



พฤติกรรมการดูดซับและการชะล้างโลหะหนักของดินเหนียวเบนโทไนท์ที่ผสมกับซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน
จากการทดสอบแบบต่อเนื่อง

BEHAVIOR OF ADSORPTION AND DESORPTION OF HEAVY METALS ON BENTONITE CLAY
MIXED WITH CEMENT AND POZZOLANIC MATERIALS BY COLUMN LEACHING TEST

พิทยา สติมัน^{1*}, พงศกร พรณรัตน์ศิลป์², ศิริรัตน์ พัฒนไพโรจน์³, ธนาอด คงสมบูรณ์⁴

¹นักศึกษา, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

³อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

⁴ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

*Corresponding author: pittaya_satiman@kkumail.com

บทคัดย่อ

ทุกปีมีการปล่อยน้ำเสียจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมจำนวนมากลงสู่แม่น้ำ โดยไม่มีการบำบัด น้ำเสียเหล่านี้มักปนเปื้อนไปด้วยโลหะหนักในปริมาณที่สูง การดูดซับเป็นหนึ่งในวิธีการกำจัดโลหะหนักที่ประหยัดและมีความสะดวกในการดำเนินงาน ดินเหนียวเป็นดินที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงและราคาไม่แพง ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ดินเหนียวเบนโทไนท์ที่ผสมกับวัสดุผสมเพิ่ม 7 ชนิดประกอบด้วย 1) ซีเมนต์ 2) เถ้าลอย 3) เถ้าหนัก 4) ซิลิกาฟูม 5) ดินขาวเผา 6) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด และ 7) เถ้าแกลบ มาทำการศึกษาการดูดซับของนิกเกิลและสังกะสี ด้วยการทดสอบแบบต่อเนื่อง เป็นการทดสอบการดูดซับโลหะหนักโดยการจำลองสถานะจริงของกระบวนการดูดซับในชั้นดิน การทดลองแบ่งเป็น 3 วัฏจักร วัฏจักรแรกเป็นการปล่อยสารละลายโลหะหนักผ่านแบบจำลองตัวอย่าง แล้วปล่อยน้ำกลั่นไปยังแบบจำลองด้วยอัตราการไหลอย่างต่อเนื่องใน วัฏจักรที่สอง สองชั้นตอนนี้สามารถจำลองสภาพจริงของการปล่อยนิกเกิลและสังกะสีในน้ำเสียลงสู่ดินและถูกชะล้างด้วยฝน ในวัฏจักรที่สามทำการปล่อยสารละลายโลหะหนักผ่านแบบจำลองตัวอย่างอีกครั้งเพื่อจำลองการดูดซับหลังจากการชะล้าง พฤติกรรมการดูดซับในการศึกษานี้สามารถแสดงให้เห็นในเส้นโค้งเบรคทูธ (Breakthrough Curves) ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ทดสอบ (t) และอัตราส่วนของความเข้มข้นสุดท้ายต่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (C/C_0) ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับในแต่ละวัฏจักรได้ และสามารถคำนวณค่าแฟกเตอร์การหน่วง (R) และสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) จากการศึกษาพบว่าเบนโทไนท์ผสมวัสดุผสมเพิ่มมีความสามารถในการดูดซับสังกะสีได้ดีกว่านิกเกิล เบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลและสังกะสีสูงสุดตามด้วยเถ้าลอย, เถ้าหนัก, ซิลิกาฟูม, เตาถลุงเหล็กบด, ดินขาวเผา, เถ้าแกลบ ตามลำดับ โดยที่เบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์มีค่าแฟกเตอร์การหน่วงมากกว่าเบนโทไนท์ 1.44 เท่า และสัมประสิทธิ์การแพร่น้อยกว่า 4 เท่า ส่วนวัสดุอื่นๆเมื่อผสมกับเบนโทไนท์จะ

Pittaya Satiman^{1*}, Pongsakorn Punrattanasin², Sirorat Pattanapairoj³, Thanadol Kongsomboon⁴

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

²Associate Professor, Department of Civil Engineering, 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

ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงและกระบวนการชะล้างสามารถเกิดขึ้นได้ในวัฏจักรที่ 2 เพียงเล็กน้อยเท่านั้น
คำสำคัญ: เบนโทไนท์, การดูดซับโลหะหนัก, การทดสอบแบบต่อเนื่อง, วัสดุพอซโซลาน, กราฟเบรคทรู

ABSTRACT

The rapid growth of industries has led to the increasing of environmental problem. Every year, large amount of wastewater has been discharged into rivers without treatment. The wastewater is often contaminated with high amounts of heavy metals. Adsorption is one of the methods for heavy metal removal. Clay have been widely used as the adsorbent for wastewater treatment. This research focuses on the adsorption of zinc and nickel on bentonite clay when mixing with various Cement and Pozzolanic materials by column leaching test. The Pozzolanic materials in this study were 1) fly ash, 2) bottom ash, 3) silica fume, 4) blast furnace slag, 5) metakaolin, and 6) rice husk ash. The column leaching test was divided into 3 cycles. The heavy metals solution were released in the first cycle to the example model with continuous flow to simulate the actual condition of wastewater discharging into the soil. Distilled water was released in the second cycle with continuous flow to simulate the desorption process by rain. The last cycle was then carried out to verify the adsorption capability after the desorption process. The adsorption behavior in this study can be illustrated in breakthrough curves. The breakthrough curves present a relationship between the rates of absorption versus service time. The retardation factor (R) and Diffusion coefficient (D) can be calculated from breakthrough curves. In this study, bentonite mixed with cement showed the highest adsorption performance for both zinc and nickel. Bentonite mixed with cement had more retardation factor than bentonite to 1.41 times, and had less diffusion coefficient than bentonite to 4 times. The adsorption of bentonite decreased when bentonite was mixed with Pozzolanic materials. The efficiency of pozzolanic materials can be ranked as follows: cement > fly ash > bottom ash > blast furnace slag > metakaolin > silica fume > rice husk ash. Comparing the results, it was shown that zinc was adsorbed by bentonite mixed Cement and Pozzolanic materials better than nickel. The desorption process in second cycle could not fully remove the heavy metals ions from the surface of the adsorption.

KEYWORDS: Bentonite clay, Adsorption, Column leaching test, Pozzolanic materials, Breakthrough curve

1. บทนำ

ในปัจจุบันการขยายตัวด้านอุตสาหกรรมทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของโรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมเช่น ผุ่นควันและน้ำเสีย ซึ่งในน้ำเสียเหล่านี้มีโลหะหนักที่เป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม เมื่อถูกปล่อยออกสู่ธรรมชาติจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ทำให้ต้องมีการบำบัดที่เสียก่อน มีหลายวิธีในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย เช่น เคมีออกซิเดชัน การแยกเมมเบรน การแข็งตัว การกรอง และการดูดซับ ที่ผ่านมามีงานวิจัยหลายอย่างเพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโลหะหนักโดยใช้ดินเป็นตัวดูดซับ[1,2] และได้มีการศึกษาการเพิ่มความสามารถในการดูดซับโดยการผสมดินกับวัสดุพอซโซลาน[3,4] ซึ่งทำให้ทราบว่าดินเหนียวมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักสูง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ดินเหนียวเบนโทไนท์ ซึ่งเป็นดินเหนียวที่มีแรมอนต์มอร์ริลโลไนต์สูง มีขนาดเม็ดดินที่เล็ก มีค่าการบวมตัวที่สูงและมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก มาใช้ในการทดสอบ [5] ที่ผ่านมามีงานวิจัยเกี่ยวกับดินในการศึกษาการดูดซับโดยใช้ดินถูกเลือกให้เป็นตัวดูดซับของการทดสอบการดูดซับแบบกะและแบบต่อเนื่อง [6] จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับของเบนโทไนท์ซึ่ง

จัดเป็นดินเหนียวชนิดหนึ่งด้วยวิธีการทดสอบแบบกะ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเบนโทไนท์มีความสามารถสูงในการดูดซับโลหะหนัก วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่เหลือจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม ซึ่งหาได้ง่าย ราคาถูก และมีความสามารถในการช่วยดูดซับ[3,4] ประกอบด้วย 1) เถ้าลอย 2) เถ้าหนัก 3) ซิลิกาฟูม 4) ดินขาวเผา 5) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด และ 6) เถ้าแกลบ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการการผสมซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานลงในเบนโทไนท์เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ และทำการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแบบต่อเนื่อง (Column test) เพื่อทำความเข้าใจรายละเอียดเกี่ยวกับการดูดซับและการชะล้าง[7,8,9] การทดสอบแบบต่อเนื่องเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพที่สุดและสามารถจำลองตัวอย่างให้ใกล้เคียงกับสภาวะจริงได้ดีกว่าการทดสอบการดูดซับแบบกะ (Batch test) การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับของดินเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานชนิดต่าง ๆ โดยการทดสอบแบบต่อเนื่องในแบบจำลองขนาดเล็ก

2. วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

2.1 ตัวดูดซับ

ในการศึกษาตัวดูดซับที่ใช้คือดินเหนียวเบนโทไนท์ ซึ่งเป็นเบนโทไนท์ในประเทศไทยเป็นดินเหนียวที่มีความเหนียวสูง (CH) มีค่าการบวมตัวสูง และมีขนาดเม็ดดินละเอียด เมื่อจำแนกดินเหนียวเบนโทไนท์ตามระบบ Unified Soil Classification (USCS) ซึ่งผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ร้อยละ 100 และผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ร้อยละ 90 มีขีดจำกัดเหลวร้อยละ 570 และดัชนีพลาสติก ร้อยละ 469.45 วัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ผสมกับเบนโทไนท์ประกอบด้วย 1) ซีเมนต์ (CE) 2) เถ้าลอย (FA) 3) เถ้าหนัก (BA), 4) ซิลิกาฟูม (SF), 5) ดินขาวเผา (MK), 6) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด (BFS) และ 7) เถ้าแกลบ (RHA) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของเบนโทไนท์ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเบนโทไนท์และวัสดุปอซโซลานด้วยเครื่อง X-ray fluorescence (XRF) ดังสรุปไว้ในตารางที่ 1 เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุแต่ละชนิดมีธาตุองค์ประกอบที่แตกต่างกัน โดยที่เบนโทไนท์มีออกไซด์ต่างๆสูงมาก ซีเมนต์และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมี CaO สูง และซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เป็นประจุลบ จึงสามารถดูดซับประจุบวกของโลหะหนักได้[9,10] เถ้าลอยและเถ้าหนักมี SiO_2 และ Al_2O_3 สูง เนื่องจากเบนโทไนท์มีสมบัติการซึมผ่านที่ต่ำมาก การทดสอบนี้จึงใช้อัตราส่วนผสมเบนโทไนท์กับซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดในอัตราส่วน 7:3 จะได้ตัวอย่างทั้งหมด 7 ชนิด คือ B+CE, B+FA, B+BA, B+SF, B+MK, B+BFS และ B+RHA

2.2 สารละลายโลหะหนักที่ใช้ในการศึกษา

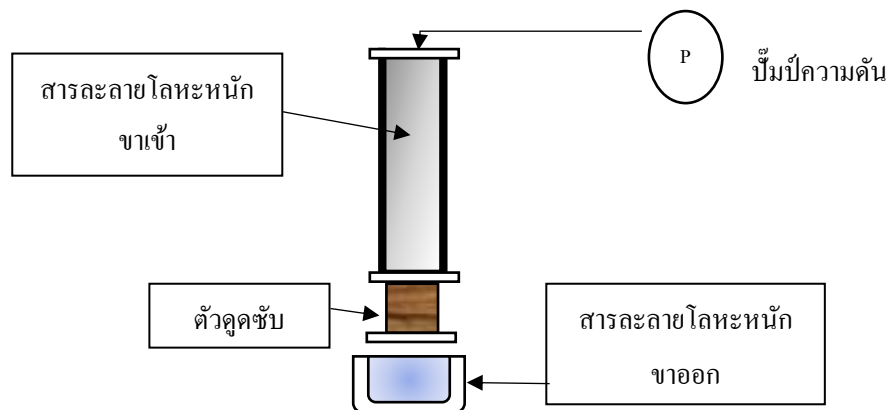
โลหะหนักที่เลือกใช้เป็นตัวดูดซับในงานวิจัยนี้คือนิกเกิล (Ni) และสังกะสี (Zn) ในรูปแบบสารละลาย ซึ่งเป็นโลหะหนักที่พบมากในกระบวนการทางอุตสาหกรรม และดินเหนียวสามารถดูดซับโลหะหนักเหล่านี้ได้ดี จากการทดลองทำให้ทราบว่าเบนโทไนท์ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่สูงมากสามารถดูดซับโลหะหนักได้ทั้งหมดจนจบช่วงการทดสอบ ทำให้ไม่สามารถนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟได้ จึงได้เลือกใช้ความเข้มข้นของนิกเกิลและสังกะสีที่ใช้ในการทดสอบคือ 10,000 มล.ก/ล. ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สูงกว่าในงานวิจัยอื่นๆก่อนหน้านี้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเบนโทไนท์และวัสดุพอซโซลาน

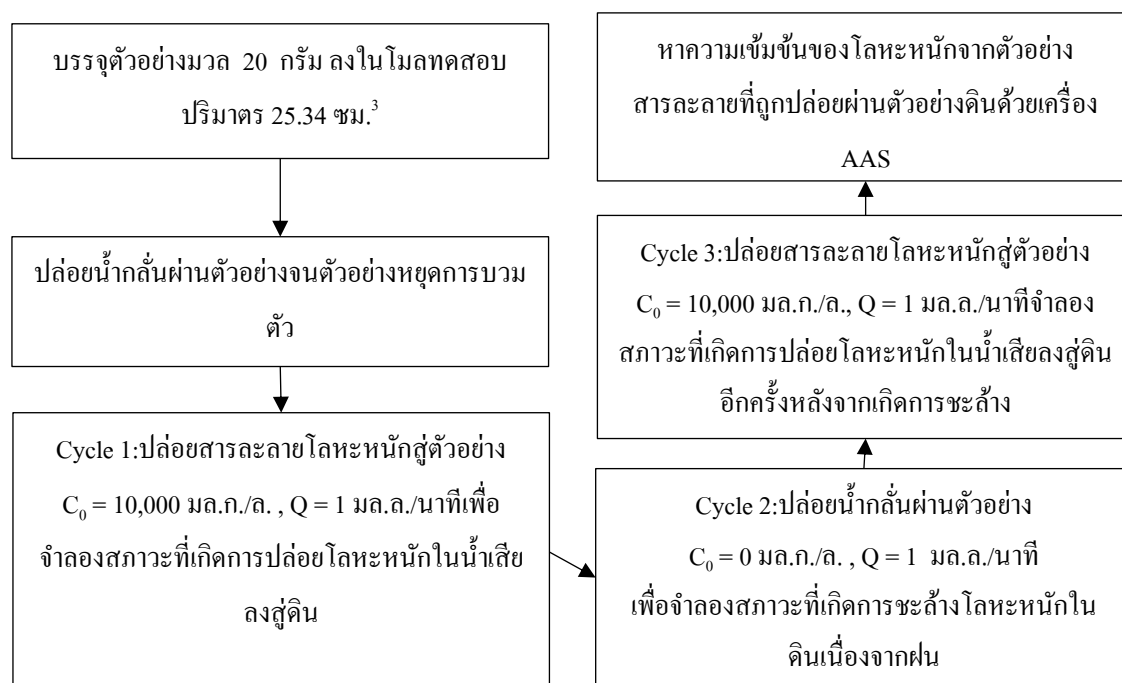
ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)						
	เบนโทไนท์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอยและเถ้าหนัก	ตะกรันเตาถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟูม	เถ้าแกลบบด	ดินขาวเผา
SiO ₂	56.8	20	48	37	92	90	55
Al ₂ O ₃	15.1	5	26	11	0.7	0.5	40
Fe ₂ O ₃	9.8	3	10	0.3	1.2	2	0.5
CaO	2.8	60	5	40	0.5	0.5	-
MgO	4.6	1.1	2	7	0.2	0.2	-
SO ₃	-	2.4	0.7	0.3	-	1.5	-
ออกไซด์อื่นๆ	-	1.5	1.3	2.3	2.6	-	-

3. วิธีการทดสอบ

การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับมี 2 แบบคือแบบกะ (Batch test) และแบบต่อเนื่อง (Column test) โดยการทดสอบแบบต่อเนื่องเป็นทดสอบโดยใช้ดินปริมาณมากทำการจำลองสภาวะจริงของการดูดซับโลหะหนักในดินซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการดูดซับโลหะหนักได้มากกว่าการทดสอบแบบกะ ที่เป็นการทดสอบโดยใช้ดินปริมาณเล็กน้อย ทำการทดสอบหลายตัวอย่างทำให้ทราบผลการทดสอบที่แม่นยำแต่ไม่ทราบพฤติกรรมของการดูดซับในสภาวะจริง แบบต่อเนื่องเป็นการจำลองการดูดซับโลหะหนักของชั้นดิน โดยการใช้แบบจำลองการดูดซับดังแสดงในรูปที่ 1 แบบจำลองมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.54 ซม. สูง 5 ซม. บรรจุตัวดูดซับที่มีมวล 20 กรัม การทดสอบประกอบด้วยกระบวนการที่แตกต่างกัน 3 แต่ละช่วงใช้เวลาช่วงละ 1,000 นาที เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการดูดซับทุก 100 นาที ตลอดการทดสอบ วัฏจักรที่ 1 (ช่วงเวลา 100-1,000 นาที) ประกอบด้วยการปล่อยสารละลายโลหะหนักผ่านแบบจำลองตัวอย่าง วัฏจักรที่ 2 (ช่วงเวลา 1,100-2,000 นาที) ปล่อยน้ำกลั่น ไปยังแบบจำลองด้วยอัตราการไหลต่อเนื่อง สองขั้นตอนนี้สามารถจำลองสภาพจริงของการปล่อยนิกเกิลในน้ำเสียลงในดินและล้างมันด้วยฝน วัตถุประสงค์หลักของวัฏจักรที่ 2 คือเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการชะล้างโลหะหนัก จากนั้นทำการทดสอบวัฏจักรที่ 3 (ช่วงเวลา 2,100-3,000 นาที) เป็นการปล่อยสารละลายโลหะหนักผ่านแบบจำลองอีกครั้งเพื่อตรวจสอบความสามารถในการดูดซับหลังจากกระบวนการชะล้าง ขั้นตอนการดูดซับแบบต่อเนื่องอธิบายไว้ในรูปที่ 2 อัตราการไหลของสารละลายในการทดสอบคือ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้ปริมาณดินในการควบคุมความดันและอัตราการไหลให้คงที่ นำสารละลายที่ถูกดูดซับแล้วในแต่ละเวลาที่เก็บตัวอย่างวัดค่าความเข้มข้นของโลหะหนักโดยการเจือจางด้วยกรดไนตริก (HNO₃) 1% วัดความเข้มข้นของสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ทำให้ทราบสามารถระบุความเข้มข้นสุดท้าย (C_p) ได้



รูปที่ 1 ภาพวาดของการทดสอบแบบต่อเนื่อง

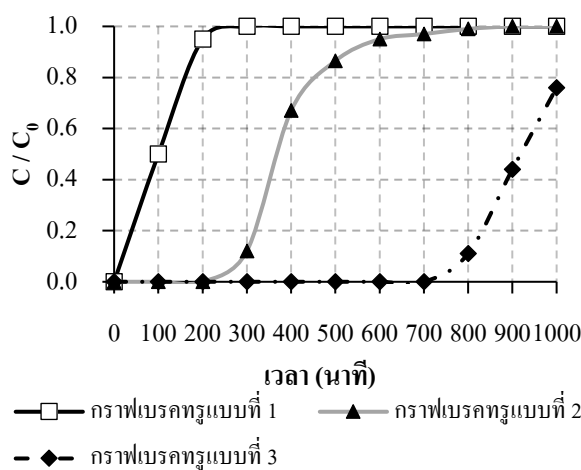


รูปที่ 2 ขั้นตอนการทดสอบการดูดซับแบบต่อเนื่อง

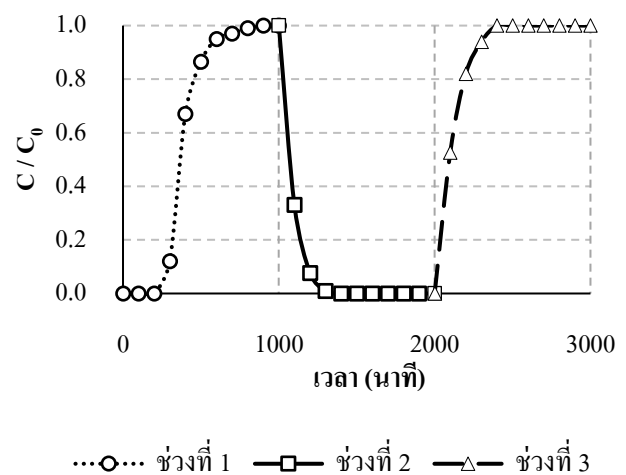
4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กราฟเบรคทรู (Breakthrough Curve) แสดงโดยการพล็อตระหว่างเวลาที่ทดสอบ (t) และอัตราส่วนของ ความเข้มข้นสุดท้ายต่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (C/C_0) โดยค่า C คือค่าความเข้มข้นของสารละลายหลังจากถูกดูดซับแล้ว เมื่อจุดที่ $C/C_0 = 0\%$ แสดงถึงการที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับโลหะหนักไว้ได้ทั้งหมด จุดเบรคทรู (Breakthrough Point) คือจุดที่จุดที่ $C/C_0 = 5\%$ หลังจากนั้นกราฟจะมีแนวโน้มความชันเพิ่มขึ้น แสดงถึงวัฏจักรที่ความสามารถในการดูดซับเริ่มหมดไป จุดอิ่มตัว ($C/C_0 = 100\%$) คือการที่ตัวดูดซับหมดของประสิทธิภาพการดูดซับ สารละลายที่ผ่านตัวอย่างจะมีโลหะหนักเท่ากับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ดังตัวอย่างกราฟเบรคทรูในรูปที่ 3 กราฟเบรคทรูแบบที่ 1, 2, 3 แสดงถึงความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกัน โดยกราฟแบบที่ 1 เข้าสู่จุด

เบรคทรูอย่างรวดเร็วแล้วหลังจากนั้น จึงเข้าสู่จุดอิ่มตัว กราฟแบบที่ 2 แสดงถึงการมีความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากสามารถดูดซับโลหะหนักได้เต็มที่ ($C/C_0 = 0$) เป็นเวลา 200 นาที หลังจากกราฟผ่านจุดเบรคทรู ความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้น แสดงถึงการที่ความสามารถในการดูดซับลดลง และค่อยๆ อิ่มตัวในเวลาต่อมา กราฟแบบที่ 3 แสดงถึงการมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงมาก เนื่องจากสามารถดูดซับโลหะหนักได้เต็มที่ ($C/C_0 = 0$) เป็นเวลา 700 นาที และไม่เข้าสู่จุดอิ่มตัวในช่วงเวลาทดสอบ ตามลำดับ รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างกราฟเบรคทรูในวัฏจักรที่ 1, 3 และแสดงกราฟการชะล้างในวัฏจักรที่ 2 โดยที่ในช่วงนี้เป็นการใช้น้ำกลั่นปล่อยผ่านตัวอย่างดินที่ดูดซับโลหะหนักไว้แล้ว การที่น้ำกลั่นขาออกมีค่า C/C_0 มากกว่า 0 แสดงว่ามีโลหะหนักถูกชะล้างออกกับน้ำด้วย และในวัฏจักรที่ 3 กราฟจะแสดงถึงการดูดซับหลังจากที่ผ่านวัฏจักรที่ 2 ไปแล้ว หากจุดแรกของวัฏจักรที่ 3 มีค่าลดลงจากจุดสุดท้ายของวัฏจักรที่ 1 แสดงว่าหลังจากการชะล้าง เกิดพื้นที่ว่างในการดูดซับขึ้น ทำให้สามารถดูดซับโลหะหนักได้อีกแล้วจึงเข้าสู่จุดอิ่มตัว



รูปที่ 3 ตัวอย่างกราฟเบรคทรูในลักษณะต่างๆ



รูปที่ 4 ตัวอย่างกราฟเบรคทรูของการดูดซับทั้ง 3 ช่วง

ค่าแฟกเตอร์การหน่วง (R) เป็นค่าที่บอกถึงการดูดซับผิวของประจุบวกในสารละลาย มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารละลายในดิน สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) บอกถึงความเร็วในการเคลื่อนที่ของสารละลายที่เกิดจากกระบวนการแพร่ ซึ่งแปรผกผันกับความชันของกราฟเบรคทรู โดยที่ในกรณีไม่มีการแพร่ ($D = 0$) กราฟเบรคทรูจะอยู่ในแนวตั้ง และเมื่อเริ่มมีการแพร่ในกระบวนการเคลื่อนที่ ($D > 0$) ความชันของกราฟจะลดลงเรื่อยๆ ตามค่า D ที่เพิ่มขึ้น[11] การหาค่า R, D สามารถหาได้จากการใช้สมการ

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left[\frac{1-T_r}{2\sqrt{\frac{T_r}{P_L}}} \right] + \exp(P_L) \operatorname{erfc} \left[\frac{1+T_r}{2\sqrt{\frac{T_r}{P_L}}} \right] \right\} \quad (1)$$

$$T_r = \frac{v_s t}{RL} \quad (2)$$

$$P_L = \frac{v_s L}{D} \quad (3)$$

$$PVE = \frac{v_s t}{L} \quad (4)$$

โดยที่ v_s คือความเร็วในการไหลซึม, PVE คือปริมาตรของการไหลของน้ำในดินเทียบกับปริมาตรของช่องว่างในดิน, T_r คือแฟกเตอร์ของเวลา, P_L คือพิกัดแนวนอน, L คือความสูงของแบบจำลอง, A คือพื้นที่หน้าตัดแบบจำลอง ใช้วิธีลองผิดลองถูกโดยการเปลี่ยนค่า R , D ไปเรื่อยๆ จนกว่ากราฟเบรคทรูที่ได้จากสมการที่ 1 จะใกล้เคียงกับกราฟเบรคทรูที่ได้จากการทดสอบ[10] ค่าแฟกเตอร์การหน่วง (R) ในเบื้องต้นเพื่อนำไปแทนในสมการที่ 1 สามารถหาได้โดยใช้สมการของ Shackelford (1994) ซึ่งก็คือพื้นที่เหนือกราฟเบรคทรู ดังนี้

$$R = \int_0^\infty (1 - \frac{C}{C_0}) d(PVE) \quad (5)$$

5. ผลการศึกษา

จากผลการศึกษาเมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟเบรคทรูจะแสดงให้เห็นถึง S-Curves ($t - C / C_0$) ซึ่งแสดงถึงกระบวนการดูดซับทั้งสามช่วงของสังกะสีและนิกเกิลบนเบนโทไนท์ (B) เมื่อผสมกับซีเมนต์ (CE), แก้วลอย (FA), แก้วหนัก (BA), ซิลิกาฟูม (SF), ดินขาวเผา (MK), ตะกรันเตาหลอมเหล็กบด (BFS) และเถ้าแกลบ (RHA) โดยผลการศึกษาจะแบ่งผลการศึกษาการดูดซับสังกะสีและผลการศึกษาการดูดซับนิกเกิล

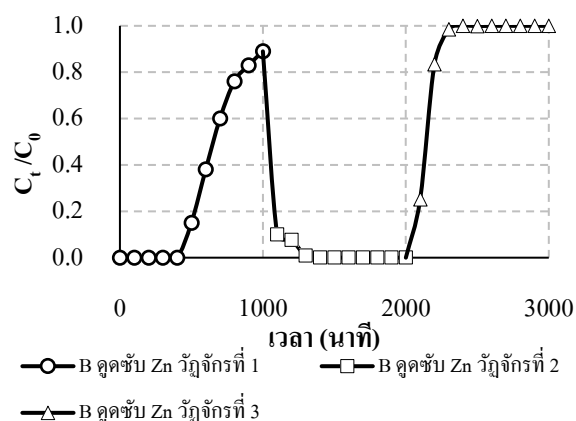
5.1 ผลการศึกษาการดูดซับสังกะสี

จากผลการทดสอบกราฟเบรคทรูของการดูดซับสังกะสี (Zn) ของเบนโทไนท์(B), เบนโทไนท์ผสมแก้วลอย (B+FA) ,เบนโทไนท์ผสมแก้วหนัก (B+BA), เบนโทไนท์ผสมซิลิกาฟูม (B+SF), เบนโทไนท์ผสมดินขาวเผา (B+MK) , เบนโทไนท์ผสมตะกรันเตาหลอมเหล็กบด (B+BFS), เบนโทไนท์ผสมเถ้าแกลบ (B+RHA) และเบนโทไนท์ผสมซีเมนต์ (B+CE) แสดงในรูปที่ 5-12 พบว่าการดูดซับโลหะหนักได้ทั้งหมด ($C / C_0 = 0\%$) เกิดขึ้นในวัฏจักรที่ 1 ในกรณีของ ซีเมนต์, แก้วลอยและ เบนโทไนท์เท่านั้น ส่วนแก้วหนัก, ซิลิกาฟูม, ตะกรันเตาหลอมเหล็กบดและดินขาวเผา กราฟได้เข้าสู่จุดเบรคทรูทันทีหลังจากเริ่มการทดสอบ จากนั้นความชันของกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่จุดอิ่มตัวภายในวัฏจักรที่ 1 ยกเว้นกรณีของซีเมนต์วัฏจักรที่ 1 มีค่า $C / C_0 = 0$ เป็นเวลา 700 นาที หลังจากนั้นจึงเริ่มเข้าสู่จุดเบรคทรูและไม่เข้าถึงจุดอิ่มตัว แสดงถึงการมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูง ต่อมาในวัฏจักรที่ 2 น้ำกลั่นที่ปล่อยผ่านตัวอย่างดินมีความเข้มข้นของโลหะหนัก (C / C_0) มากกว่า 0 ทำให้ทราบว่าโลหะหนักเจือปนมากับน้ำกลั่นที่ถูกปล่อยผ่านตัวอย่างที่ดูดซับโลหะหนักไว้ แสดงถึงการชะล้างที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ ผลการทดสอบในวัฏจักรที่ 3 มีแนวโน้มเช่นเดียวกับวัฏจักรที่ 1 กราฟของวัฏจักรที่ 3 มีค่า C / C_0 ที่จุดแรกลดลงมาจากจุดสุดท้ายของวัฏจักรที่ 1 เล็กน้อยในกรณีของซิลิกาฟูม, ตะกรันเตาหลอมเหล็กบดและดินขาวเผา และลดลงมากในกรณีของ แก้วลอย, แก้วหนัก, เถ้าแกลบ จากนั้นกราฟได้เข้าสู่จุดอิ่มตัวอีกครั้ง แสดงถึงกรณีที่เกิดการชะล้างโลหะหนักเนื่องจากน้ำ และเนื่องเกิดการชะล้างโลหะหนักออกจากตัวอย่างดิน ทำให้โลหะหนักที่ถูกดูดซับในตัวอย่างดินลดลง จากนั้นกราฟเข้าสู่จุดอิ่มตัวอีกครั้งหลังจากเริ่มวัฏจักรที่ 3 ยกเว้นในกรณีของ CE มีการดูดซับต่อจากวัฏจักรที่ 1 และเข้าถึงจุดอิ่มตัวในที่สุด และจากผลการศึกษาสามารถนำไปหาค่า R , D ได้ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยจะเห็นได้ว่าซีเมนต์มีค่าแฟกเตอร์การหน่วง (R) ที่สูง แสดงถึงการมีความสามารถในการดูดซับสูง ซึ่งส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่

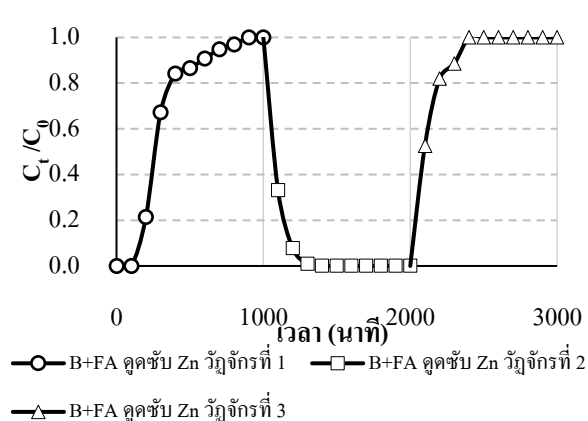
(D) ค่า สามารถดูดซับโลหะหนักได้นาน เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ตัวแปรจากค่า R และ D จะได้ว่า ซีเมนต์ > ถ่านลอย > ถ่านหัก > ซิลิกาฟูม > ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด > ดินขาวเผา > ถ่านแกลบ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวเบนโทไนท์จะเห็นได้ว่าเมื่อผสมกับซีเมนต์จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้ แต่วัสดุปอซโซลานอื่นๆจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง

ตารางที่ 2 ค่า R, D จากการทดสอบการดูดซับสังกะสี

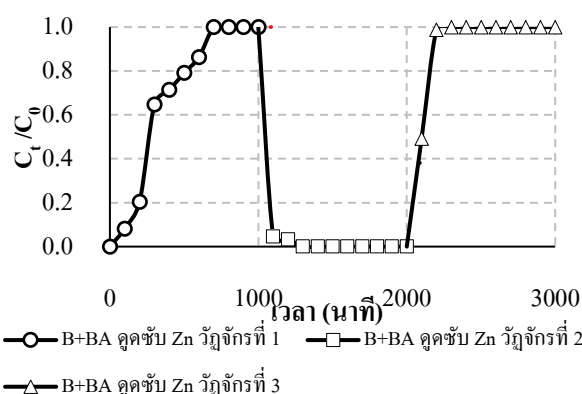
	B	B+CE	B+FA	B+BA	B+BFS	B+MK	B+SF	B+RHA
ค่าแฟกเตอร์การหน่วง, R	9.61	13.53	4.68	4.69	2.98	4.23	4.11	3.15
เปรียบเทียบกับเบนโทไนท์	-	1.41 เท่า	0.49 เท่า	0.49 เท่า	0.31 เท่า	0.44 เท่า	0.43 เท่า	0.33 เท่า
สัมประสิทธิ์การแพร่, D (ซม. ² /วินาที)	2×10^{-4}	0.5×10^{-4}	7.2×10^{-4}	8.5×10^{-4}	30×10^{-4}	16×10^{-4}	9.3×10^{-4}	35×10^{-4}
เปรียบเทียบกับเบนโทไนท์	-	0.26 เท่า	3.53 เท่า	4.16 เท่า	14.52 เท่า	8.03 เท่า	4.55 เท่า	17.11 เท่า



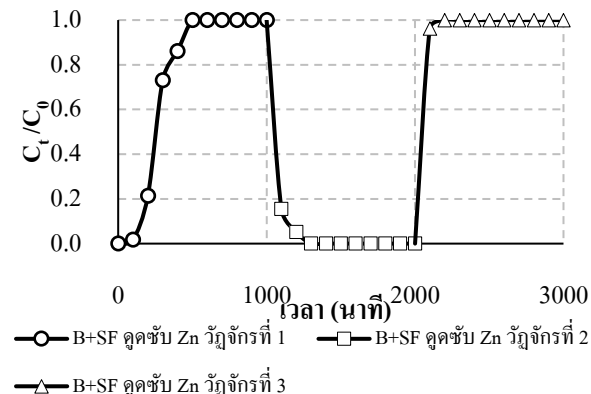
รูปที่ 5 กราฟเบรคทฤษฎีการดูดซับ Zn ของ B



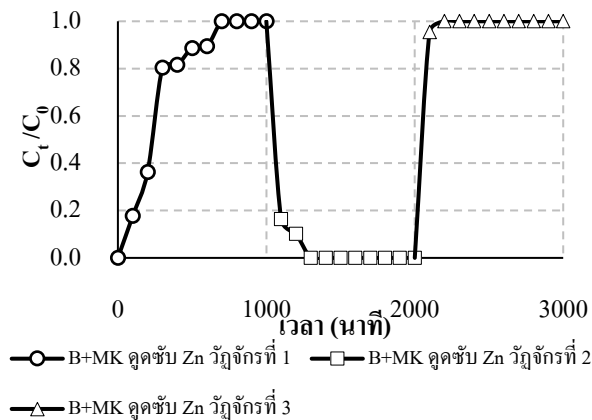
รูปที่ 6 กราฟเบรคทฤษฎีการดูดซับ Zn ของ B+FA



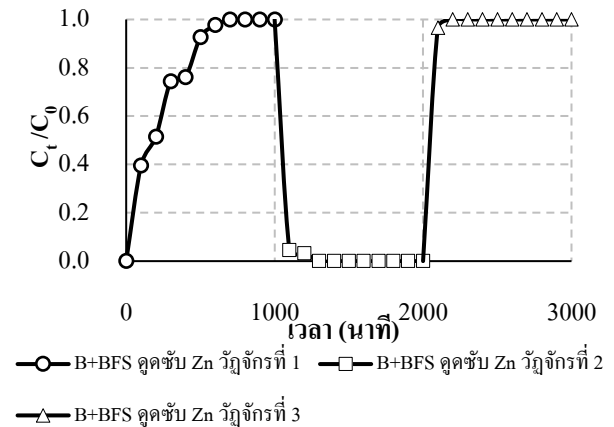
รูปที่ 7 กราฟเบรคทฤษฎีการดูดซับ Zn ของ B+BA



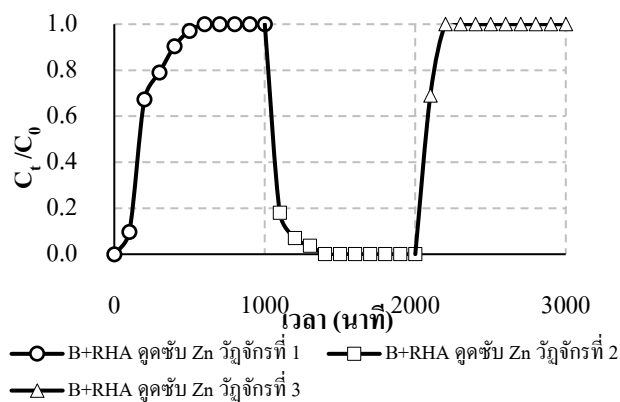
รูปที่ 8 กราฟเบรคทฤษฎีการดูดซับ Zn ของ B+SF



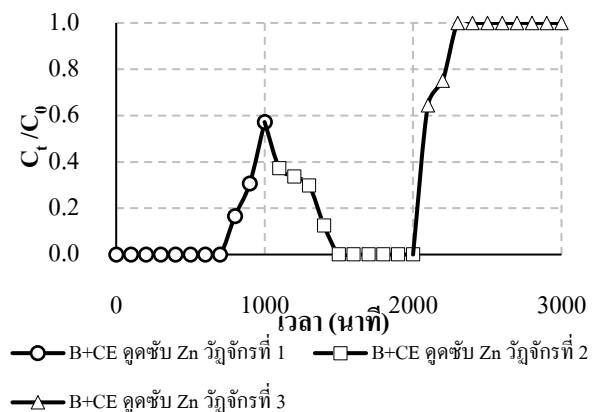
รูปที่ 9 กราฟเบรคทรูการดูดซับ Zn ของ B+MK



รูปที่ 10 กราฟเบรคทรูการดูดซับ Zn ของ B+BFS



รูปที่ 11 กราฟเบรคทรูการดูดซับ Zn ของ B+RHA



รูปที่ 12 กราฟเบรคทรูการดูดซับ Zn ของ B+CE

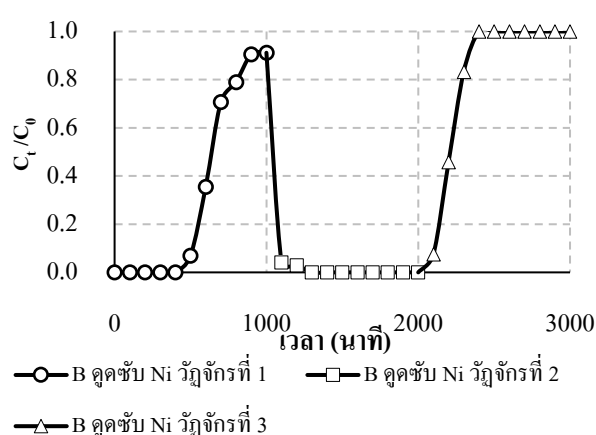
5.2 ผลการศึกษาการดูดซับนิกเกิล

การดูดซับนิกเกิลมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับการดูดซับสังกะสี แสดงในรูปที่ 13-20 จากผลการทดสอบพบว่าเกิดการดูดซับโลหะหนักได้ทั้งหมด ($C/C_0 = 0\%$) เกิดขึ้นในวัฏจักรที่ 1 ในกรณีของ ซีเมนต์และเบนโทไนท์ ส่วนเถ้าลอย, เถ้าหนัก, ซิลิกาฟุ้ง, ตะกรันเตาสูงเหล็กบดและดินขาวเผา กราฟได้เข้าสู่จุด Breakthrough Point ทันทีหลังจากเริ่มการทดสอบ จากนั้นความชันของกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่จุดอิ่มตัวภายในวัฏจักรที่ 1 ยกเว้นกรณีของซีเมนต์วัฏจักรที่ 1 มีค่า $C/C_0 = 0$ เป็นเวลา 700 นาที หลังจากนั้นจึงเริ่มเข้าสู่ Breakthrough Point และ ไม่เข้าสู่จุดอิ่มตัว แสดงถึงการมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูง ต่อมาในวัฏจักรที่ 2 และวัฏจักรที่ 3 มีแนวโน้มเดียวกับการดูดซับสังกะสี มีการชะล้างและการดูดซับอีกครั้งหลังจากการชะล้าง และจากผลการศึกษาสามารถนำไปหาค่า R, D ได้ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยจะเห็นได้ว่าซีเมนต์มีค่าแฟคเตอร์การหน่วง (R) ที่สูง แสดงถึงการมีความสามารถในการดูดซับที่สูง ซึ่งส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ต่ำ สามารถดูดซับโลหะหนักได้นาน เปรียบเทียบ

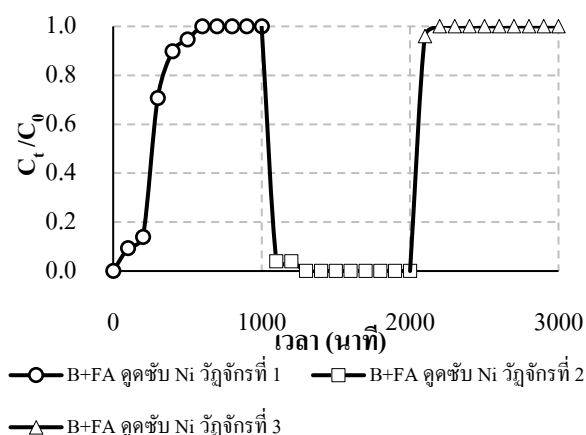
ประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ตัวแปรจากค่า R และ D จะได้ว่า ซีเมนต์ > เถ้าลอย > ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด > ดินขาวเผา > เถ้าหนัก > ซิลิกาฟุ้ง > เถ้าแกลบ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวเบนโทไนท์ในรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่าเมื่อผสมกับซีเมนต์จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้ แต่วัสดุปอซโซลานอื่นๆจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง

ตารางที่ 3 ค่า R, D จากการทดสอบการดูดซับนิกเกิล

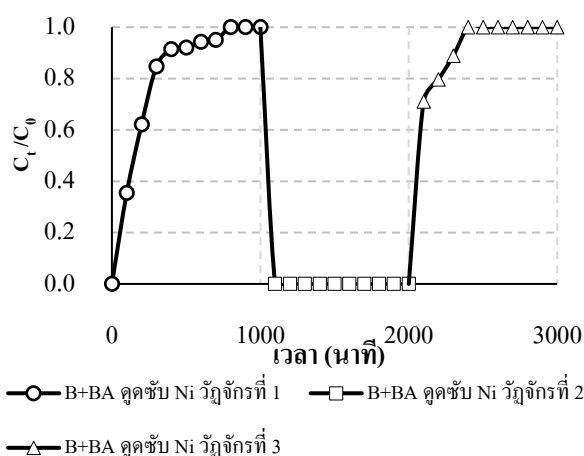
	B	B+CE	B+FA	B+BA	B+BFS	B+MK	B+SF	B+RHA
ค่าแฟกเตอร์การหน่วง, R	9.36	13.48	4.37	3.07	4.93	3.88	2.59	1.73
เปรียบเทียบกับเบนโทไนท์	-	1.44 เท่า	0.47 เท่า	0.33 เท่า	0.53 เท่า	0.41 เท่า	0.28 เท่า	0.18 เท่า
สัมประสิทธิ์การแพร่, D ($\text{cm}^2/\text{วินาที}$)	1.3×10^{-4}	0.6×10^{-4}	2.8×10^{-4}	28×10^{-4}	20×10^{-4}	24×10^{-4}	20×10^{-4}	87×10^{-4}
เปรียบเทียบกับเบนโทไนท์	-	0.50 เท่า	2.17 เท่า	22.01 เท่า	15.75 เท่า	19.20 เท่า	15.99 เท่า	68.29 เท่า



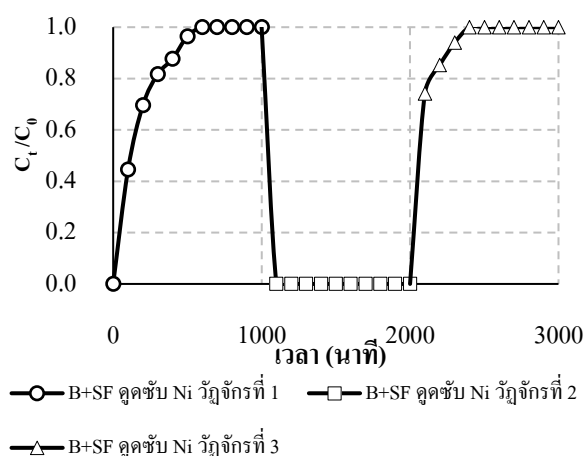
รูปที่ 13 กราฟเบรคทวการดูดซับ Ni ของ B



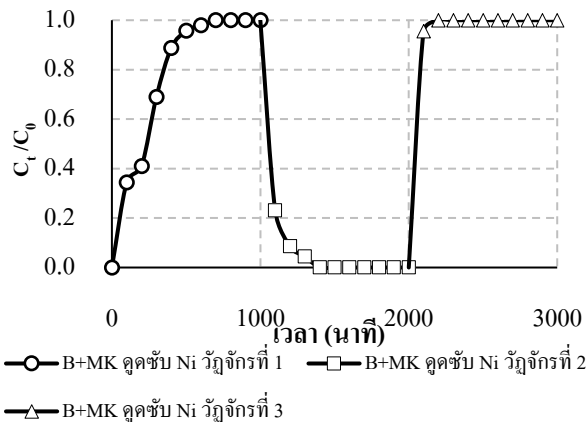
รูปที่ 14 กราฟเบรคทวการดูดซับ Ni ของ B+FA



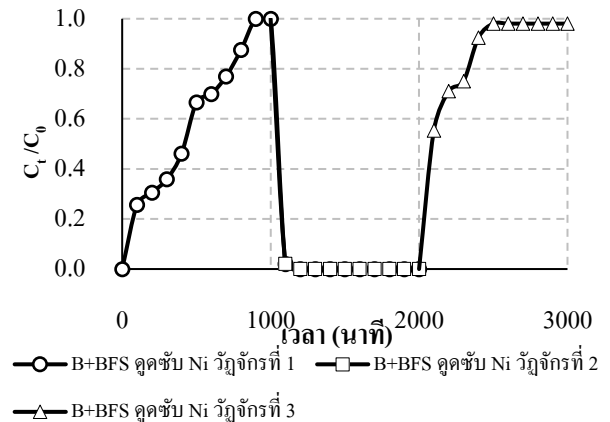
รูปที่ 15 กราฟเบรคทวการดูดซับ Ni ของ B+BA



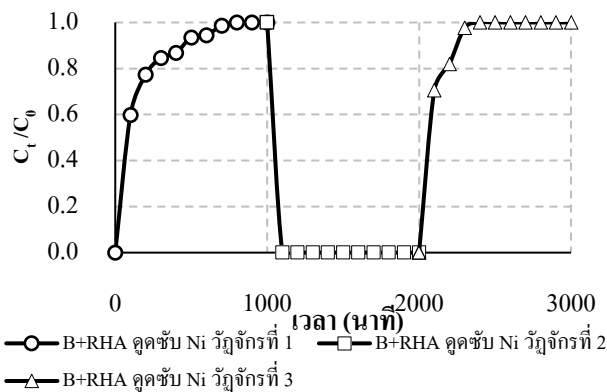
รูปที่ 16 กราฟเบรคทวการดูดซับ Ni ของ B+SF



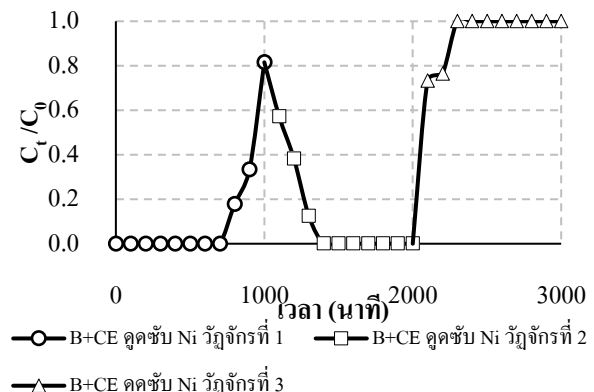
รูปที่ 17 กราฟเบรคทรูการดูดซับ Ni ของ B+MK



รูปที่ 18 กราฟเบรคทรูการดูดซับ Ni ของ B+BFS



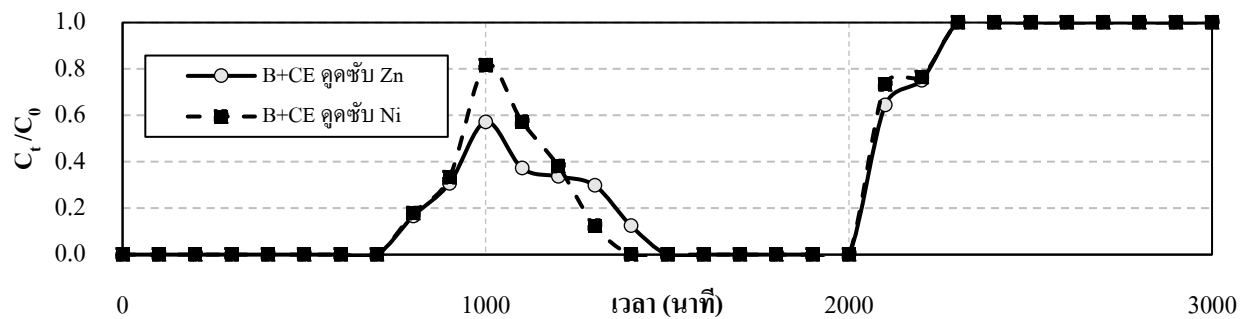
รูปที่ 19 กราฟเบรคทรูการดูดซับ Ni ของ B+RHA



รูปที่ 20 กราฟเบรคทรูการดูดซับ Ni ของ B+CE

5.2 เปรียบเทียบผลการศึกษาการดูดซับสังกะสีและนิกเกิล

จากการศึกษาพบว่าเบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุด ยกตัวอย่างเช่นจากรูปที่ 21 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความสามารถในการดูดซับสังกะสีและนิกเกิล ในวัฏจักรที่ 1 จะพบว่ากราฟการดูดซับนิกเกิลมีค่า C/C_0 ในจุดสุดท้ายของช่วงมากกว่ากราฟของการดูดซับสังกะสี กราฟของการดูดซับนิกเกิลในช่วงเข้าสู่จุดเบรคทรูเร็วกว่ากราฟของการดูดซับสังกะสี ทำให้ทราบได้ว่าเบนโทไนท์ที่ผสมกับวัสดุพอลิไซลิกสามารถดูดซับสังกะสีได้ดีกว่านิกเกิล จากค่าแฟคเตอร์การหมุนวน (R) ทำให้ทราบว่า สังกะสีสามารถดูดติดผิวได้ดีกว่านิกเกิล สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ในนิกเกิลมีมากกว่าสังกะสีและมีแนวโน้มเดียวกันในทุกตัวอย่าง กรณีนี้พบเช่นเดียวกันในตัวอย่างเบนโทไนท์ที่ผสมกับวัสดุพอลิไซลิกอื่นๆด้วยเช่นกัน



รูปที่ 21 กราฟเบรคทรูเปรียบเทียบการดูดซับ Zn และ Ni ของ B+CE

6. สรุปผลการทดสอบ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับของดินเบนโทไนท์ผสมซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน 6 ชนิด โดยการทดสอบแบบต่อเนื่องในแบบจำลองขนาดเล็กโดยการจำลองสภาวะต่างๆแบ่งเป็น 3 ช่วง วัตถุประสงค์ของการเพิ่มซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานลงในเบนโทไนท์คือเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของเบนโทไนท์ จากการทดสอบต่อเนื่องสามารถแสดงได้โดยกราฟเบรคทรูกระบวนการดูดซับซึ่งสามารถระบุพฤติกรรมการดูดซับออกมาได้ พบว่าการดูดซับสูงในตอนต้นของวัฏจักรที่ 1 ทำให้ต้องใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นถึง 10,000 มล.ก./ล. ในการทดสอบ หลังจากนั้นการดูดซับจะลดลงจนเข้าสู่ถึงจุดอิ่มตัว ในวัฏจักรที่ 2 การชะล้างของสังกะสีและนิกเกิลด้วยน้ำเกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย และสามารถดูดซับใหม่ได้ในวัฏจักรที่ 3 ซีเมนต์แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุปอซโซลาน โดยจากตารางที่ 1 ซีเมนต์มี CaO ที่สูง และซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เป็นประจุลบ จึงสามารถดูดซับประจุบวกของโลหะหนักได้มาก ทำให้มีค่าแฟกเตอร์การหน่วง (R) ที่สูงแสดงถึงการดูดซับของโลหะหนักที่มากและเบนโทไนท์ผสมกับวัสดุปอซโซลานมีความสามารถในการดูดซับสังกะสีได้ดีกว่านิกเกิล เบนโทไนท์ผสมกับซีเมนต์มีค่าแฟกเตอร์การหน่วงมากกว่าเบนโทไนท์ 1.41 เท่า และสัมประสิทธิ์การแพร่น้อยกว่า 4 เท่า ส่วนวัสดุปอซโซลานอื่นๆเมื่อผสมกับเบนโทไนท์จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] เลิศ เกิดชัยภูมิ. อิทธิพลของปริมาณดินเหนียวต่อการดูดซับโลหะหนัก. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, 2554, 22(2), 1-7.
- [2] นพพล เสี่ยมศักดิ์. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักของตัวอย่างดินที่พบในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2557.
- [3] ณัฐนันท์ ไตรัง. อิทธิพลของวัสดุทางเลือกต่อการดูดซับสารละลายโลหะหนักปนเปื้อนในดินลมหอบที่พบในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2559.
- [4] อานันต์ จันทะดวง. อิทธิพลของวัสดุปอซโซลานที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักบนดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2560.

-
- [5] Freitas, E.D. et al. Continuous adsorption of silver and copper by Verde-lodo bentonite in a fixed bed flow-through column. *Journal of Cleaner Production*. 2018, (171), 613-621.
- [6] Punrattanasin, P., Sariem, P. Adsorption of Copper, Zinc, and Nickel using Loess as Adsorbent by Column Studies, *Pol. J. Environ. Stud.*, 2015, 24(3), 1267-1275.
- [7] Tsiridis, V., Petala, M., Samaras, P. and Sakellariopoulos, G.P. Evaluation of interactions between soil and coal fly ash leachates using column percolation tests. *Waste Manag.* 2015, (43), 230-263.
- [8] Naka, A., Yasutaka, T., Sakanakura, H., Kalbe, U., Watanabe, Y., Inoba, S., et al. Column percolation test for contaminated soils: Key factors for standardization. *J Hazard Mater*, 2016, (320), 326-340.
- [9] Martins, T., Leitão, T.E., Carvalho, M.R. Assessment of Wastewater Contaminants Retention for a Soil-aquifer Treatment System Using Soil-column Experiments. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2017, 17(15), 332-335.
- [10] ธนิต เฉลิมยานนท์. หนังสือธรณีเทคนิคของของเสีย. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2550.

