



อิทธิพลความเข้มข้นเริ่มต้นและอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักของดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับ  
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

EFFECT OF INITIAL CONCENTRATION OF HEAVY METALS AND TEMPERATURE ON THE  
ADSORPTION CAPACITY OF BENTONITE CLAY MIXED WITH PORTLAND CEMENT

อนันต์ สิริสมบุญพัฒนา<sup>1</sup>, พงสกร พรณรัตน์ศิลป์<sup>2</sup>, ชินะวัฒน์ มุกตพันธ์<sup>3</sup>,  
รัตมณี นันทสาร<sup>4</sup>, ดลฤดี หอมดี<sup>5</sup> และธนาดล คงสมบุญ<sup>6</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

<sup>2,3,4,5</sup>นักวิจัย, ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

<sup>6</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

\*Corresponding author: anunts@kkumail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักและอุณหภูมิที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับทองแดง (Cu), นิกเกิล (Ni) และสังกะสี (Zn) ด้วยดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดินเหนียวเบนโทไนท์นั้นถูกนำมาใช้เป็นวัสดุกันน้ำในหลุมฝังกลบขยะอันตรายอย่างแพร่หลาย ซึ่งการผสมระหว่างดินเหนียวเบนโทไนท์กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบการดูดซับโลหะหนักของดินเหนียวเบนโทไนท์ปกติ ผลการศึกษาถูกอธิบายโดยการทดสอบการดูดซับด้วยวิธีการทดสอบแบบกะและไอโซเทอมการดูดซับ โดยทำการเตรียมความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันของ Cu, Ni และ Zn ผลการศึกษาพบว่าการดูดซับของดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยวิธีแบบกะพบว่าในช่วงระยะเวลา 48-120 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักเข้าสู่สภาวะสมดุลและมีศักยภาพในการดูดซับที่ใกล้เคียงกันเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น แบบจำลองไอโซเทอม Langmuir Isotherm สามารถอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับของดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยปริมาณสูงสุดของสารละลายโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อประมาณตัวดูดซับ ( $\beta$ ) เรียงตามลำดับคือ Cu > Ni > Zn และอุณหภูมิที่แตกต่างกันมีผลทำให้การดูดซับโลหะหนักแตกต่างกันโดยความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: โลหะหนัก, การดูดซับ, แบบจำลองไอโซเทอม, ดินเหนียวเบนโทไนท์, ปูนซีเมนต์, การทดสอบแบบกะ

Anunt Sirisombunphatthana<sup>1\*</sup>, Pongsakorn Punrattanasin<sup>2</sup>, Chinawat Muktabhant<sup>3</sup>, Ratamanee Nuntasarn<sup>4</sup>  
Doldee Homdee<sup>5</sup> and Thanadol Kongsomboon<sup>6</sup>

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

<sup>2,3,4,5</sup> Researcher, Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Khon Kaen University

<sup>6</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

### ABSTRACT

*This research presents the influence of initial concentrations of heavy metals and temperatures on the ability to absorb copper (Cu), nickel (Ni) and zinc (Zn) with bentonite clay mixed Portland cement. Bentonite clay is widely used as a waterproofing material in hazardous waste landfills, The mixture of bentonite clay and Portland cement can increase the adsorption capacity when compared to heavy metal adsorption with bentonite clay. The results described clearly from a series of batch sorption test and adsorption Isotherm model. In the study, varieties of initial concentrations of Cu, Ni and Zn were prepared. The adsorption of bentonite clay mixed with Portland cement by batch sorption test showed that during the period of 48 to 120 hours, the concentration of the heavy metal solution entered the equilibrium state and had the potential to adsorb more when the initial concentration of heavy metals increased. The Langmuir isotherm model can effectively explain the adsorption behavior of bentonite mixed with Portland cement. The highest amount of absorbed heavy metal solution per approximation ( $\beta$ ) respectively is Cu > Zn > Ni. The influence of different temperatures affects in the ability to absorb heavy metals; the adsorption increases as the temperature increases.*

**KEYWORDS:** heavy metals, adsorption, Isotherm model, Bentonite clay, Portland cement, Batch sorption test.

### 1. บทนำ

ปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำเสียซึ่งปล่อยลงสู่แหล่งน้ำต่าง ๆ เช่น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ นับเป็นปัญหาที่สำคัญ โลหะหนักเป็นสารคงสภาพที่ไม่สามารถสลายตัวได้เองตามธรรมชาติ [1] หากมีการบริหารจัดการสารพิษ หรือโลหะที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำได้ไม่ดีพอ ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ อาจส่งผลให้เกิดโรคร้ายต่าง ๆ เช่น สารละลายโลหะหนักทองแดงที่เข้าสู่ร่างกายจะเกิดอาการเป็นพิษต่าง ๆ [2] วิธีการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายวิธี ได้แก่ Ion exchange, Reverse Osmotic, และ Electrolytic Recove เป็นต้น ซึ่งวิธีการเหล่านี้เป็นวิธีการที่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงทั้งสิ้น [3,4] ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาวิธีการกำจัดโลหะด้วยวิธีการกระบวนการดูดซับเพราะเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ ทำได้ง่ายและค่าใช้จ่ายต่ำ [4] ในอดีตที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับและการใช้วัสดุต่าง ๆ มาผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะหนักให้กับดิน เช่น การศึกษาอิทธิพลของวัสดุปุ๋ยชีวภาพที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักบนดิน จากผลการศึกษาพบว่า การเติมวัสดุผสมเพิ่มดังกล่าวสามารถทำให้ดินชนิดต่าง ๆ ดูดซับได้ดีขึ้นเป็นอย่างมาก จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าดินเหนียวเป็นดินที่มีความสามารถในการดูดซับได้ดีที่สุดเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง และการเติมปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มศักยภาพในการดูดซับได้ดี [5] เบนโทไนท์จัดเป็นดินเหนียวประเภทอลโมลิโนไนท์ที่นิยมใช้ทำบ่อกักเก็บของบ่อบำบัดป้องกันการรั่วซึมของโลหะหนักออกสู่ภายนอก เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง มีประจุไอออนเป็นลบที่สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดี [6,7] ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาศักยภาพในการดูดซับโลหะหนักของดินเหนียวเบนโทไนท์ที่ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุรองรับบ่อบำบัดให้มีความสามารถในการดูดซับได้ดียิ่งขึ้นและลดค่าใช้จ่ายในการใช้เทคโนโลยีอื่นเพื่อกำจัดโลหะหนัก โดยการศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักและอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับ

### 1.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักและอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักของดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

## 2. วัสดุที่ใช้

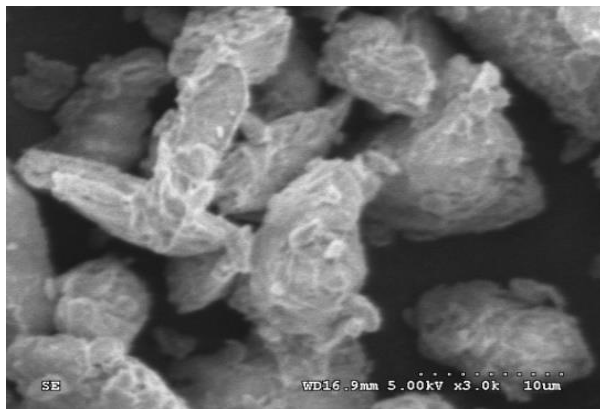
### 2.1 ตัวดูดซับ

1) โซเดียมเบนโทไนท์เป็นดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเมื่อสัมผัสกับน้ำจะเกิดการพองตัวอย่างมาก มีประจุเป็นลบซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการดูดซับโลหะหนักได้เป็นอย่างดี นิยมนำมาเป็นวัสดุหลักในการทำชั้นกันซึมเพื่อป้องกันโลหะหนักที่อยู่ในรูปสารละลายไม่ให้รั่วสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ [6,7] คุณสมบัติทางวิศวกรรมของเบนโทไนท์เป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (CH) ตามการจำแนกดินของระบบ USCS สามารถลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้ 100% มีพิคคิเลท 570% ดัชนีพลาสติก 469% และมีค่าวมตัวอิสระ 30 เท่า รูปที่ 1 แสดงลักษณะของเม็ดดินที่มีพื้นที่ผิวขรุขระกระจายอย่างสม่ำเสมอมีรูพรุนสูง

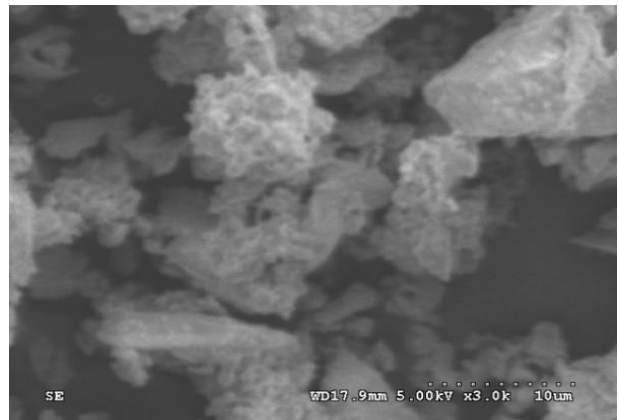
2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่เป็นวัสดุที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ มีธาตุองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดประจุลบไฮดรอกไซด์ (OH<sup>-</sup>) เป็นอย่างมาก ช่วยให้สามารถดูดซับโลหะหนักที่ส่วนใหญ่มีประจุบวกได้ดี [5] รูปที่ 2 แสดงลักษณะของซีเมนต์ที่มีพื้นที่ผิวขรุขระมาก มีเหลี่ยมมุมเล็กน้อย กระจายและขนาดเล็กกว่าเบนโทไนท์

### 2.2 ตัวถูกดูดซับ

ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้สารละลายโลหะหนัก ทองแดง สังกะสี และนิกเกิล เป็นตัวดูดซับ ซึ่งเป็นโลหะหนักที่พบได้ทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมที่ปล่อยน้ำเสีย มีรายชื่อของสารมลพิษอันดับต้นของ US Environmental Protection Agency (U.S.EPA) โดยคุณสมบัติของสารละลายโลหะหนักที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 ภาพขยายของเบนโทไนท์



รูปที่ 2 ภาพขยายของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตารางที่ 1 คุณสมบัติสารละลายโลหะหนัก

Compound	Copper Nitrate	Zinc Nitrate	Nickel Nitrate
Formula	Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
Molecular weight (g/mol)	295.65	297.49	290.79
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.070	2.065	2.050
Solubility (g/100 mL)	137.8	184.3	94.2

### 3. วิธีการศึกษา

การหาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมปูนซีเมนต์ จะใช้การทดสอบแบบกะ ซึ่งเป็นกรนำเบนโทไนท์และปูนซีเมนต์ปริมาณเพียงเล็กน้อย มาผสมกับสารละลายโลหะหนัก ปล่องให้เกิดการดูดซับ แล้วจึงวัดปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือ

#### 3.1 การทดสอบแบบกะ (Batch Adsorption Test)

ในการศึกษานี้เลือกใช้การทดสอบแบบกะเพื่อประเมินความสามารถในการดูดซับของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด วิธีการทดสอบสามารถทำได้โดยผสมดินเบนโทไนท์กับสารละลายโลหะหนัก โดยความเข้มข้นเริ่มต้นที่ใช้ในการทดสอบนำร่องนั้นอยู่ในช่วง 500 ถึง 6,000 ppm แล้วพิจารณาถึงผลการดูดซับ โดยส่วนผสมนั้นใช้เป็นเบนโทไนท์หนัก 2.375 กรัมผสมกับซีเมนต์หนัก 0.125 กรัม ซึ่งคิดอัตราส่วน 95 ต่อ 5 ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมต่อราคา [8] จากนั้นจึงเติมสารละลายโลหะหนัก 50 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่างดินแล้วนำเข้าเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิการดูดซับที่ 25 °C หลังจากเขย่าเสร็จแยกดินเบนโทไนท์ออกจากสารละลายโลหะหนักโดยใช้ตัวกรอง 0.45µm หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกทำให้เจือจางด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 1 % ก่อนนำเข้าเครื่อง Atomic Adsorption Spectrometer (AAS) โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักที่เลือกคือ 7,000, 8,000, 9,000 และ 10,000 ppm และเลือกอุณหภูมิเขย่าต่าง ๆ ที่ 10, 20, 30 และ 40 °C ตามลำดับ ซึ่งปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$q = \frac{(C_0 - C_{eq})V_{sol}}{M_s} \quad (1)$$

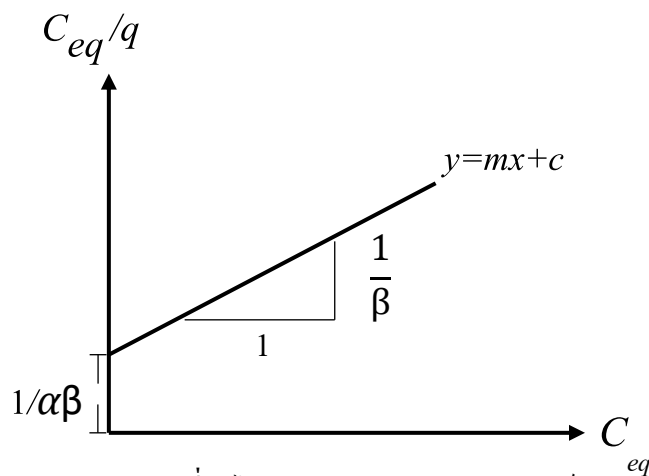
โดยที่  $q$  คือ ปริมาณของโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินกับวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $C_{eq}$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $V_{sol}$  คือ ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ (ลิตร),  $M_s$  คือ มวลของดินที่ใช้ดูดซับ (กรัม)

### 3.1.1 ไอโซเทอมการดูดซับ

การอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับนิยมใช้ไอโซเทอมการดูดซับ ซึ่งแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับและนิยมใช้อย่างแพร่หลายคือ ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช และไอโซเทอมการดูดซับของ BET [10] ในการศึกษาในครั้งนี้ใช้ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ในการวิเคราะห์การดูดซับ เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้นั้นสามารถอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับได้ดี สามารถเขียนเป็นสมการที่ 2 และสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 3

$$q = \frac{\alpha\beta C_{eq}}{1 + \alpha C_{eq}} \quad (2)$$

- โดยที่  $q$  คือ ปริมาณของโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินกับวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ดูดซับ (มิลลิกรัมต่อ  $\beta$  กรัม)  
 $C_{eq}$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $\alpha$  คือ ปริมาณสูงสุดของสารละลายโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินที่ใช้ดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $\beta$  คือ ค่าคงที่การดูดซับของ Langmuir (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

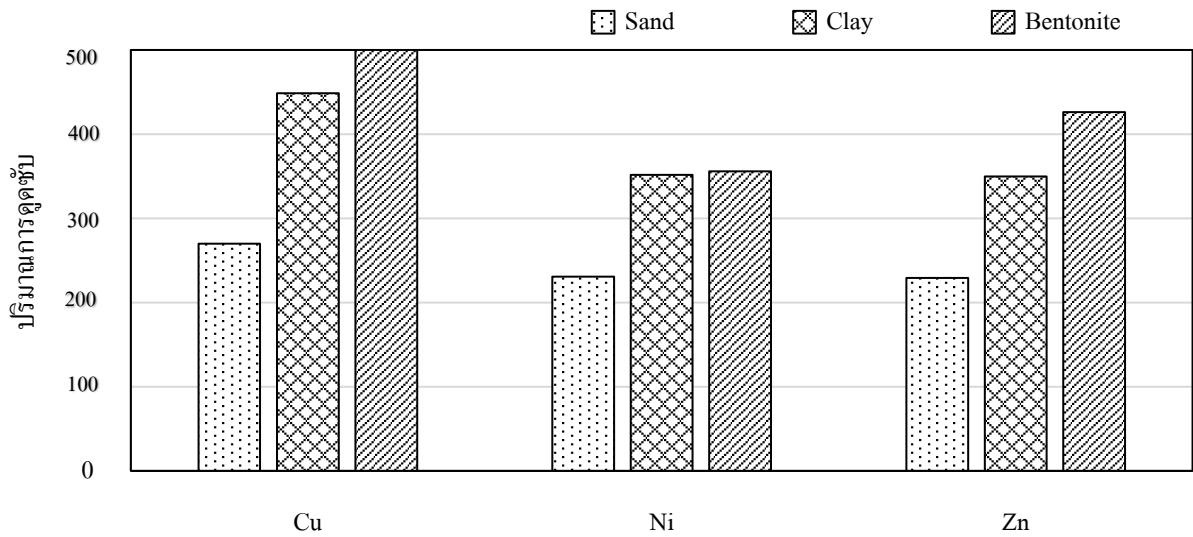


รูปที่ 3 ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์

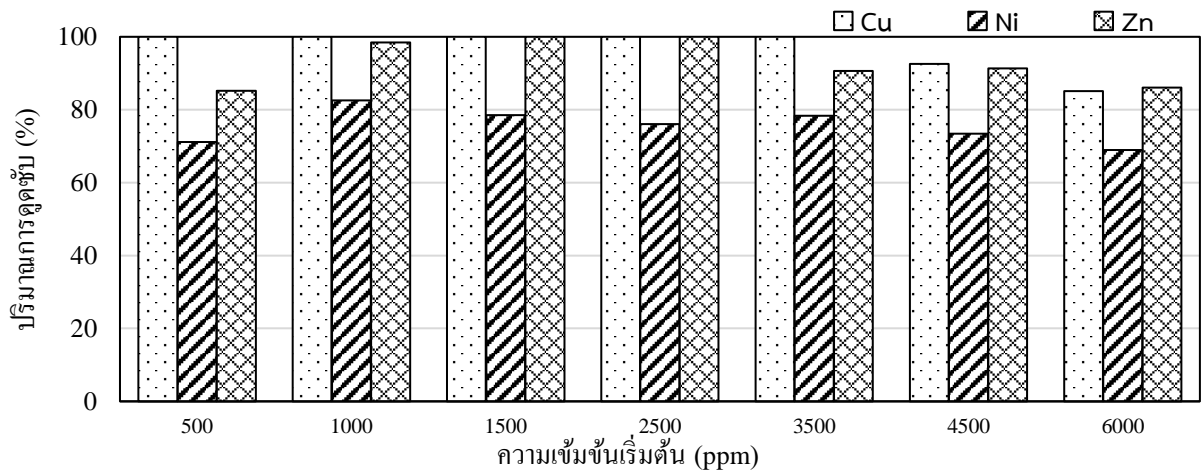
## 4. ผลการศึกษา

### 4.1 ผลการทดสอบแบบกะ

เนื่องจากเบนโทไนท์จัดเป็นดินเหนียวชนิดหนึ่ง จึงได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับเปรียบเทียบกับดินชนิดอื่น ที่ความเข้มข้นโลหะหนัก 500 ppm ดังแสดงภาพที่ 4 ซึ่งพบว่าเบนโทไนท์มีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าดินทั้ง 2 ชนิด ความเข้มข้นเริ่ม 500 ppm เพียงพอสำหรับดินทั้ง 2 ชนิด แต่ไม่เพียงพอสำหรับเบนโทไนท์ จึงได้ทำการทดสอบเพื่อหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมในการดูดซับสำหรับเบนโทไนท์ โดยเริ่มทดสอบที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 500 – 6,000 ppm ดังแสดงในรูปที่ 5 จากซึ่งพบว่าความเข้มข้นโลหะหนักที่ 6,000 ppm เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมในการดูดซับสำหรับเบนโทไนท์ สำหรับการศึกษาศามารถในการดูดซับของดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความเข้มข้นที่เหมาะสมควรมากกว่า 6,000 ppm จึงได้เลือกความเข้มข้นเริ่มต้น ที่ 7,000 ppm



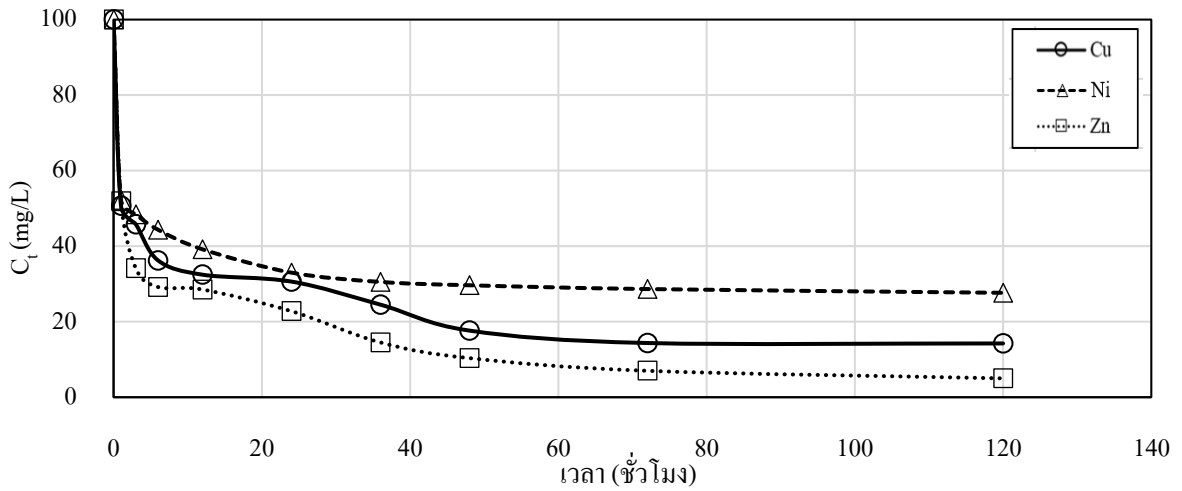
รูปที่ 4 เปรียบเทียบศักยภาพในการดูดซับโลหะหนักความเข้มข้น 500 ppm ของดิน 3 ชนิด



รูปที่ 5 การดูดซับของดินเหนียวเบนโทไนท์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

#### 4.2 เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับของเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์

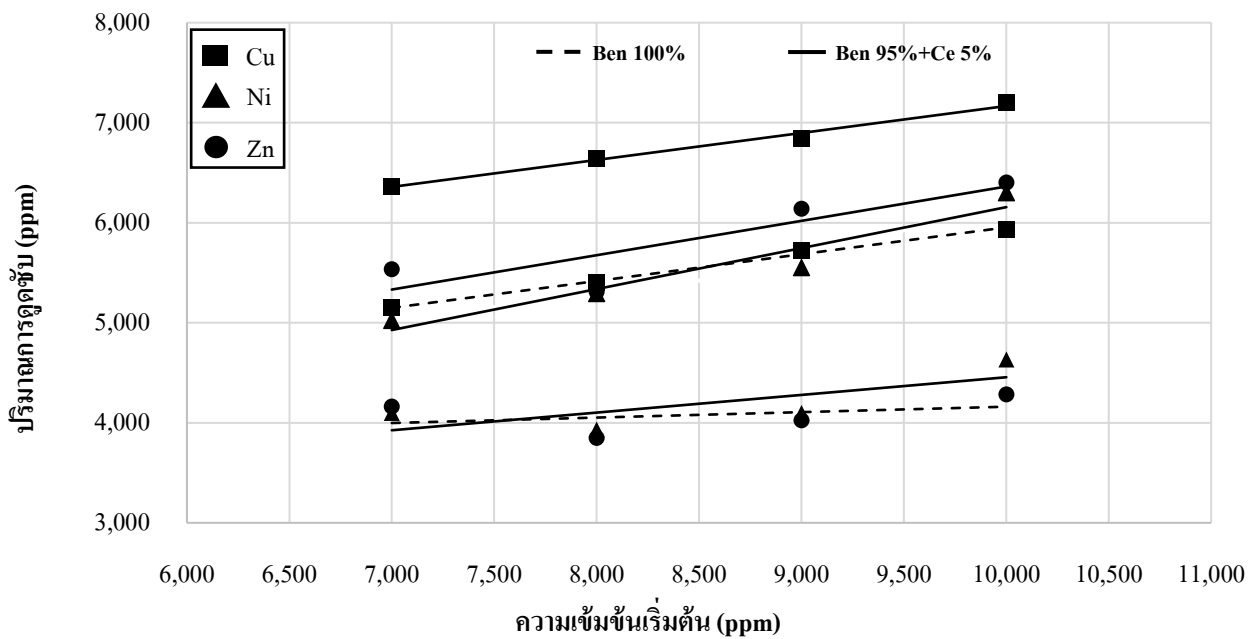
การดูดซับโลหะที่เวลาต่าง ๆ ของเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์โดยใช้ความเข้มข้นโลหะหนัก เริ่มต้น 7,000 ppm แสดงในรูปที่ 6 ซึ่งแสดงถึงความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ที่เวลาเข้าต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นว่าความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 0 ถึง 3 ชั่วโมงแรก และจะค่อยๆลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งความเข้มข้นเริ่มคงที่ ที่เวลา 48 ชั่วโมง ทั้งนี้ เนื่องจากพื้นที่การดูดซับถึงจุดอิ่มตัว สรุปได้ว่าการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด เข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 48 ชั่วโมง



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือของโลหะหนักที่เวลาต่าง ๆ ความเข้มข้นเริ่มต้น 7,000 ppm

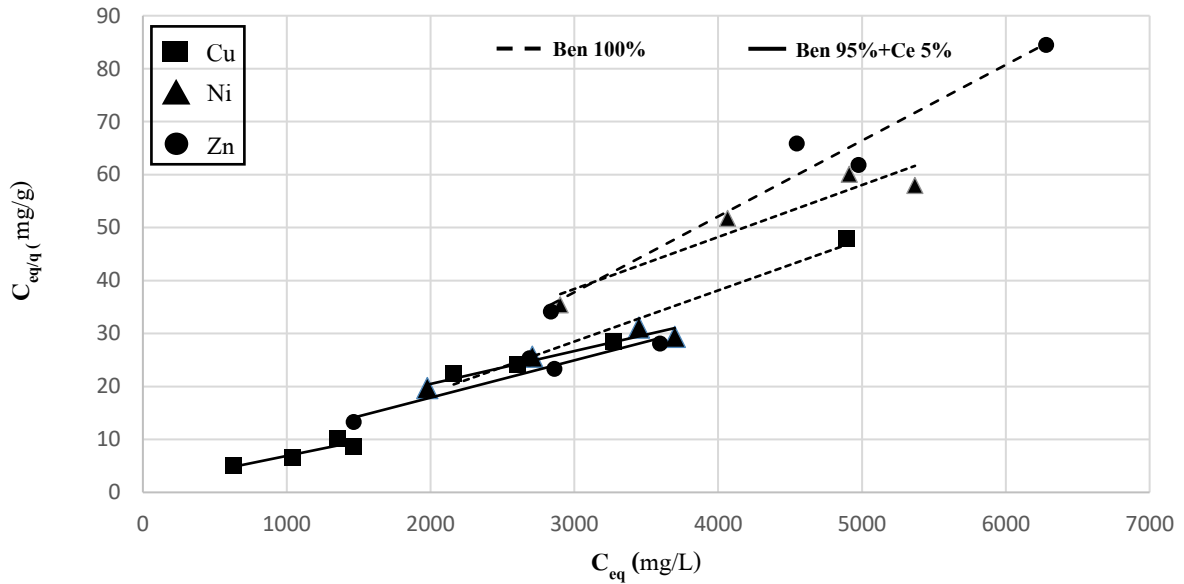
#### 4.3 อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก

ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของเบนโทไนท์ผสมซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีการควบคุมเวลาเข่า 48 ชั่วโมง pH 5 และอุณหภูมิ 25 °C แสดงในรูปที่ 6 ซึ่งจะพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด มีความสามารถในการดูดซับที่มากขึ้น จากการทดสอบพบว่าการเติมปูนซีเมนต์ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้เบนโทไนท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยโลหะหนักที่ถูกดูดซับเรียงตามลำดับดังนี้ ทองแดง > นิกเกิล > สังกะสี



รูปที่ 7 อิทธิพลของความเข้มข้นที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

เมื่อนำความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินที่ใช้ในการดูดซับ จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 8 ซึ่งลักษณะของกราฟจะเป็นเส้นตรง จากกราฟสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของแลงเมียร์ ( $\beta$  และ  $\alpha$ ) และค่า  $R^2$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความถูกต้อง ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 8 ไอโซเทอมการดูดซับของแดง นิกเกิล และสังกะสี ของแลงเมียร์

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของแลงเมียร์

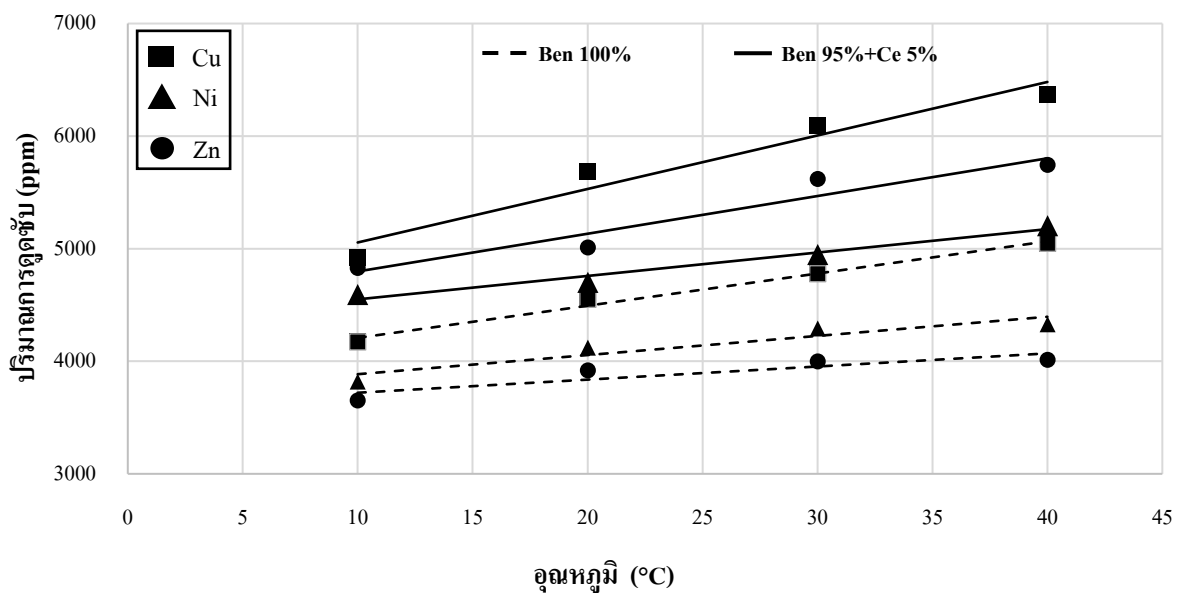
ตัวดูดซับ	โลหะหนัก	$R^2$	$\beta$ (mg/g)	$\alpha$ (l/mg)
Ben 100%	Cu	0.9714	103.09	0.0204
	Ni	0.9087	102.04	0.00109
	Zn	0.9575	69.93	0.0269
Ben 95%+Ce5%	Cu	0.814	181.8	0.0041
	Ni	0.9175	162.29	0.0007
	Zn	0.9292	142.86	0.0018

จากตารางที่ 2 จะพบว่า ค่าการดูดซับของแดงมีค่า  $\beta$  สูงที่สุดโดยเบนโทไนท์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 กรัม (อัตราส่วน 95:5) สามารถดูดซับสารละลายโลหะหนักของแดงได้ 181.8 มิลลิกรัม ลองลงมาเป็นนิกเกิลและสังกะสี ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า  $R^2$  พบว่าการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดมีค่า  $R^2$  ค่อนข้างสูงซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์สามารถอธิบายพฤติกรรมดูดซับได้เป็นอย่างดี



#### 4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 9 ซึ่งพบว่าการดูดซับโลหะหนักทั้งสามชนิดที่อุณหภูมิจากต่ำไปสูง มีแนวโน้มการดูดซับเพิ่มขึ้นไปในทางเดียวกัน โดยที่การดูดซับของทองแดง จะเพิ่มขึ้นได้มากที่สุดตามอุณหภูมิ รองลงมาเป็นสังกะสีและนิกเกิล การเติมปูนซีเมนต์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้กับเบนโทไนท์ได้เป็นอย่างดี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยังพบว่าซีเมนต์จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงขึ้น การที่ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากหลายสาเหตุ ได้แก่ การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ขนาดโพรงในเม็ดดินใหญ่ขึ้น หรือทำให้อนุภาคโลหะหนักเคลื่อนตัวไปยังผิวของเม็ดดินได้ดีขึ้น [3,12] และทำให้ปฏิกิริยาเคมีของปูนซีเมนต์เกิดได้ดีขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้น



รูปที่ 9 ปริมาณการดูดซับโลหะหนักที่อุณหภูมิต่าง ๆ

#### 5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักและอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ด้วยดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้วิธีการทดสอบแบบกะ สามารถสรุปได้ว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-3 ชั่วโมง แล้วค่อยๆลดลงจนเข้าสู่สภาวะสมดุลในระยะเวลา 48 ชั่วโมง เนื่องจากการศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเหนียวเบนโทไนท์มีความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้น 6,000 ppm ได้ดีโดยประสิทธิภาพในการดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักเพิ่มขึ้น ซึ่งการศึกษานี้แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์สามารถอธิบายการดูดซับได้ดีเพราะค่าความถูกต้องมีค่าเข้าใกล้ 1 นั้นเอง และเมื่ออุณหภูมิระหว่างการดูดซับสูงขึ้น การดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนโครงการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ibtissem Ghorbel-Abid and Malika Trabelsi-Ayadi, *Competitive adsorption of heavy metals on local landfill clay*. King Saud University, 2011.
- [2] พลัญจู่ ไสภณกิจโกศล, วิไล ไสภณกิจโกศล, *การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวเพื่อใช้ในการดูดซับโลหะโครเมียม*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2554.
- [3] ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. *มลพิษทางดิน*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2559.
- [4] นพปฎล เสี่ยงมศักดิ์, พงศกร พรรณรัตน์ศิลป์. การดูดซับโลหะหนักของดินลมหอบสีแดง. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 2554, 22(1): 1-8.
- [5] อานันต์ จันทร์ดวง. อิทธิพลของวัสดุพอลิโซลันที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักบนดิน. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2560.
- [6] ธนิต เฉลิมยานนท์, *ธรณีเทคนิคของของเสีย*, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2550.
- [7] Mohammad Kashif Uddin, *A review on the adsorption of heavy metals by clay micerals, with special focus on the past decade*. Basic Engineering sciences department, college of engineering, Majmaah university, 2017.
- [8] ณัฐนันท์ ไตรังว, พงศกร พรรณรัตน์ศิลป์. อิทธิพลของวัสดุทางเลือกต่อการดูดซับโลหะหนักปนเปื้อนในดินลมหอบ. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21*, 2559, หน้า 1, 198-1, 202.
- [9] เลิศ เกิดชัยภูมิ, พงศกร พรรณรัตน์ศิลป์. การศึกษาความสามารถการดูดซับโลหะหนักโดยดินมูกดาหารในห้องปฏิบัติการ. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 2555, 23(1): 21-27.
- [10] เลิศ เกิดชัยภูมิ และ พงศกร พรรณรัตน์ศิลป์. อิทธิพลของปริมาณดินเหนียวต่อการดูดซับโลหะหนัก. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 2554, 22(2), หน้า 1 – 7.
- [11] Wang S Terdkiatburana T, Tade MO, *Single and co-adsorption of heavy metals and humic acid on fly ash*. Purification Technology, 2018
- [12] Panha Sariem, Pongsakorn Punrattanasin, Adsorption of Copper, Zinc, and Nickel Using Loess as Adsorbents. *Pol.J. Environ. Stud.* 2015, Vol.24, No.3.