



การดูดซับโลหะหนักด้วยดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์และวัสดุพอซโซลาน
ADSORPTION OF HEAVY METALS ON BENTONITE CLAY MIXED WITH
CEMENT AND POZZOLANIC MATERIALS

ณัฐฐา ออประเสริฐ^{1*}, พงศกร พรณรัตน์ศิลป์², ศิริรัตน์ พัฒนไพโรจน์³, ธนาคล คงสมบูรณ์⁴

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²นักวิจัย, ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

³อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

⁴ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

*Corresponding author: natta.o@kkumail.com

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันประเทศไทยกำลังเผชิญกับการลักลอบปล่อยน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักสู่ธรรมชาติ ซึ่งโลหะหนักไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ สามารถสะสมอยู่ในคน สัตว์ และพืช และทำให้เกิดเป็นมลพิษทางดินและน้ำ เมื่อได้รับเข้าไปในปริมาณมากอาจส่งผลกระทบต่อร่างกายได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับโลหะหนัก 2 ชนิด ประกอบด้วย ทองแดง และสังกะสี ด้วยดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์และวัสดุพอซโซลาน 6 ชนิด ประกอบด้วย 1) เถ้าหนัก, 2) เถ้าลอย, 3) เถ้าแกลบ, 4) ดินขาวเผา, 5) ตะกรันเหล็กบด และ 6) ซิลิกาฟุ้ง ซึ่งใช้วิธีการทดสอบแบบกะ วัสดุเหล่านี้ถูกนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติพื้นฐานของดิน โดยพารามิเตอร์ที่มีต่อการดูดซับคือ ความเข้มข้นเริ่มต้นและเวลาในการดูดซับ จากผลการทดสอบพบว่า การดูดซับเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 48 ชั่วโมง แบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์สามารถอธิบายพฤติกรรมการดูดซับนี้ได้ดี ซึ่งสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ ดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์ > เถ้าลอย > เถ้าหนัก > ตะกรันเหล็กบด > ดินขาวเผา > ซิลิกาฟุ้ง > เถ้าแกลบ ตามลำดับ

คำสำคัญ: โลหะหนัก, การดูดซับ, ไอโซเทอร์ม, ดินเหนียวเบนโทไนท์, ซีเมนต์, วัสดุพอซโซลาน, การทดสอบกะ

ABSTRACT

At present, Thailand is facing the smuggling of wastewater to nature which consists of heavy metal contamination causing soil and water pollution. The heavy metals cannot be decomposed naturally and also able to accumulate in humans, animals, and plants. Moreover, when getting in large quantities, it can affect the body system. This laboratory-based study experimented by using bentonite clay to adsorb two heavy metals: copper and zinc. Bentonite clay was used and mixed with cement and various pozzolanic materials, consisting of 1) bottom ash 2) fly ash 3) rice husk ash 4) kaolinite 5) blast slag and 6) silica fume with batch adsorption

Natta Orprasert^{1*}, Pongsakorn Punrattanasin², Sirorat Pattanapiroj³, Thanadol Kongsomboon⁴

¹Master's student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

²Researcher, Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Khon Kaen University

³Lecturer, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

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

test. These materials were analyzed for chemical composition and the basic properties of bentonite clay. The parameters on the adsorption process were the initial concentration of the heavy metal solution and equilibrium time. The results showed that the adsorption began to enter the equilibrium at 48 hours. The effects of adsorption capacity by using bentonite clay mixed with cement and pozzolanic materials were analyzed by Langmuir's adsorption isotherm. The adsorption capacity of the samples was in the order of bentonite clay mixed with cement > fly ash > bottom ash > blast slag > kaolinite > silica fume > rice husk ash respectively

KEYWORDS: heavy metals, adsorption, isotherm, bentonite clay, cement, pozzolanic materials, batch adsorption test

1. บทนำ

จากรายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2559 กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมพบว่า แหล่งน้ำและดินในแต่ละภาคของประเทศไทยมีการปนเปื้อนโลหะหนัก เกิดจากหลายสาเหตุ อาทิเช่น การทำการเกษตร การทำเหมืองแร่ อุตสาหกรรมการพิมพ์ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมพลาสติก เป็นต้น [1] ซึ่งน้ำที่ถูกปล่อยออกมาจากอุตสาหกรรมเหล่านี้โดยไม่มีกระบวนการบำบัดก่อนจะมีกลิ่นและสีที่สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนและยังมีโลหะหนักเจือปนออกมาด้วย ซึ่งโลหะหนักเป็นสารที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เองในกระบวนการทางธรรมชาติ มีเสถียรภาพ สามารถละลายตกตะกอนในน้ำสะสมอยู่ในดินและอากาศได้ นอกจากนี้ยังสามารถสะสมอยู่ในพืชและสิ่งมีชีวิตต่างๆ เมื่อสิ่งมีชีวิตได้รับโลหะหนักเข้าไปในปริมาณมากจะทำให้ระบบของร่างกายมีการแปรปรวน ทำงานไม่ปกติ ส่งผลให้เป็นโรคต่างๆ ได้ [2] โดยได้มีการศึกษาวิธีการกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ในหลายวิธี เช่น การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี, การบำบัดทางชีวภาพ, การแลกเปลี่ยนไอออน และการดูดซับ เป็นต้น [3] ในหลายงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนัก เช่น การดูดซับโลหะหนักด้วยดินหลายชนิด พบว่าดินที่สามารถดูดซับได้ดีที่สุดคือ ดินเหนียว [4] เนื่องจากมีพื้นผิวขรุขระ พื้นผิวจำเพาะสูง และแร่ดินเหนียวมีประจุเป็นลบ โดยธรรมชาติสามารถดึงดูดประจุบวกของโลหะหนักมาเกาะติดบริเวณผิวของเม็ดดินได้ จึงทำให้สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าดินชนิดอื่น [5] และการศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักโดยใช้ดินหลายชนิดผสมกับซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน 6 ชนิด พบว่า ดินเหนียวผสมกับซีเมนต์สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุด [6] ด้วยเหตุผลนี้จึงเลือกใช้ดินเหนียวเบนโทไนท์ ซึ่งจัดเป็นดินเหนียวประเภทหนึ่ง มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าดินเหนียวทั่วไปและค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำมาก เป็นวัสดุหลักในการดูดซับโลหะหนักซึ่งจะนำมาผสมกับซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน 6 ชนิด ประกอบด้วย 1) เถ้าหนัก, 2) เถ้าลอย, 3) เถ้าแกลบ, 4) ดินขาวเผา, 5) ตะกรันเหล็กบด และ 6) ซิลิกาฟุ้ง เนื่องจากวัสดุเหล่านี้สามารถหาได้ง่ายโดยทั่วไปและต้องการเพิ่มศักยภาพให้ดินเหนียวเบนโทไนท์โดยการนำซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานเข้ามาแทนที่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบหาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน 6 ชนิด ที่อัตราส่วน 90:10 โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการทดสอบแบบกะและวิเคราะห์โดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับ

2. วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษานี้ใช้ดินเหนียวเบนโทไนท์ (Bentonite Clay) เป็นวัสดุหลักซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ มอนมอริลโลไนต์ (Montmorillonite) นอกจากนี้ยังมี ซิลิกอน, อลูมินา, เหล็ก, แคลเซียม และแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบรองลงมา มีขนาดเม็ดดินที่เล็ก เป็นเหลี่ยมมุมและพื้นที่ผิวจำเพาะมากทำให้พองตัวได้สูงและอุ้มน้ำได้ดี [7] เมื่อจำแนกดินเหนียวเบนโทไนท์ตามระบบ Unified Soil Classification (USCS) ซึ่งผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ร้อยละ 100 และผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ร้อยละ 90 พบว่าเป็นดินเหนียวที่มีความเหนียวสูง (CH) โดยมีคุณสมบัติพื้นฐาน ประกอบด้วย ค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.60, ซึ่ดจำกัดเหลว

ร้อยละ 570 และดัชนีพลาสติกร้อยละ 469 จากคุณสมบัติพื้นฐานจะเห็นได้ว่าดินเหนียวเบนโทไนท์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำต่ำ (ปริมาณน้ำมากจึงจะเปลี่ยนสภาพ) ซึ่งจะนำวัสดุหลักมาผสมกับซีเมนต์และวัสดุพอซโซลาน 6 ชนิด ประกอบด้วย 1) เถ้าหนัก, 2) เถ้าลอย, 3) เถ้าแกลบ, 4) ดินขาวเผา, 5) ตะกรันเหล็กบด และ 6) ซิลิกาฟูม ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวเบนโทไนท์, ซีเมนต์และวัสดุพอซโซลาน 6 ชนิด

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ดินเหนียวเบนโทไนท์	ซีเมนต์	เถ้าลอย	เถ้าหนัก	เถ้าแกลบ	ดินขาวเผา	ตะกรันเหล็กบด	ซิลิกาฟูม
SiO ₂	56.8	20.0	41.2	47.5	79.5	55.0	40.0	92.0
Al ₂ O ₃	15.1	5.0	22.3	20.3	0.5	40.0	11.0	0.7
Fe ₂ O ₃	9.8	3.0	11.5	10.9	1.0	-	0.3	-
MgO	4.6	1.1	2.7	2.6	0.5	0.5	7.0	0.2
CaO	2.8	60.0	15.3	13.2	0.5	0.3	32.0	0.5

จากตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุแต่ละชนิดประกอบด้วย SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO และ CaO ในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งซีเมนต์มี SiO₂ และ CaO เป็นธาตุองค์ประกอบหลัก เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ (H₂O) จะทำให้เกิด OH⁻ ซึ่งเป็นประจุลบ จึงทำให้สามารถดึงดูดสารละลายโลหะหนักที่มีประจุเป็นบวกได้ดี [6,8]

โลหะหนักที่ใช้ในการศึกษา

โลหะหนักเป็นสารอันตราย สามารถสะสมได้ในแหล่งน้ำและดิน ซึ่งไม่สามารถสลายตัวได้ในธรรมชาติ เมื่อรับเข้าสู่ร่างกายจะส่งผลให้เกิดการแปรปรวนของระบบต่างๆภายในร่างกายทั้งคนและสัตว์ [2] สามารถพบได้บ่อยบริเวณแหล่งน้ำใกล้กับโรงงานอุตสาหกรรม และโลหะหนักที่พบมากมีหลายชนิดแต่ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับโลหะหนัก 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสารละลาย ประกอบด้วย 1) สารละลายทองแดง และ 2) สารละลายสังกะสี โดยคุณสมบัติของสารละลายโลหะหนักแต่ละชนิดจะแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสารละลายโลหะหนัก

คุณสมบัติ	Copper (II) Nitrate Hexahydrate	Zinc (II) Nitrate Hexahydrate
สูตรทางเคมี	(Cu(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O) ₉	(Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O) ₉
มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	241.6	297.5
ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	2.32	2.06
ความสามารถละลายได้ (กรัม/100 ลบ.ซม.)	137.8	184.3

3. วิธีการทดสอบ

การทดสอบแบบกะ (Batch Adsorption Test)

การทดสอบแบบกะจะเริ่มจากการทดสอบหาความเข้มข้นเริ่มต้นในการดูดซับสารละลายโลหะหนักด้วยการลองผิดลองถูก (Trial and error) โดยใช้ดินเหนียวเบนโทไนท์ทดสอบดูดซับสารละลายโลหะหนักทั้ง 2 ชนิด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 จนถึง 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า สามารถดูดซับสารละลายโลหะหนักทั้ง 2 ชนิด ได้ประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งในการศึกษาการดูดซับด้วยดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับปอชโซลาน 6 ชนิด จะเลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักที่ 7,000, 8,000, 9,000 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อผสมซีเมนต์เข้าไปจะทำให้มีความสามารถดูดซับสารละลายโลหะหนักทั้ง 2 ชนิด สูงกว่าที่ผสมกับวัสดุอื่นมาก ดังนั้นในการทดสอบการดูดซับด้วยดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์จึงเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักเป็น 15,000, 16,000, 17,000 และ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทราบความเข้มข้นที่ต้องการแล้วจึงทดสอบหาเวลาสมดุลในการดูดซับ โดยใช้ดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับวัสดุแต่ละชนิด เก็บตัวอย่างทดสอบที่เวลา 1, 3, 6, 12, 24, 36, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง ตามลำดับ และทดสอบหาความสามารถในการดูดซับสารละลายโลหะหนักเริ่มจากการเตรียมดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับวัสดุแต่ละชนิดด้วยอัตราส่วน 90:10 โดยน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักรวมเท่ากับ 2.5 กรัม แล้วเทสารละลายโลหะหนักที่เตรียมไว้ลงไปประมาณ 50 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Horizontal Shaker) ด้วยอัตราเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองโลหะหนักแล้วเจือจางด้วยกรดไนตริกเพื่อนำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นที่คงเหลืออยู่ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) [9] เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้วจึงเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นให้ครบทั้ง 4 ค่า ซึ่ง 1 การทดสอบจะทำซ้ำ 3 ครั้ง และปริมาณสารละลายโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับวัสดุแต่ละชนิดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

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

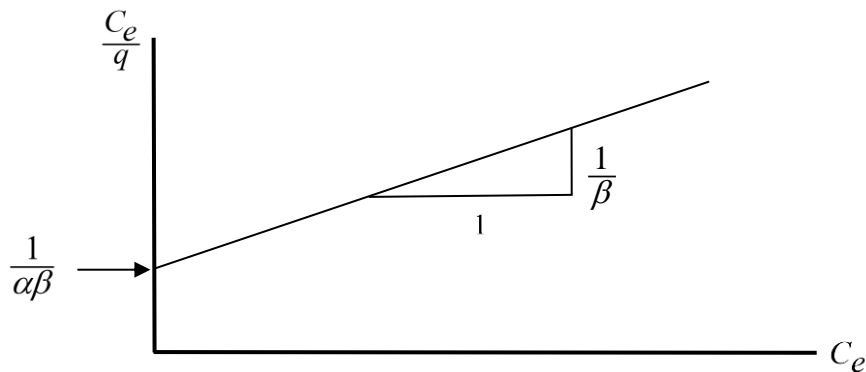
เมื่อ q คือ ปริมาณสารละลายโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับวัสดุแต่ละชนิด, C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก, C_e คือ ความเข้มข้นสารละลายเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลของสารละลายโลหะหนัก, V_{sol} คือ ปริมาตรของสารละลายที่ใช้และ M_s คือ มวลของดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ในการดูดซับ

ในการศึกษาการดูดซับสามารถวิเคราะห์โดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับได้หลายแบบ ในงานวิจัยนี้ใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ในการอธิบายการดูดซับ ซึ่งสมการของแลงเมียร์แสดงดังสมการที่ 2 โดยสามารถจัดรูปสมการให้เป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 3 และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการได้ดังรูปที่ 1

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

เมื่อ β คือ ปริมาณสูงสุดของสารละลายโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ, α คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{\alpha\beta} + \frac{C_e}{\beta} \quad (3)$$

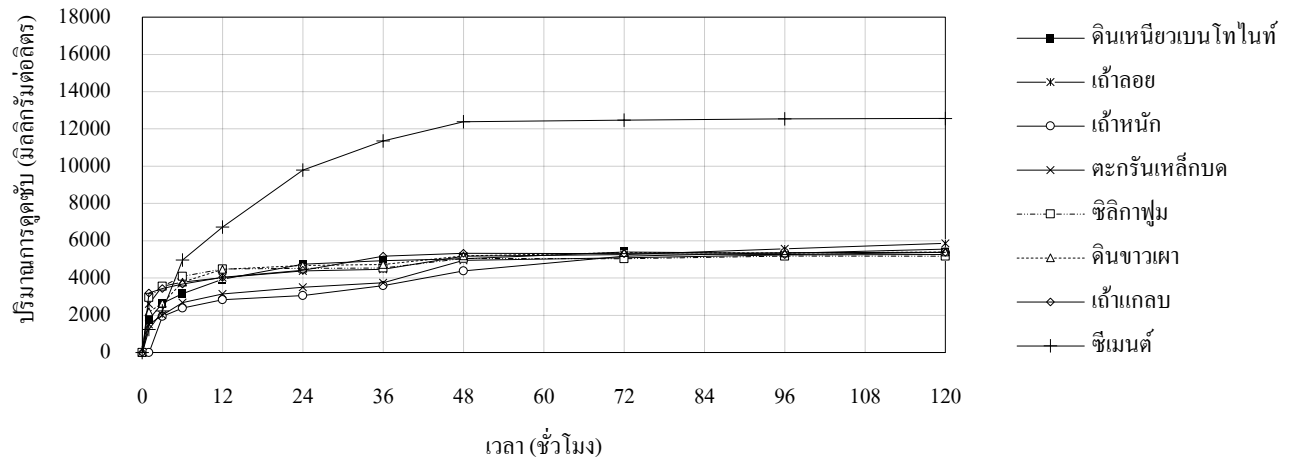


รูปที่ 1 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์

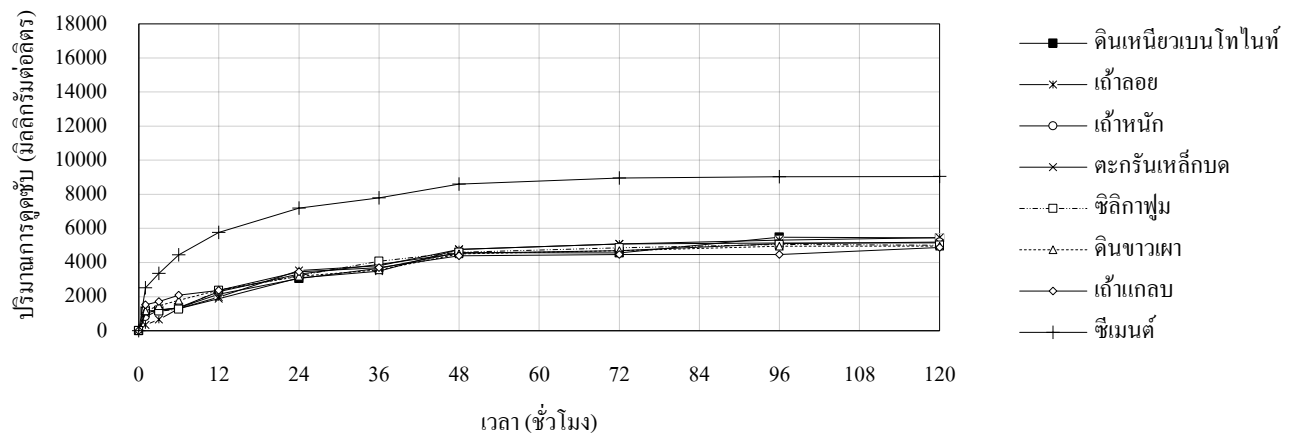
4. ผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบหาเวลาสมดุลในการดูดซับ

จากการทดสอบหาเวลาสมดุลในการดูดซับสารละลายทองแดงและสังกะสี โดยใช้ดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์และวัสดุพอซโซลาน 6 ชนิด ประกอบด้วย 1) ใต๋หนัก, 2) ใต๋ลอย, 3) ใต๋แกลบ, 4) ดินขาวเผา, 5) ตะกรันเหล็กบด และ 6) ซีลิกาฟูม ที่อัตราส่วน 90:10 โดยน้ำหนัก เก็บตัวอย่างทดสอบที่เวลา 1, 3, 6, 12, 24, 36, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการดูดซับสารละลายทองแดง ดังรูปที่ 2 และสารละลายสังกะสี ดังรูปที่ 3 ในช่วง 0-6 ชั่วโมงแรก ความสามารถในการดูดซับของดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์และวัสดุพอซโซลานแต่ละชนิดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งประมาณชั่วโมงที่ 48 การดูดซับเริ่มคงที่จนถึงชั่วโมงที่ 120 ซึ่งหมายความว่าอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายตัวดูดซับ กล่าวคือ ระยะเวลาการดูดซับสมดุล (Equilibrium Time) เป็นระยะเวลาที่การดูดซับเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล ดังนั้น เวลาเข้าสู่สมดุล คือ 48 ชั่วโมง แต่ในการทดสอบจะเลือกใช้ที่เวลา 120 ชั่วโมง



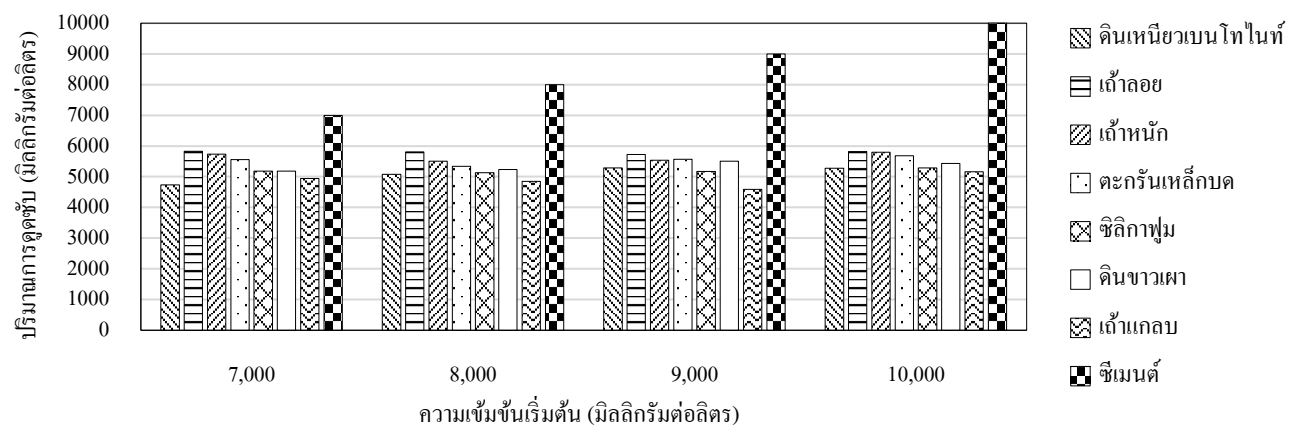
รูปที่ 2 กราฟเวลาสมมูลของสารละลายทองแดง



รูปที่ 3 กราฟเวลาสมมูลของสารละลายสังกะสี

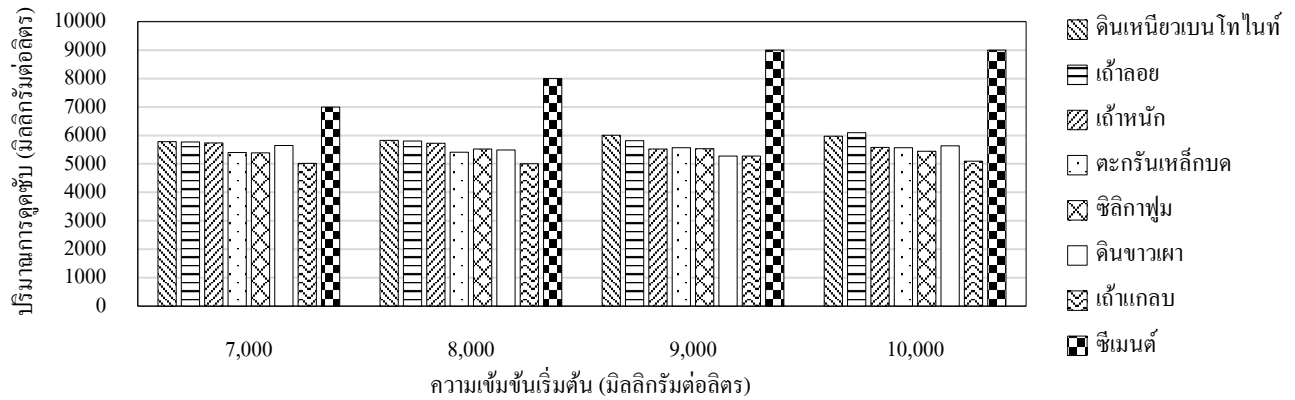
4.2 การทดสอบหาความสามารถในการดูดซับ

จากการทดสอบการดูดซับสารละลายทองแดงด้วยดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับ 1) ซีเมนต์, 2) เถ้าหนัก, 3) เถ้าลอย, 4) เถ้าแกลบ, 5) ดินขาวเผา, 6) ตะกรันเหล็กบด และ 7) ซิลิกาฟุ้ง อัตราส่วน 90:10 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก คือ 7,000, 8,000, 9,000 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์สามารถดูดซับสารละลายทองแดงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 7,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้หมดและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 8,000, 9,000 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ยังคงสามารถดูดซับได้หมดซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับวัสดุอื่นๆ และถัดมาเป็นดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับเถ้าลอย, เถ้าหนัก, ตะกรันเหล็กบด, ดินขาวเผา, ซิลิกาฟุ้ง และเถ้าแกลบ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นปริมาณการดูดซับก็ยังคงค่อนข้างคงที่ ดังรูปที่ 4 และเมื่อได้ค่าปริมาณการดูดซับแล้วสามารถนำไปวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับได้ดังรูปที่ 7



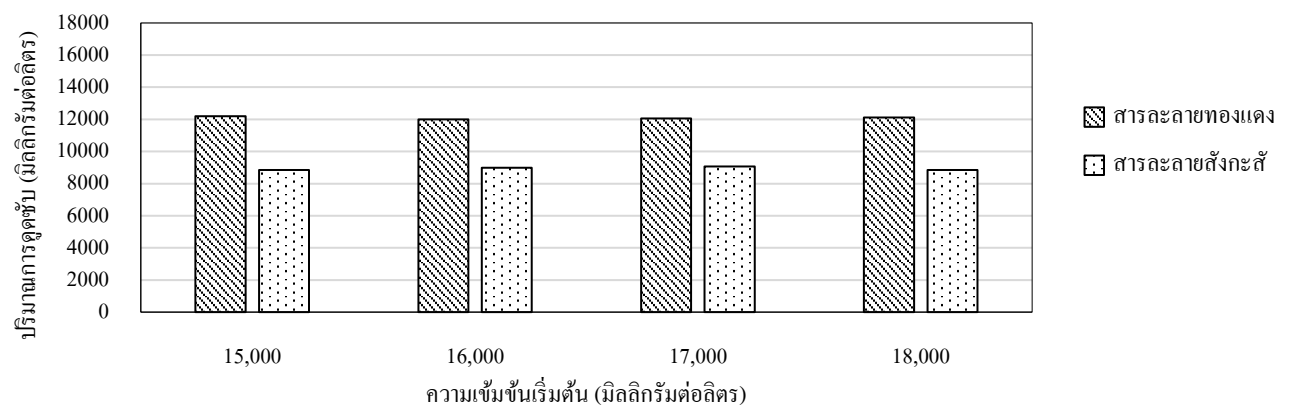
รูปที่ 4 ความสามารถในการดูดซับสารละลายทองแดงที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ (7,000-10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร)

จากการทดสอบการดูดซับสารละลายสังกะสีด้วยดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับ 1) ซีเมนต์, 2) เถ้าหนัก, 3) เถ้าลอย, 4) เถ้าแกลบ, 5) ดินขาวเผา, 6) ตะกรันเหล็กบด และ 7) ซิลิกาฟุ้ง อัตราส่วน 90:10 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก คือ 7,000, 8,000, 9,000 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์สามารถดูดซับสารละลายสังกะสีที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 7,000, 8,000 และ 9,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ทั้งหมด เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ปริมาณการดูดซับมีค่าสูงถึง 9,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่ามากกว่าดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับวัสดุอื่นมาก ลำดับถัดมาเป็นดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับเถ้าลอยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งต่างจากการผสมกับวัสดุอีก 5 ชนิด ประกอบด้วย เถ้าหนัก, ตะกรันเหล็กบด, ซิลิกาฟุ้ง, ดินขาวเผา และเถ้าแกลบ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นปริมาณการดูดซับมีค่าค่อนข้างคงที่หรือเท่าเดิม ดังรูปที่ 5 และสามารถนำไปหาไอโซเทอมการดูดซับได้ ดังรูปที่ 7



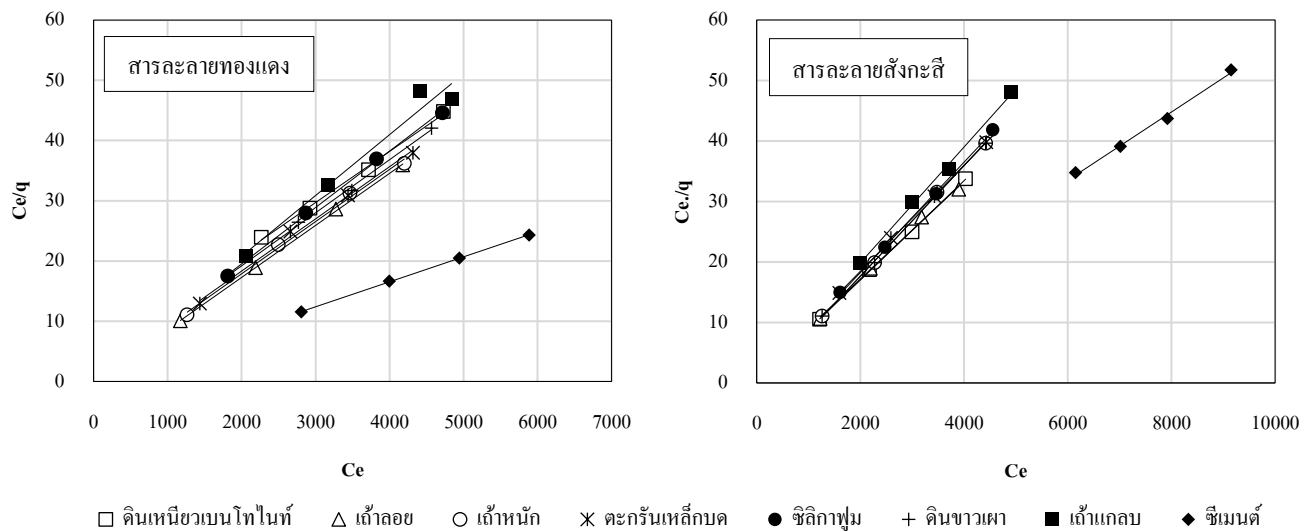
รูปที่ 5 ความสามารถในการดูดซับสารละลายสังกะสีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ (7,000-10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร)

จากการทดสอบการดูดซับสารละลายทองแดงและสังกะสีด้วยดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์ อัตราส่วน 90:10 โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 7,000-10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่าสามารถดูดซับสารละลายทองแดงและสังกะสีได้ถึง 10,000 และ 9,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จึงได้เพิ่มความเข้มข้นต้นของสารละลายโลหะหนักเป็น 15,000-18,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ดินเหนียวเบนโทไนท์สามารถดูดซับสารละลายทองแดงได้ถึง 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น ความสามารถในการดูดซับเท่าเดิม ถัดมาเป็นการดูดซับสารละลายสังกะสีที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 15,000 พบว่า สามารถดูดซับได้เพียง 9,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นความสามารถในการดูดซับก็ยิ่งเท่าเดิม ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับสารละลายทองแดง ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสามารถในการดูดซับสารละลายโลหะหนักของดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์

จากผลการทดสอบหาความสามารถในการดูดซับ สามารถนำค่าปริมาณการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่สภาวะสมดุล (C_e) ต่อปริมาณสารละลายโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อปริมาณเบนโทไนท์ที่ผสมกับวัสดุแต่ละชนิด (q) กับความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่สภาวะสมดุล (C_e) จะได้เป็นกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายทองแดงและสังกะสีของแลงเมียร์ ดังรูปที่ 7 ซึ่งไอโซเทอร์มของแลงเมียร์สามารถอธิบายการดูดซับนี้ได้ดี และจากกราฟจะสามารถหาปริมาณสูงสุดของสารละลายโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินที่ใช้ดูดซับ (β) และค่าคงที่ของแลงเมียร์ (α) ดังตารางที่ 3



รูปที่ 7 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับไอโซเทอร์มของแลงเมียร์

สารละลายทองแดง				สารละลายสังกะสี			
วัสดุ	α (L/mg)	β (mg/g)	R^2	วัสดุดูดซับ	α (L/mg)	β (mg/g)	R^2
ดินเหนียวเบนโทไนท์ (B)	0.00200	117.647	0.9964	ดินเหนียวเบนโทไนท์ (B)	0.01378	121.951	0.9994
B + ใ้ลลอย	0.45989	116.279	0.9996	B + ใ้ลลอย	0.00813	123.457	0.9969
B + ใ้ลหนัก	0.01617	114.943	0.9957	B + ใ้ลหนัก	0.01472	109.890	0.9995
B + ตะกรันเหล็กบด	0.00886	114.943	0.9965	B + ตะกรันเหล็กบด	0.00949	113.636	0.9995
B + ซิลิกาฟูม	0.01203	106.383	0.9990	B + ซิลิกาฟูม	4.13636	109.890	0.9993
B + ดินขาวเผา	0.00563	113.636	0.9978	B + ดินขาวเผา	0.01472	109.890	0.9995
B + ใ้ลแกลบ	0.02330	97.087	0.9685	B + ใ้ลแกลบ	0.01393	104.167	0.9961
B + ซีเมนต์	0.07992	243.902	0.9997	B + ซีเมนต์	0.01658	178.571	0.09945

จากตารางที่ 3 ค่าปริมาณการดูดซับโลหะหนักสูงสุด (β) พบว่า ดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์และวัสดุพอซโซลาน 6 ชนิด สามารถดูดซับได้ดีทั้งสารละลายทองแดงและสังกะสี ซึ่งค่าปริมาณการดูดซับอยู่ในช่วง 97.1-243.9 และ 104.2-178.6 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากค่า β แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการดูดซับสารละลายทองแดงและสังกะสีด้วยดินเหนียวเบนโทไนท์ คือ 117.647 และ 121.951 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 243.902 และ 178.571 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับดินเหนียวเบนโทไนท์และดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับวัสดุพอซโซลาน 6 ชนิด เนื่องจากซีเมนต์มี SiO_2 และ CaO เป็นธาตุองค์ประกอบหลัก เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) จะทำให้เกิด OH^- ซึ่งเป็นประจุลบ จึงทำให้สามารถดึงดูดโลหะหนักที่มีประจุเป็นบวกได้ดี เมื่อผสมซีเมนต์เข้าไปจึงทำให้ดูดซับสารละลายโลหะหนักได้สูงมาก ซึ่งนำดินเหนียวเบนโทไนท์มาเปรียบเทียบกับดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์ อัตราส่วน 90:10 โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์มีความสามารถในการดูดซับสารละลายทองแดงและสังกะสีได้สูงกว่าดินเหนียวเบนโทไนท์ถึง 2.07 และ 1.47 เท่า ตามลำดับ ถัดมาเป็นดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับเถ้าลอย, เถ้าหนัก, ตะกรันเหล็กบด, ดินขาวเผา, ซิลิกาฟุ้ง และเถ้าแกลบ ตามลำดับ

5. สรุปผลการทดสอบ

การศึกษาความสามารถในการดูดซับสารละลายทองแดงและสังกะสีด้วยดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์และวัสดุพอซโซลาน 6 ชนิด ที่อัตราส่วน 90:10 โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการทดสอบแบบกะ จากผลการศึกษาสามารถสรุปดังนี้ การทดสอบหาเวลาสมดุลของการดูดซับ พบว่า ความสามารถในการดูดซับสารละลายทองแดงและสังกะสีมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก หลังจากนั้นจะค่อยๆลดลงจนกระทั่งเริ่มคงที่และเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 48 ชั่วโมง และปริมาณในการดูดซับสารละลายโลหะหนักทั้ง 2 ชนิด สามารถเรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ ดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับ ซีเมนต์ > เถ้าลอย > เถ้าหนัก > ตะกรันเหล็กบด > ดินขาวเผา > ซิลิกาฟุ้ง > เถ้าแกลบ ตามลำดับ ที่อัตราส่วน 90:10 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบเห็นได้ว่า เมื่อผสมซีเมนต์จะสามารถดูดซับสารละลายโลหะหนักได้ในปริมาณที่สูงกว่าผสมกับวัสดุอื่นมาก เนื่องจากซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออนที่เป็นประจุลบจึงทำให้สามารถดูดซับสารละลายโลหะหนักที่เป็นประจุบวกได้ดี และสามารถวิเคราะห์การดูดซับโดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับ ซึ่งจะเห็นว่า ผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และปริมาณสูงสุดของสารละลายโลหะที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุที่ใช้ดูดซับ (β) ของสารละลายทองแดงและสังกะสีจากมากไปน้อย คือ ดินเหนียวเบนโทไนท์ผสมกับ 1) ซีเมนต์, 2) เถ้าลอย, 3) เถ้าหนัก, 4) ตะกรันเหล็กบด, 5) ดินขาวเผา, 6) ซิลิกาฟุ้ง และ 7) เถ้าแกลบ ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการดูดซับสารละลายโลหะหนักทั้ง 2 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งดินเหนียวเบนโทไนท์ที่ผสมกับวัสดุพอซโซลาน 6 ชนิด สามารถดูดซับสารละลายโลหะหนักได้ดีแต่ไม่ได้ดีกว่าดินเหนียวเบนโทไนท์อย่างเห็นได้ชัด และจากผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุสำหรับการสร้างชั้นกันซึม, ผนังของหลุมฝังกลบและบ่อน้ำบาด ที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งวัสดุเหล่านี้สามารถหาได้ง่ายโดยทั่วไป

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่อนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์ต่างๆ และ รศ.ดร.พงศกร พรหมรัตน์ศิลป์ ที่ได้ให้ข้อมูลและคำแนะนำในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2559. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2559.
- [2] Kham, M.R., Hegde, R.A. and Shabiimam, M.A. Adsorption of Lead by Bentonite Clay. *International Journal of Scientific Research and Management*, 2017, 5(7), 5800-5804.
- [3] Jiang, M. et al. Adsorption of Pb(II), Cd(II), Ni(II) and Cu(II) onto natural kaolinite clay. *Desalination*, 2010, (252), 33-39.
- [4] Sangiunsak, N. Adsorption Behavior of Heavy Metals on Various Soils. *Polish Journal Environmental Studies*, 2014, 23(3), 853-865.
- [5] ธนิต เถลิมนานนท์. หนังสือธรณีเทคนิคของของเสีย. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2550.
- [6] อานันต์ จันทะดวง. อิทธิพลของวัสดุปอชโซลานที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักบนดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2560.
- [7] Uddin, M.K. A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade. *Chemical Engineering Journal*, 2017, (308), 438-462.
- [8] ณัฐนันท์ ไตจิว. อิทธิพลของวัสดุทางเลือกต่อการดูดซับสารละลายโลหะหนักปนเปื้อนในดินลมหอบที่พบในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2559.
- [9] เลิศ เกิดชัยภูมิ. อิทธิพลของปริมาณดินเหนียวต่อการดูดซับโลหะหนัก. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 2554, 22(2), 1-7.
- [10] เลิศ เกิดชัยภูมิ และพงศกร พรรณรัตน์ศิลป์. การศึกษาความสามารถการดูดซับโลหะหนักโดยดินมูกอาหารในห้องปฏิบัติการ. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 2555, 23 (2), 21-27.

