



ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของดินเหนียวต่างๆ โดยการทดสอบแบบกะ

ADSORPTION EFFICIENCY OF HEAVY METALS ON VARIOUS CLAYS FROM BATCH TEST

เกียรตินิยม ติรวฒนประกา<sup>1\*</sup>, พงศกร พรธรรตณศลป<sup>2</sup>, ศลโรธรตณ พตทณพโธจณ<sup>3</sup>, ธนอดล คองสมบูน<sup>4</sup>

<sup>1</sup>นคศคษาปธญญาโท, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศศศตร มหาวิททยาลยขอนแก่น

<sup>2</sup>นควิจัย, ศูนย์วิจัยค้ณการจคคการลิ่งแวดล้อมและสารอันตราย มหาวิททยาลยขอนแก่น

<sup>3</sup>อจการย, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศศศตร มหาวิททยาลยขอนแก่น

<sup>4</sup>ผู้ช่วยศศศตรจการย, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศศศตร สถาบันเทคนโธลยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

\*Corresponding author: keatniyom.te@kkumail.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันในประเทศไทยมีโลหะหนักเจือปนอยู่ในธรรมชาติจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากการปล่อยของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่ธรรมชาติ โดยไม่ได้ผ่านการบำบัด จากงานวิจัยในอดีตได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับโลหะหนักด้วยดินชนิดต่างๆ พบว่าดินที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีที่สุดคือ ดินเหนียว ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของดินเหนียว 3 ชนิดคือ ดินเหนียวเคโอลิไนต์ ดินเหนียวซิลไลท์ และดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์ โลหะหนักที่ใช้เป็นตัวถูกดูดซับ ประกอบด้วย ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ซึ่งมีความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 250 500 750 1,000 2,000 4,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาดูดซับ 2 วัน โดยใช้วิธีการทดสอบแบบกะ จากการศึกษาพบว่าดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์ มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายโลหะหนักได้ดีที่สุด รองลงมาคือดินเหนียวซิลไลท์ และดินเหนียวเคโอลิไนต์ ตามลำดับ โดยดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์สามารถดูดซับได้ดีกว่าดินเหนียวอีก 2 ชนิดประมาณ 10 เท่า และโลหะหนักที่ถูกดินเหนียวทั้ง 3 ชนิดดูดซับไว้ได้มากที่สุด คือ ทองแดง รองลงมา นิกเกิล และสังกะสี ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบนี้มีความสอดคล้องกันกับผลการวิเคราะห์ด้วยไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์

คำสำคัญ : การดูดซับ, ดินเหนียว, โลหะหนัก, วิธีการทดสอบแบบกะ, ไอโซเทอม

ABSTRACT

Currently in Thailand, there are a lot of heavy metals in nature because of waste releasing into nature from industrial factories without having good treatment. Therefore, the aim of this study is to determine the adsorptive efficiency of soil that used to build waste treatment ponds for further development in the future. In the past, a comparative study of the adsorptive efficiency on heavy metals with various types of soil was conducted and found that the soil with the best adsorptive efficiency was clay. Hence, this study investigated and compared the adsorptive efficiency on various types of clay in adsorbing heavy metals. Three types of

Keatniyom Teerawattanaprapha<sup>1\*</sup>, Pongsakorn Punrattanasin<sup>2</sup>, Sirorat Pattanapairoj<sup>3</sup>, Thanadol Kongsomboon<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Master's student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

<sup>2</sup>Researcher, Research Center for Environmental and Hazardous Substance Management, Khon Kaen University

<sup>3</sup>Lecturer, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

<sup>4</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

adsorbents including 1) Kaolinite clay 2) Illite clay and 3) Montmorillonite clay, and three types of heavy metals including 1) copper (Cu) 2) nickel (Ni) and 3) zinc (Zn) were employed in this study. The initial concentration of heavy metals was 250, 500, 750, 1,000, 2,000, 4,000 and 6,000 ppm. The equilibrium time of adsorption in this research was 2 days. The method used to test the adsorptive efficiency was Batch test. The results of this study suggest that Montmorillonite clay have the best adsorptive efficiency, followed by Illite clay and Kaolinite clay, Montmorillonite clay can adsorb 10 times better than the other two types of clay. Copper is the most adsorbed heavy metal solution, follow by nickel and zinc. The results were consistent with Langmuir adsorption isotherm.

**KEYWORDS:** Adsorption, Clay, Heavy Metals, Batch Test, Isotherm

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งมีการปล่อยของเสียลงสู่ธรรมชาติ โดยไม่ได้มีการบำบัดทำให้มีการปนเปื้อนของโลหะหนักซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นมนุษย์ สัตว์ รวมไปถึงแม้กระทั่งพืช จากการตรวจสอบสารเคมีในน้ำที่จากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสองแห่งบริเวณ ใกล้แม่น้ำเจ้าพระยา พบว่ามีปริมาณโลหะหนักเจือปนในน้ำมากกว่ามาตรฐาน 2 เท่า [1] โรงงานอุตสาหกรรมที่ได้มาตรฐานจะมีการนำของเสียหรือโลหะหนักไปพักที่บ่อบำบัดเพื่อที่จะทำการบำบัดของเสียเหล่านั้น ให้มีความปลอดภัยเพียงพอที่จะปล่อยลงสู่ธรรมชาติได้ บ่อบำบัดมักจะทำสร้างโดยใช้ดินเหนียวทำเป็นผนังและฐานของบ่อบำบัด [2] เพื่อที่จะลดการรั่วซึมลงสู่ชั้นดินและแม่น้ำ งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพของบ่อบำบัด ในการป้องกันโลหะหนักไม่ให้รั่วซึมไปสู่ธรรมชาติ [3] จากงานวิจัยซึ่งได้ศึกษาการดูดซับและการกระจายตัวของสังกะสี ทองแดง และนิกเกิลในดินจากแถบภาคกลางของประเทศไทย พบว่าโลหะหนักที่สามารถถูกดูดซับได้มากที่สุดคือทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และนิกเกิล (Ni) ตามลำดับ [4] และได้มีการศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วยดินชนิดต่างๆ ซึ่งพบว่าดินที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีที่สุดคือดินเหนียว [5] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกดินเหนียวที่แตกต่างกัน 3 ชนิด เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก โดยจำแนกจากแร่ธาตุองค์ประกอบของดิน ได้แก่ ดินเหนียวเคโอลิไนต์ (Kaolinite) ดินเหนียวอิลไลต์ (Illite) และดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) โดยใช้วิธีการทดสอบแบบกะ (Batch Test) และใช้แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ 2 แบบจำลองได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) และไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich Isotherm) เนื่องจากแบบจำลองไอโซเทอมทั้ง 2 แบบนี้สามารถใช้อธิบายวัสดุได้หลายชนิด

## 2. วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

### 2.1 วัสดุดูดซับ

ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินเหนียว 3 ชนิดคือ 1) ดินเหนียวเคโอลิไนต์ มีโครงสร้างประกอบด้วยชั้นของซิลิกาเรียงสลับกับชั้นของอลูมินา 2) ดินเหนียวอิลไลต์ มีโครงสร้างประกอบด้วยชั้นซิลิกาสองชั้นประกบชั้นอลูมินาและในแต่ละหน่วยจะมีไอออนโพแทสเซียมแทรกอยู่ และ 3) ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ มีโครงสร้างเหมือนดินเหนียวอิลไลต์แต่ในชั้นโครงสร้างมีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ และไอออนบวกส่วนใหญ่ที่พบจะเป็น แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็กและโซเดียม [6] โดยในตารางที่ 1 ได้สรุปธาตุองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวทั้ง 3 ชนิด โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF) จากตารางจะเห็นได้ว่าสารประกอบที่มีปริมาณมากที่สุดในดินเหนียวทั้ง 3 ชนิด คือ  $\text{SiO}_2$  รองลงมาคือ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และมีธาตุชนิดอื่นๆใน

ปริมาณเพียงเล็กน้อย ตารางที่ 2 ได้แสดงคุณสมบัติของดินเหนียวทั้ง 3 ชนิด ตัวถูกดูดซับที่ใช้ในการทดสอบคือสารละลายโลหะหนัก 3 ชนิดประกอบด้วย ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี เนื่องจากสารละลายโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดนี้พบมากในของเสียที่ปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักในการทดสอบคือ 250 500 750 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับดินเหนียวเคโอลิไนต์และดินเหนียวอิลไลต์ แต่สำหรับดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะคือ 500 1,000 2,000 4,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีกว่าดินเหนียวอีก 2 ชนิด จึงใช้ความเข้มข้นที่มากกว่าเพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการดูดซับของดินที่สูงสุด โดยคุณสมบัติของสารละลายถูกแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ธาตุองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวแต่ละชนิดโดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF

ธาตุองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวแต่ละชนิด (% โดยน้ำหนัก)			
ชนิดของดิน	เคโอลิไนต์	อิลไลต์	มอนต์มอริลโลไนต์
SiO <sub>2</sub>	58.0	79.5	56.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.0	14.5	15.10
TiO <sub>2</sub>	<0.10	<0.10	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.5	0.6	9.79
Na <sub>2</sub> O	2.0	0.65	2.01
K <sub>2</sub> O	0.5	5.0	-
CaO	0.1	0.3	2.81
MgO	0.5	<0.02	4.61
LOI	11.0	3.5	-

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของดิน

คุณสมบัติของดิน	เคโอลิไนต์	อิลไลต์	มอนต์มอริลโลไนต์
ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (ร้อยละ)	100	100	100
ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ร้อยละ)	82	85	90
ขีดจำกัดเหลว (ร้อยละ)	34.67	95.34	570.00
ดัชนีพลาสติก (ร้อยละ)	10.81	50.12	469.45
ประเภทของดินตามระบบ USCS	CL	CH	CH
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./ก.)	20	65	760

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของสารละลายโลหะหนัก

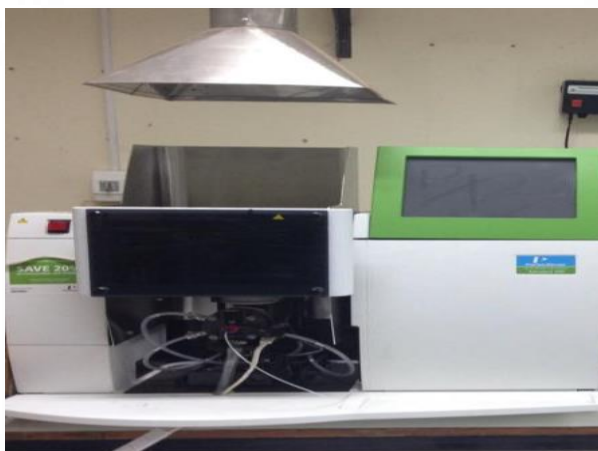
คุณสมบัติ	สูตรทางเคมี	มวลโมเลกุล (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม/มิล)	ความสามารถในการละลายน้ำ (กรัม/100 ลบซม.)
ทองแดง (Cu)	$(\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})_9$	2.32	241.6	137.8
นิกเกิล (Ni)	$(\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})_9$	2.05	290.8	94.2
สังกะสี (Zn)	$(\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})_9$	2.06	297.5	184.3

### 3. วิธีการศึกษา

ในการศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเหนียวต่างๆในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีทดสอบแบบกะ (Batch Adsorption Test) เนื่องจากเป็นวิธีการทดสอบที่มีความนิยมและมีความน่าเชื่อถือ ซึ่งการทดสอบแบบกะนั้นเป็นการทดสอบโดยการทำซ้ำๆหลายๆรอบ และจะใช้ตัวอย่างทดสอบในปริมาณเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบได้โดยใช้สมการไอโซเทอม ซึ่งรายละเอียดของการทดสอบมีดังนี้

#### 3.1 การทดสอบแบบกะ (Batch Adsorption Test)

การทดสอบแบบกะเป็นการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของการดูดซับสารละลาย โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเพียงเล็กน้อย สามารถทำซ้ำๆได้หลายตัวอย่างและหาเวลาที่เข้าสู่ภาวะสมดุล ตลอดจนไอโซเทอมของการดูดซับได้โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ นำดินเหนียวที่อบแห้งแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 หน้า 2.5 กรัม บรรจุลงในขวดทดลอง แล้วเทสารละลายโลหะหนักที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นตามที่กำหนดลงไป นำไปเขย่าในเครื่องเขย่าด้วยอัตรา 150 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างที่ 120 ชั่วโมง มากรองด้วยตัวกรอง (Filter Paper) ขนาด 45 ไมโครเมตร พร้อมเจือจางด้วยกรดไนตริก ก่อนนำเข้าเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) เพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่เหลืออยู่ [7]



รูปที่ 1 เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS)



รูปที่ 2 ตัวอย่างทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแบบกะ

### 3.2 การหาสมดุลการดูดซับ (Equilibrium Time)

สภาวะสมดุลคือการที่อัตราการคายของตัวถูกดูดซับมีค่าเท่ากับอัตราการดูดซับทำให้สิ้นสุดการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ ในการหาสมดุลการดูดซับด้วยการทดสอบแบบกะ จะเก็บตัวอย่างทดสอบที่เวลา 1 3 6 12 24 48 72 และ 120 ชั่วโมงตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักในการหาสมดุลการดูดซับคือ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับดินเหนียวเคโอลิไนต์และดินเหนียวอิลไลต์ ส่วนดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักในการหาสมดุลการดูดซับคือ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากว่าดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์สามารถดูดซับสารละลายโลหะหนักที่ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้หมดจึงต้องเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย เพื่อให้หาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์ได้

### 3.3 การคำนวณการดูดซับ (Calculation of Adsorption)

ปริมาณการดูดซับสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 1

$$adsorption = C_0 - C_{eq} \quad (1)$$

เปอร์เซ็นต์การดูดซับสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 2

$$\%adsorption = \frac{(C_0 - C_{eq})}{C_{eq}} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ  $C_0$  และ  $C_{eq}$  คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นและความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

$$q = \frac{(C_0 - C_{eq})V}{M} \quad (3)$$

เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินที่ใช้ดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม),  $C_0$  และ  $C_{eq}$  คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นและความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร) ตามลำดับ,  $V$  คือ ปริมาณของสารละลายที่ใช้ (มิลลิลิตร),  $M$  คือ ปริมาณของดินที่ใช้ดูดซับ (กรัม)

### 3.4 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

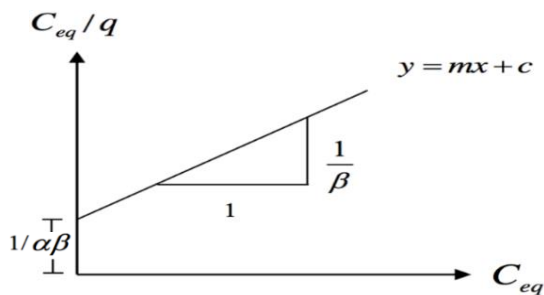
การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับโดยที่อุณหภูมิคงที่นั้น จะแสดงด้วยกราฟซึ่งเรียกว่าไอโซเทอมการดูดซับ การศึกษาครั้งนี้ได้ใช้แบบจำลองไอโซเทอม 2 แบบในการวิเคราะห์ผลการทดสอบแบบกะ ประกอบด้วย ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ และไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช เนื่องจากแบบจำลองไอโซเทอมทั้ง 2 แบบนี้สามารถใช้อธิบายวัสดุได้หลายชนิดจึงได้เลือกมาวิเคราะห์ผลการทดสอบในงานวิจัยนี้ ซึ่งไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ มีสมมุติฐานว่าที่ผิวของตัวดูดซับมีการดูดซับเพียงชั้นเดียวเท่านั้น (Monolayer Adsorption) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$q = \frac{\alpha\beta C_{eq}}{1 + \alpha C_{eq}} \quad (4)$$

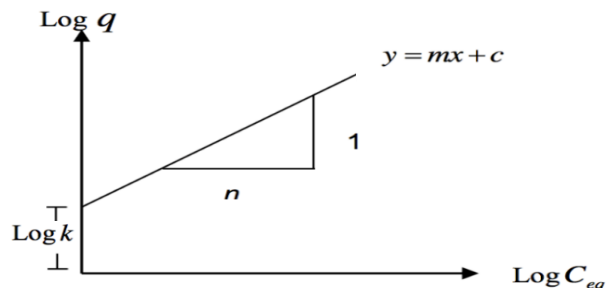
เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินที่ใช้ดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม),  $C_{eq}$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่ในสถานะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร),  $\beta$  คือ ปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับได้สูงสุดต่อปริมาณดินที่ใช้ในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม) และ  $\alpha$  คือ ค่าคงที่ของ Langmuir (ลิตร/มิลลิกรัม) เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $C_{eq}/q$  กับ  $C_{eq}$  จะทำให้ได้ค่าความชันของกราฟเท่ากับ  $1/\beta$  และจะได้ค่าตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/\alpha\beta$  ดังรูปที่ 2 ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนดิช มีสมมุติฐานว่าตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวดูดซับหลายชั้น (Multilayer Adsorption) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$q = K(C_{eq})^{1/n} \tag{5}$$

เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินที่ใช้ดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม),  $C_{eq}$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่ในสถานะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร),  $K$  คือ ค่าคงที่ของการดูดซับที่อุณหภูมิ และ  $n$  คือ ค่าคงที่ของพลังงานการดูดซับที่อุณหภูมิใดๆ และเมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\text{Log } q$  กับ  $\text{Log } C_{eq}$  โดยที่อุณหภูมิคงที่จะทำให้ได้สมการเส้นตรงที่มีค่าความชันของกราฟเท่ากับ  $1/n$  และจะได้ค่าตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\text{Log } k$  ดังในรูปที่ 4



รูปที่ 3 กราฟเชิงเส้นของแลงเมียร์ (Watt, R.J., 1997)

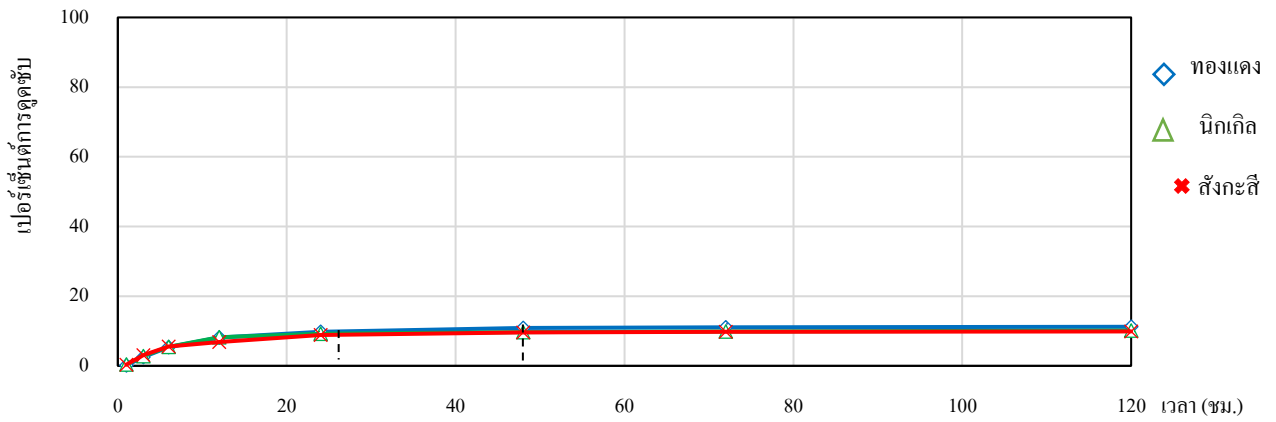


รูปที่ 4 กราฟเชิงเส้นของฟรอนดิช (Watt, R.J., 1997)

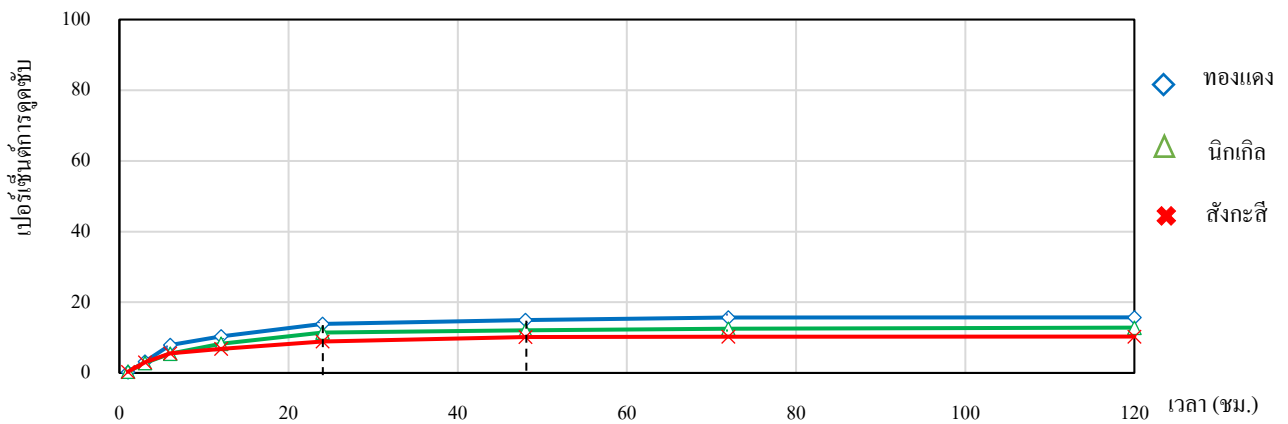
#### 4. ผลการทดสอบ

##### 4.1 สมดุลการดูดซับ (Equilibrium Time)

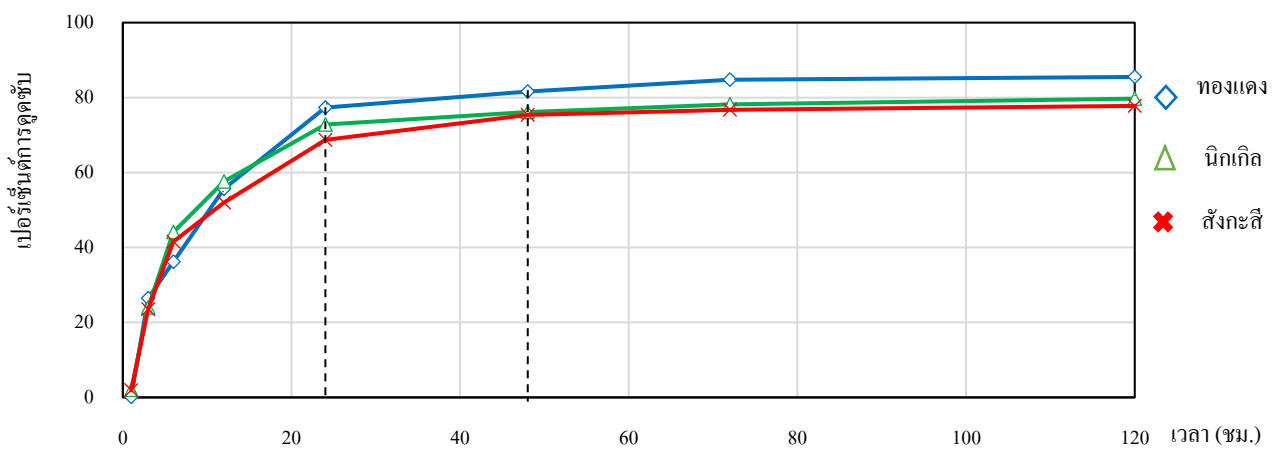
จากผลการทดสอบแบบกะสามารถนำไปหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับได้โดยใช้สมการที่ 2 ซึ่งสมดุลการดูดซับสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (Time) กับเปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%Adsorption) ในรูปที่ 5-7 ได้แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะหนักที่เวลาต่างๆของดินเหนียวทั้ง 3 ชนิด จะเห็นได้ว่าในช่วง 1-24 ชั่วโมง ซึ่งกราฟมีความชันมากแสดงว่าเกิดปฏิกิริยาการดูดซับได้มาก และในช่วงที่สองคือช่วง 24-48 ชั่วโมง ซึ่งความชันของกราฟค่อยๆลดลงและเริ่มคงที่แสดงว่าเกิดการดูดซับค่อยๆลดลงและเริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดซับ และในช่วง 48-120 ชั่วโมง กราฟมีความชันคงที่แสดงว่าเกิดการดูดซับอยู่ในสถานะสมดุลการดูดซับ ดังนั้นจึงได้เลือกเวลา 120 ชั่วโมงในการทดสอบหาประสิทธิภาพการดูดซับของดินเหนียวทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 5 สมดุลการดูดซับของดินเหนียวเคโอลิไนต์



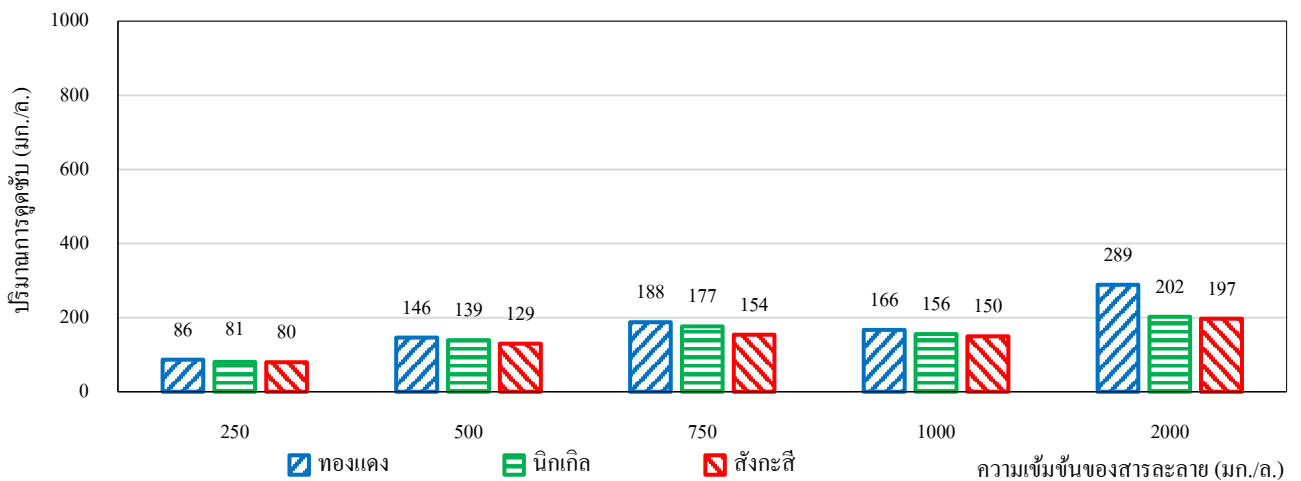
รูปที่ 6 สมดุลการดูดซับของดินเหนียวอิไลต์



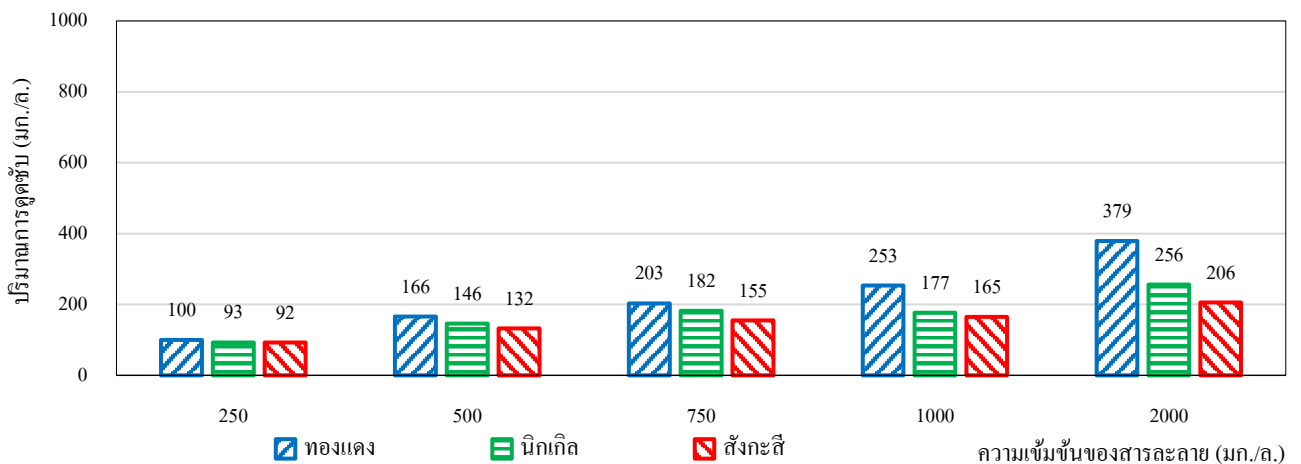
รูปที่ 7 สมดุลการดูดซับของดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์

#### 4.2 ประสิทธิภาพการดูดซับ (Efficiency of Adsorption)

จากผลการทดสอบแบบกะสามารถนำไปหาปริมาณการดูดซับได้จากสมการที่ 1 แสดงดังรูปที่ 8-9 ทำให้ทราบได้ว่าดินเหนียว เกลโอลิไนต์ และดินเหนียวอิลไลต์ สามารถดูดซับสารละลายทองแดงได้ดีที่สุดรองลงมาคือ นิกเกิล และสังกะสีตามลำดับ ซึ่งดินเหนียว อิลไลต์สามารถดูดซับสารละลายโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดได้ดีกว่าดินเหนียวเคโอลิไนต์ และในรูปที่ 10 ทำให้ทราบว่าดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์สามารถดูดซับสารละลายโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดได้หมด ที่ความเข้มข้น 500 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงต้องทำให้เพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น เพื่อหาความสามารถในการดูดซับที่สูงที่สุดของดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์ แต่สำหรับดินเหนียวเคโอลิไนต์และดินเหนียวอิลไลต์นั้น ไม่สามารถดูดซับสารละลายโลหะหนักได้หมด ทำให้สามารถสรุปได้ว่าดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์ สามารถดูดซับได้ดีที่สุดซึ่งมากกว่าดินเหนียวอีก 2 ชนิดอย่างชัดเจน และดินเหนียวทั้ง 3 ชนิดมีสามารถดูดซับโลหะหนักทองแดงได้ดีที่สุดรองลงมาคือ นิกเกิล และสังกะสี ตามลำดับ

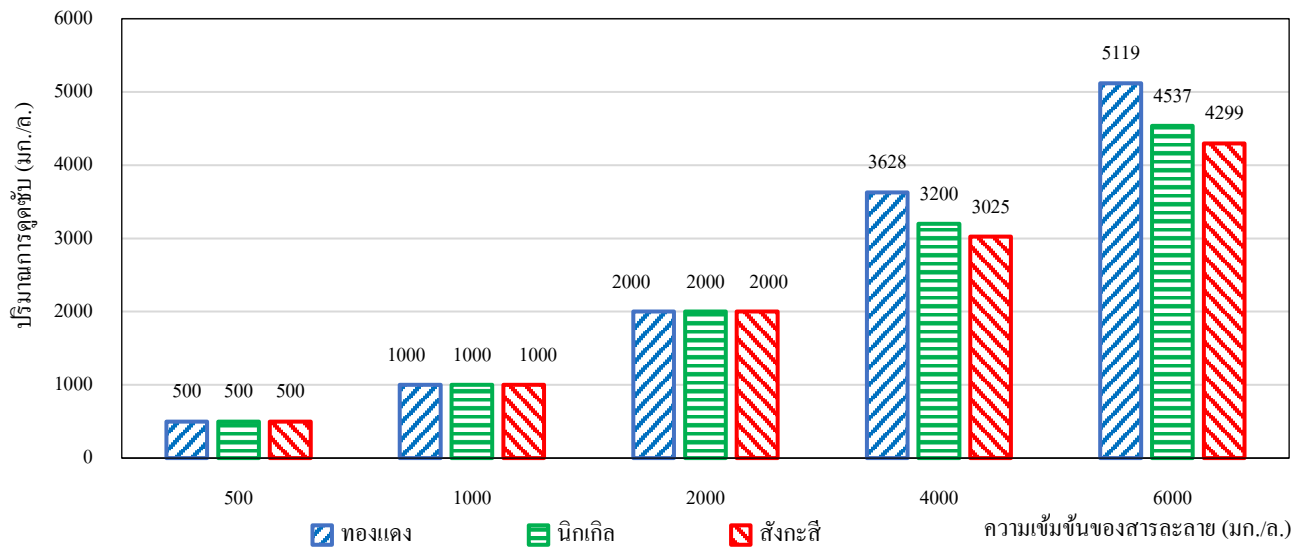


รูปที่ 8 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของดินเหนียวเคโอลิไนต์



รูปที่ 9 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของดินเหนียวอิลไลต์





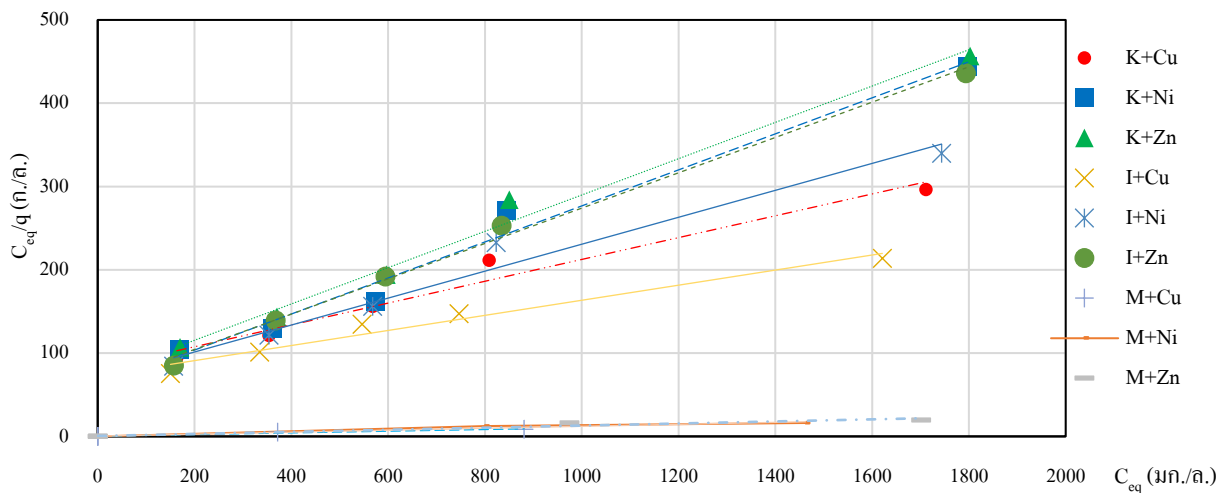
รูปที่ 10 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์

### 4.3 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

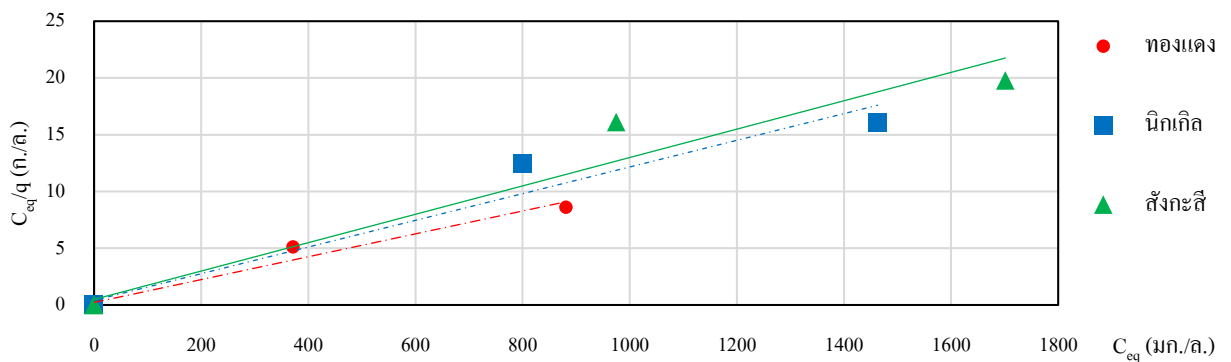
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไอโซเทอมการดูดซับในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ 2 ไอโซเทอม ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ และไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช โดยใช้สัญลักษณ์ต่างๆแทนดังนี้ 1) ดินเหนียวเคโอลิไนต์แทนด้วย K 2) ดินเหนียวอิลไลต์แทนด้วย I 3) ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์แทนด้วย M 4) สารละลายทองแดงแทนด้วย Cu 5) สารละลายนิกเกิลแทนด้วย Ni และ 6) สารละลายสังกะสีแทนด้วย Zn

#### 4.3.1 ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

จากรูปที่ 11 แสดงไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ของดินเหนียวทั้ง 3 ชนิด ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_{eq}$  กับ  $C_{eq}/q$  ซึ่งสามารถนำสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟ นำไปหาค่า  $\alpha$  และ  $\beta$  ได้ดังในตารางที่ 4 จากรูปสามารถสังเกตเห็นได้ว่าดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์ มีความชันที่น้อยที่สุดแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีที่สุด เนื่องจากมีค่า  $C_{eq}/q$  ที่น้อยเพราะว่า  $q$  คือ ปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินที่ใช้ดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม),  $C_{eq}$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่ในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร) เมื่อขยายสเกลในแกนตั้งของกราฟไอโซเทอม จะได้รูปไอโซเทอมของแลงเมียร์ของดินมอนต์มอริลโลไนท์ดังรูปที่ 12 ซึ่ง จะสังเกตเห็นได้ว่า  $R^2$  มีค่ามากกว่า 0.95 หรือเกือบเท่า 1 ทุกตัวอย่างการทดสอบ ดังนั้น ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ จึงนำมาใช้ในการอธิบายผลการทดสอบได้ดี



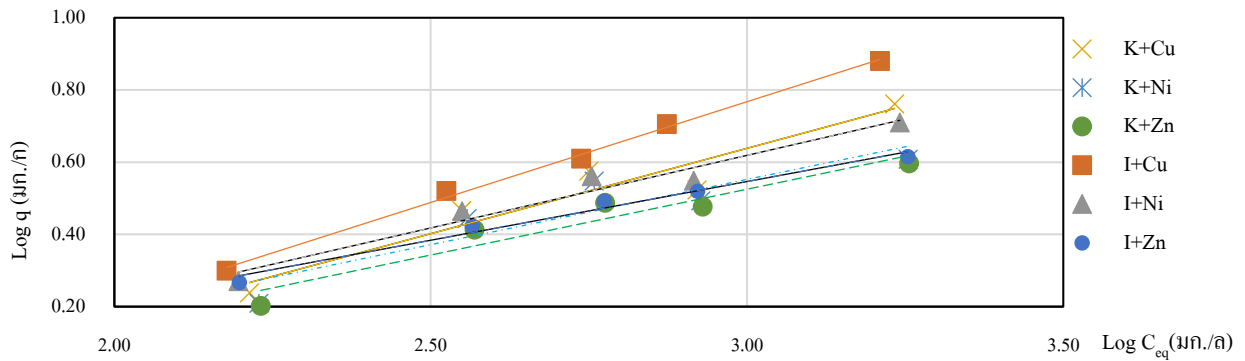
รูปที่ 11 ไอโซเทอมแลงเมียร์ของดินเหนียวทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 12 ไอโซเทอมแลงเมียร์ของดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์

#### 4.3.2 ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm)

รูปที่ 13 แสดงไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิชของดินเหนียวเคโอลิไนต์และดินเหนียวอิลไลต์ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Log } C_{eq}$  กับ  $\text{Log } q$  ซึ่งสามารถนำสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟไปหาค่า  $k$  และ  $1/n$  ได้ดังในตารางที่ 4 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่า  $R^2$  เกือบทุกตัวอย่างมีค่ามากกว่า 0.9 ทำให้ทราบได้ว่าไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิชนำมาใช้ในการอธิบายผลการทดสอบได้ แต่อาจไม่ดีเท่าไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ เนื่องจากดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์สามารถดูดซับสารละลายโลหะหนักได้หมดที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงทำให้ค่า  $C_{eq}$  มีค่าเท่ากับ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงทำให้ไม่สามารถหาค่า  $\text{Log } C_{eq}$  ได้ ดังนั้นค่า  $k$  และค่า  $1/n$  ของดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์ในแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิชจึงไม่สามารถอธิบายได้



รูปที่ 13 ไอโซเทอมฟรอนดิชของดินเหนียวเคโอลิไนต์และดินเหนียวอิลไลต์

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนดิช

ชนิดของดิน	สารละลาย	พารามิเตอร์ของแลงเมียร์			พารามิเตอร์ของฟรอนดิช		
		$\alpha$ (L/mg)	$\beta$ (mg/g)	$R^2$	k (mg/g)	1/n	$R^2$
เคโอลิไนต์	ทองแดง	$0.16 \times 10^{-2}$	7.63	0.9700	0.17	0.47	0.9180
	นิกเกิล	$0.36 \times 10^{-2}$	4.62	0.9813	0.29	0.36	0.8280
	สังกะสี	$0.03 \times 10^{-2}$	4.59	0.9881	0.27	0.37	0.9204
อิลไลต์	ทองแดง	$0.12 \times 10^{-2}$	11.05	0.9684	0.12	0.56	0.9966
	นิกเกิล	$0.23 \times 10^{-2}$	6.18	0.9708	0.26	0.40	0.9577
	สังกะสี	$0.34 \times 10^{-2}$	4.72	0.9952	0.37	0.33	0.9824
มอนต์มอริลโลไนท์	ทองแดง	$4.53 \times 10^{-2}$	99.01	0.9725	-	-	-
	นิกเกิล	$2.88 \times 10^{-2}$	85.47	0.9607	-	-	-
	สังกะสี	$2.56 \times 10^{-2}$	80.00	0.9583	-	-	-

จากตารางที่ 4 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่า  $R^2$  ของไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์มีค่ามากกว่า 0.95 หรือเกือบเท่ากับ 1 ทุกตัวอย่าง การทดสอบจึงสามารถอธิบายได้ว่าผลวิเคราะห์จากไอโซเทอมนี้ สามารถใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการดูดซับของดินทั้ง 3 ชนิด ได้ดี ทำให้สามารถใช้ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบได้ โดยอธิบายได้จากค่า  $\beta$  คือปริมาณการดูดซับโลหะหนักสูงสุดที่ดินสามารถดูดซับได้ เช่น ตัวอย่างทดสอบ M+Cu มีค่า  $\beta$  เท่ากับ 99.01 มิลลิกรัมต่อกรัม หมายความว่า ปริมาณดิน 1 กรัมสามารถดูดซับสารละลายโลหะหนักได้สูงสุด 99.01 มิลลิกรัม เมื่อนำค่า  $\beta$  ของดินเหนียวทั้ง 3 ชนิดพบว่าเหนียวดินอิลไลต์สามารถดูดซับได้ดีกว่าเหนียวชนิดเคโอลิไนต์ประมาณ 1.5 เท่า แต่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์สามารถดูดซับได้ดีกว่าดินเหนียวอีก 2 ชนิดประมาณ 10 เท่า ในส่วนการวิเคราะห์ผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนดิชสามารถอธิบายได้จากค่า 1/n คือถ้าหากมีค่าเข้าใกล้ 1 มากสามารถอธิบายได้ว่าดินเหนียวนั้นมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากเพียงพอสำหรับการดูดซับ เช่น ตัวอย่างทดสอบ I+Cu มีค่า 1/n เท่ากับ 0.56 ซึ่งมากกว่าตัวอย่างทดสอบ K+Cu ที่มีค่า 0.47 แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวอิลไลต์มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากกว่าดินเหนียวเคโอลิไนต์ ทำให้สามารถดูดซับสารละลายโลหะหนักได้ดีกว่า จากการวิเคราะห์ด้วยไอโซเทอม

ทั้ง 2 แบบจำลองนี้จะเห็นได้ว่าสอดคล้องกันกับผลการทดสอบการหาประสิทธิภาพการดูดซับ และไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ผลการทดสอบของงานวิจัยนี้คือ ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์

## 5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการดูดซับ โลหะหนักด้วยดินเหนียวต่างๆ โดยใช้วิธีการทดสอบแบบกะ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของดินเหนียวแต่ละชนิดสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้คือ ดินเหนียวทั้ง 3 ชนิดเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 48 ชั่วโมง ไอโซเทอมที่เหมาะสมที่สุดในการวิเคราะห์ผลการทดสอบคือ ไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดยสามารถอธิบายผลการดูดซับได้ทุกตัวอย่างทดสอบ และผลจากการทดสอบหาประสิทธิภาพการดูดซับนั้น มีความสอดคล้องกันกับผลการวิเคราะห์ด้วยไอโซเทอมของแลงเมียร์คือ ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์ สามารถดูดซับได้ดีที่สุดรองลงมาคือ ดินเหนียวอิลไลต์ และดินเหนียวเคโอลิไนต์ ตามลำดับ โดยที่โลหะหนักที่ถูกดินเหนียวทั้ง 3 ชนิดดูดซับไว้ได้มากที่สุดคือ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ตามลำดับ เมื่อนำค่า  $\beta$  มาเปรียบเทียบกันสามารถสรุปได้ว่า ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าดินเหนียวอีก 2 ชนิดประมาณ 10 เท่า และเมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะนั้นสามารถอธิบายได้ว่า ดินเหนียวที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากจะสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าดินเหนียวที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่น้อย จากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้โดยการนำดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนท์เป็นวัสดุในการสร้างผนังของบ่อบำบัด เนื่องจากว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับดินเหนียวอีก 2 ชนิด

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนทุนวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Brigden, L. et al. *Investigation of hazardous chemical discharges from two textile manufacturing facilities, and chemical contamination of nearby canals connecting to the lower Chao Phraya River*. Greenpeace Research Laboratories Technical, (6), 2010.
- [2] ปาวิชาดิ หมั่นสีทา. การบำบัดน้ำขยะมูลฝอยโดยวิธีการตกตะกอนด้วยเบนโทไนท์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 2554.
- [3] กิตติพงษ์ ธรรมณีกุล. การลดปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการดูดซับด้วยเบนโทไนท์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล, 2548
- [4] เกียรติศักดิ์ อุดมสินโรจน์ และศุภเกียรติ ศรีพนมธกร. การดูดซับและการกระจายตัวของสังกะสีทองแดง และนิกเกิลในดินจากแถบภาคกลางของประเทศไทย. งานประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 5. 2549, กรุงเทพมหานคร: ศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย.
- [5] Noppadol, S. et al. Adsorption Behavior of Heavy Metals on Various Soils. *Pol. J. Env-iron. Stud*, 2014, 23(3), 853-865.
- [6] Howie and Zussman. *An Introduction to the rock forming minerals*. 2nd edition. Longman, 1992, 353-381.
- [7] เลิศ เกิดชัยภูมิ และคณะ. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักของตัวอย่างดินที่พบในภาค ตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2555.