes et al., 2011)
Kaolinite	2.0/1000	5.7	180	303	11.52	0.0207	0.99	(Gupta and Bhattacharya, 2005)
Montmorillonite	2.0/1000	5.7	180	303	31.05	0.0310	0.99	(Gupta and Bhattacharya, 2005)
Celtek clay	0.1/60	6	30	293	18.08	0.381	0.9910	(Sari et al., 2007)
Kaolinite clay	0.5/20	7	60	303	2.35	0.374	0.8980	(Jiang et al., 2010)
MnO <sub>2</sub> -sand	0.4/20	4	180	295	1.60		1.0	(Han et al., 2006a)
MnO <sub>2</sub> -sand	0.4/20	4	180	303	1.77		1.0	(Han et al., 2006a)
MnO <sub>2</sub> -sand	0.4/20	4	180	318	1.91		0.999	(Han et al., 2006a)
Bentonite	0.05/20	6	180	303	16.70	1.30	0.997	(Eren et al., 2009)
MnO <sub>2</sub> -bentonite (in 0.1 M KNO <sub>3</sub> )	0.05/20	6	180	303	58.88	0.59	0.999	(Eren et al., 2009)
NC	0.6/10	6	60	298	1.053	0.1934	0.9994	งานวิจัยนี้
MnO-NC	0.05/10	6	30	298	38.76	0.0721	0.996	งานวิจัยนี้

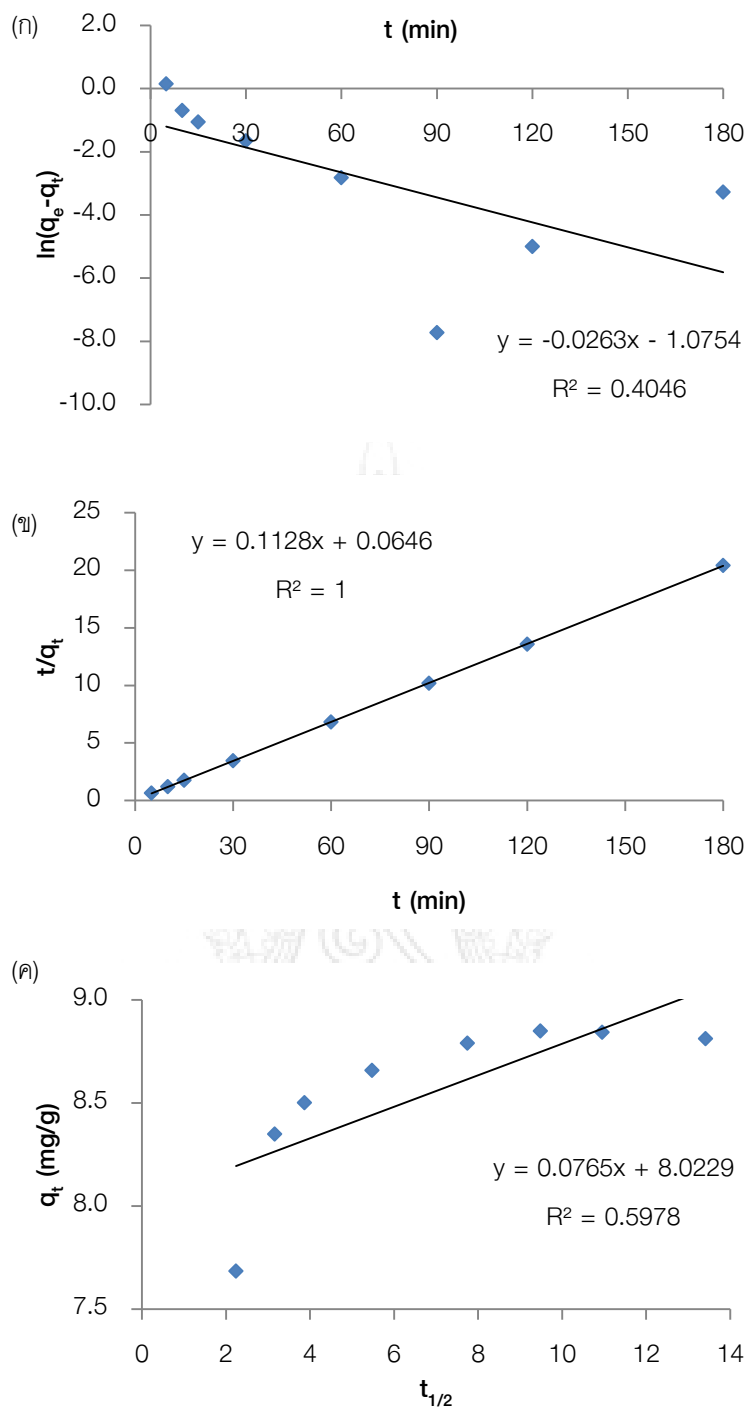
#### 4.4 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์

เพื่อทราบถึงกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสารถูกดูดซับและวัสดุดูดซับแบบจำลองที่นิยมใช้ในการอธิบายกลไกดูดซับที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ pseudo-first order และ pseudo-second order โดยแบบจำลองทั้ง 2 แบบตั้งบนสมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับและการคายเป็นปฏิกิริยาเคมีเทียม (pseudo chemical reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ยังไม่ถูกครอบครอง

เมื่อนำผลการทดลองปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่วที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยสมการการดูดซับตามแบบจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ดังตารางที่ 4.5 และรูปภาพของจลนพลศาสตร์แสดงในรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.5 ปัจจัยของจลนพลศาสตร์การดูดซับไอออนตะกั่ว

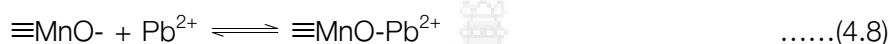
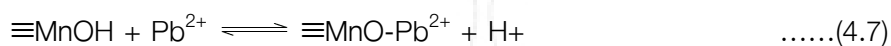
Kinetic models	Parameters	NC	MnO-NC
Pseudo-first-order	$q_{e(cal)}$ (mg g <sup>-1</sup> )	0.0328	0.3412
	$q_{e(exp)}$ (mg g <sup>-1</sup> )	0.299	8.851
	$k_1$ (min <sup>-1</sup> )	0.0245	0.0263
	$R^2$	0.8821	0.4046
Pseudo-second-order	$q_{e(cal)}$ (mg g <sup>-1</sup> )	0.299	8.865
	$q_{e(exp)}$ (mg g <sup>-1</sup> )	0.299	8.851
	$k_2$ (g mg <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	2.545	0.197
	$R^2$	0.9999	1.0
Intra-particle diffusion	$k_i$ (mg g <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	0.0022	0.0765
	$C$ (mg g <sup>-1</sup> )	0.2720	8.023
	$R^2$	0.9846	0.5978



รูปที่ 4.10 กราฟจลนพลศาสตร์การดูดซับไอออนตะกั่ว (ก) pseudo-first-order, (ข) pseudo-second-order และ (ค) intra-particle diffusion

#### 4.5 กลไกการดูดซับไอออนตะกั่ว

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปัจจัยการดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วอย่างเด่นชัด กลไกการดูดซับน่าจะเกิดจากกลไกทางเคมีที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง  $H^+$  และพันธะ  $MnO$  กับไอออนตะกั่วในสารละลาย สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Pretorius and Linder (2001) กลไกทางเคมีในการแลกเปลี่ยนไอออนน่าจะเขียนได้ดังนี้



## บทที่ 5

### อภิปรายผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำดินเหนียวมาทำการดัดแปรพื้นผิวทางเคมีด้วยแมงกานีสออกไซด์ โดยแมงกานีสออกไซด์ขนาดระดับไมโครเมตรเคลือบบนผิวของอนุภาคดินเหนียวทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้น เมื่อนำดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์มาเป็นตัวดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลาย โดยวิธีแบทช์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับดังนี้

- 1) สภาวะ pH ที่เหมาะสมเท่ากับ 6
- 2) ความเข้มข้นของดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ เท่ากับ 5 g/L
- 3) ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที
- 4) ช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนตะกั่วคือ 50-500 mg/L

การประเมินรูปแบบการดูดซับโดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir), ฟรุนดิช (Freundlich) และ ดูบินิน-ราดชเควิช (Dubinin-Radushkevich) พบว่าการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ไอโซเทอม พบว่าความสามารถสูงสุดของการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่ากับ 38.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิวพบว่าดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์มีความจุการดูดซับไอออนตะกั่วมากกว่าถึงประมาณ 38 เท่า จากไอโซเทอมของดูบินิน-ราดชเควิช สามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์เป็นแบบเคมี ในขณะที่ดินเหนียวที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิวเป็นการดูดซับทางกายภาพ จากการศึกษาจลนศาสตร์เคมีของการดูดซับพบว่าการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยดินเหนียวที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและดินเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo second order) โดยกลไกการดูดซับน่าจะเกิดจากกลไกทางเคมีที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง  $H^+$  และพันธะ  $MnO$  กับไอออนตะกั่วในสารละลาย

## เอกสารอ้างอิง

- Al-Degs, Y.S., Tutunju, M.F., Shawabkeh, R.A., 2000. The feasibility of using diatomite and Mn-diatomite for remediation of  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ , and  $Cd^{2+}$  from water. *Separ. Sci. Technol.* 35, 2299-2310.
- Amarasinghe B.M.W.P.K., Williams R.A., 2007. Tea waste as a low cost adsorbent for the removal of Cu and Pb from wastewater. *Chem. Eng. J.* 132, 299-309.
- Areco, M.M., Hanela, S., Duran, J., dos Santos Afonso, M., 2012. Biosorption of Cu(II), Zn(II), Cd(II) and Pb(II) by dead biomasses of green alga *Ulva lactuca* and the development of a sustainable matrix for adsorption implementation. *J. Hazard. Mater.* 213-214, 123-132.
- Bayazit, Ş.S., İnci, İ., 2013. Adsorption of Pb(II) ions from aqueous solutions by carbon nanotubes oxidized different methods. *J. Indus. Eng. Chem.* 19, 2064-2071.
- Bulgariu, D., Bulgariu, L., 2013. Sorption of Pb(II) onto a mixture of algae waste biomass and anion exchanger resin in a packed-bed column. *Bioresour. Technol.* 129, 374-380.
- Cechinel M.A.P., Ulson de Souza S.M.A.G., Ulson de Souza A.A., 2014. Study of lead(II) adsorption onto activated carbon originating from cow bone. *J. Clean. Prod.* 65, 342-349.
- Calderón, J., Navarro, M.E., Jimenez-Capdeville, M.E., Santos-Diaz, M.A., Golden, A., Rodriguez-Leyva, I., Borja-Aburto, V., Di, amp, x, az-Barriga, F., 2001. Exposure to arsenic and lead and neuropsychological development in mexican children. *Environ. Res.* 85, 69-76.
- Cechinel, M.A.P., Ulson de Souza, S.M.A.G., Ulson de Souza, A.A., 2014. Study of lead(II) adsorption onto activated carbon originating from cow bone. *J. Clean. Prod.* 65, 342-349.
- Chandra Sekhar, K., Kamala, C.T., Chary, N.S., Sastry, A.R.K., Nageswara Rao, T., Vairamani, M., 2004. Removal of lead from aqueous solutions using an immobilized biomaterial derived from a plant biomass. *J. Hazard. Mater.* 108, 111-117.
- Chong H.L.H., Chia P.S., Ahmad M.N., 2013. The adsorption of heavy metal by Bornean oil palm shell and its potential application as constructed wetland media. *Bioresour. Technol.* 130, 181-186.
- Das B., Mondal N.K., Bhaumik R., Roy P., 2013. Insight into adsorption equilibrium, kinetics and thermodynamics of lead onto alluvial soil. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 11, 1-14.

- Eren, E., Afsin, B., Onal, Y., 2009. Removal of lead ions by acid activated and manganese oxide-coated bentonite. *J. Hazard. Mater.* 161, 677-685.
- Fu F., Wang Q., 2011. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *J. Environ. Manage.* 92, 407-418.
- Giraldo-Gutiérrez L., Moreno-Piraján J.C., 2008. Pb(II) and Cr(VI) adsorption from aqueous solution on activated carbons obtained from sugar cane husk and sawdust. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 81, 278-284.
- Gupta, S.S., Bhattacharyya, K.G., 2005. Interaction of metal ions with clays: I. A case study with Pb(II). *Appl. Clay Sci.* 30, 199-208.
- Han, R., Lu, Z., Zou, W., Daotong, W., Shi, J., Jiujuun, Y., 2006a. Removal of copper(II) and lead(II) from aqueous solution by manganese oxide coated sand: II. Equilibrium study and competitive adsorption. *J. Hazard. Mater.* 137, 480-488.
- Jiang M.Q., Wang Q.P., Jin X.Y., Chen Z.L., 2009. Removal of Pb(II) from aqueous solution using modified and unmodified kaolinite clay. *J. Hazard. Mater.* 170, 332-339.
- Jiang, M.Q., Jin, X.Y., Lu, X.Q., Chen, Z.L., 2010. Adsorption of Pb(II), Cd(II), Ni(II) and Cu(II) onto natural kaolinite clay. *Desalination* 252, 33-39.
- Lo S.F., Wang S.Y., Tsai M.J., Lin L.D., 2012. Adsorption capacity and removal efficiency of heavy metal ions by Moso and Ma bamboo activated carbons. *Chem. Eng. Res. Des.* 90, 1397-1406.
- Mouni L., Merabet D., Bouzaza A., Belkhiri L., 2011. Adsorption of Pb(II) from aqueous solutions using activated carbon developed from Apricot stone. *Desalination* 276, 148-153.
- Naiya T.K., Bhattacharya A.K., Mandal S., Das S.K., 2009. The sorption of lead(II) ions on rice husk ash. *J. Hazard. Mater.* 163, 1254-1264.
- Ozdes, D., Duran, C., Senturk, H.B., 2011. Adsorptive removal of Cd(II) and Pb(II) ions from aqueous solutions by using Turkish illitic clay. *J. Environ. Manage.* 92, 3082-3090.
- Owamah H.I., 2014. Biosorptive removal of Pb(II) and Cu(II) from wastewater using activated carbon from cassava peels. *J. Mater. Cycles Waste Manage.* 16, 347-358.
- Pretorius, P.J., Linder, P.W., 2001. The adsorption characteristics of  $\delta$ -manganese dioxide: a collection of diffuse double layer constants for the adsorption of  $H^+$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  and  $Pb^{2+}$ . *Appl. Geochem.* 16, 1067-1082.

- Shahid M., Pinelli E., Dumat C., 2012. Review of Pb availability and toxicity to plants in relation with metal speciation; role of synthetic and natural organic ligands. *J. Hazard. Mater.* 219–220, 1-12.
- Sari A., Tuzen M., Soylak M., 2007. Adsorption of Pb(II) and Cr(III) from aqueous solution on Celtek clay. *J. Hazard. Mater.* 144, 41-46.
- Sari, A., Tüzen, M., 2013. Adsorption of silver from aqueous solution onto raw vermiculite and manganese oxide-modified vermiculite. *Micropor. Mesopor. Mater.* 170, 155-163.
- Wang L.H., Lin C.I. (2008) Adsorption of lead(II) ion from aqueous solution using rice hull ash. *Indus. Eng. Chem. Res.* 47, 4891-4897.
- Zein R., Suhaili R., Earnestly F., Indrawati, M.E., 2010. Removal of Pb(II), Cd(II) and Co(II) from aqueous solution using *Garcinia mangostana* L. fruit shell. *J. Hazard. Mater.* 181, 52-56.





## ภาคผนวก

### มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0	pH meter
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ total dissolved solids)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล.</li> <li>● น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเล ค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก./ล.</li> </ul>	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103 - 105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (suspended solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (glass fiber filter disc)
4. อุณหภูมิ (temperature)	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (sulfide as H <sub>2</sub> S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	titration
7. ไซยาไนด์ (cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี pyridine barbituric acid
8. น้ำมันและไขมัน (fat, oil and grease )	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
9. ฟอर्मัลดีไฮด์ (formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	spectrophotometry

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
10. สารประกอบฟีนอล (phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (free chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	iodometric method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	gas-chromatography
13. ค่าบีโอดี (5 วัน ที่อุณหภูมิ 20°C (biochemical oxygen demand : BOD)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	azide modification ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ total kjeldahl nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.	Kjeldahl
15. ค่าซีโอดี (chemical oxygen demand : COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	potassium dichromate digestion
16. โลหะหนัก		atomic absorption spectrophotometry
16.1 สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	ชนิด direct aspiration หรือวิธี plasma emission spectroscopy ชนิด inductively coupled plasma : ICP
16.2 โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (hexavalent chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	
16.3 โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (trivalent chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	
16.4 ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.	
16.5 แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.	
16.6 แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
16.7 ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	
16.8 นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
16.9 แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
16.10 เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.	

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
16.11 อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	- atomic absorption spectrophotometry ชนิด hydride generation หรือวิธี plasma emission spectroscopy ชนิด inductively coupled plasma : ICP
16.12 ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	- atomic absorption cold vapour technique

**แหล่งที่มา :** ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ.2539) เรื่อง “กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม” ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 99 ตอนที่ 113 ตอนที่ 13 ง วันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539



## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ดร.วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ  
(ภาษาอังกฤษ) Dr.Woravith Chansuvarn

### ตำแหน่งปัจจุบัน

ตำแหน่งทางวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

### หน่วยงาน

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

เลขที่ 1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร 0-2836-3018 โทรสาร 0-2913-3000 มือถือ 08-4667-3969

E-mail : woravith.c@rmutp.ac.th

### ประวัติการศึกษา

ระดับ ปริญญา	คุณวุฒิ/สาขาวิชา	สถาบันอุดมศึกษา	ปีที่สำเร็จ
ปริญญาเอก	วทด.เคมี (เคมีวิเคราะห์)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2555
ปริญญาโท	วทม.เคมี (เคมีวิเคราะห์)	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2546
ปริญญาตรี	วทบ.เคมี	สถาบันราชภัฏกาญจนบุรี	2543

### สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

- เคมีสิ่งแวดล้อม
- เคมีอาหาร
- วัสดุนาโน/Composited nanoparticle
- Biosorption

### ผลงานตีพิมพ์ระดับนานาชาติ

1. Chansuvarn W., and Imyim A. Visual and colorimetric detection of Hg(II) ion using gold nanoparticles stabilized with dithia-diaza ligand, Microchim. Acta 176(2012) 56-67.

2. Chansuvarn W., Panich S., and Imyim A. Simple spectrophotometric method for determination of melamine in liquid milks based on green Mannich reaction, *Spectrochimica Acta Part A: molecular and biomolecular spectroscopy* 113(2013) 154-158.

3. Chansuvarn W., Tuntulani T., and Imyim A. Colorimetric detection of mercury(II) based on gold nanoparticles, fluorescent gold nanoclusters and other gold-based nanomaterials. *Trends in Analytical Chemistry* 65(2015) 83-96.

### **ผลงานตีพิมพ์ระดับชาติ**

1. วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. 2557. การออกแบบเซนเซอร์ทางเคมีสำหรับตรวจวัดไอออนปรอทด้วยตาเปล่า, วารสารวิทยาศาสตร์ มข. ฉบับที่ 42 ฉบับที่ 4 เลขหน้า 748-760.

### **การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ**

1. Woravith Chansuvarn and Pratuangtip Rojanavipat, Value addition of waste building material for removal of lead(II) ion from aqueous solution. The 5<sup>th</sup> RMUTP international conference on science, technology and innovation for sustainable development: the road towards a green future. Bangkok. Thailand. 17-18 July 2014. (Poster presentation).

2. Woravith Chansuvarn. Adsorption of Pb(II) from aqueous solution using an autoclaved aerated concrete. 5<sup>th</sup> RMUTIC: Technology and innovation towards ASEAN. PhraNakhon Si Ayutthaya. Thailand, 23-25 July 2014. (Poster presentation).

3. Woravith Chansuvarn. Kunawoot Jainae and Supattra Chansuvarn. Quality of groundwater for producing village tap water in Samchuk district, Suphanburi province. The 6<sup>th</sup> RMUTIC: Green Innovation for a Better Life. Nakhon Ratchasima. Thailand. 1-3 September 2015. (Poster presentation).