

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ผลการศึกษาศักยภาพของการใช้ทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวเพื่อใช้เป็นชั้นกันซึม ในระดับห้องปฏิบัติการ ได้แบ่งผลการศึกษาเป็น 5 ส่วน ดังนี้ ผลการหาคุณสมบัติของดิน, ผลการหาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว, ผลทดสอบความต้านทานสารเคมีของค่า K, ผลคุณสมบัติการดูดซับน้ำ และผลการหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาคูณสมบัติของดิน

ผลการศึกษาคูณสมบัติของเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 พบว่า เบนโทไนต์ มีค่า Atterberg limit (ค่า LL = 487 % และค่า PI = 450 %) สูงกว่าดินลูกรังคอหงส์ (ค่า LL = 43.00 % และค่า PI = 21.80 %) และดินเหนียวเกาะยอ (ค่า LL = 42.40 % และค่า PI = 23.20 %) ค่า PI ที่สูง แสดงให้เห็นว่าเบนโทไนต์มีความเหนียว (Plasticity) สูง และมีคุณสมบัติในการพองตัว (Swelling potential) สูง ส่วนดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอมีค่า Atterberg limit ใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อนำค่า LL และ PI ของดินทั้ง 3 ชนิด ไปจำแนกประเภทของดินด้วยระบบ Unified soil classification system (USCS) พบว่า เบนโทไนต์จัดอยู่ในกลุ่ม High plasticity clay (CH) ส่วนดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอจัดอยู่ในกลุ่ม Low plasticity clay (CL)

ผลการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) แสดงให้เห็นว่า ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและ (Maximum dry density, $\rho_{d_{max}}$) และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัด (Optimum water content, ω_{opt}) ของทรายผสมเบนโทไนต์ ($\rho_{d_{max}} = 1.95 \text{ g/cc}$, $\omega_{opt} = 10.50 \%$) แสดงให้เห็นถึงดินที่มีทรายเป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากมีค่า $\rho_{d_{max}}$ สูง และมีค่า ω_{opt} ต่ำ ในทางตรงกันข้ามในส่วนของดินลูกรังคอหงส์ ($\rho_{d_{max}} = 1.70 \text{ g/cc}$, $\omega_{opt} = 18 \%$) และดินเหนียวเกาะยอ ($\rho_{d_{max}} = 1.70 \text{ g/cc}$, $\omega_{opt} = 17.11 \%$) แสดงให้เห็นว่าเป็นดินที่มีดินเหนียวเป็นส่วนประกอบหลัก

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะบางประการของเบนโทไนต์ ดินลูกรังกอยหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ

คุณลักษณะ	เบนโทไนต์	ดินลูกรังกอยหงส์	ดินเหนียวเกาะยอ
Soils properties			
Liquid limit (LL) (%)	487.00	43.00	42.40
Plasticity index (PI) (%)	450.00	21.80	23.20
P200 (%)	65.00	56.00	77.00
Color	เทาอ่อน	น้ำตาลแกมแดง	เทาเข้ม
Maximum dry density (g/cc)	1.95*	1.70	1.70
Optimum water content (%)	10.50*	18.00	17.11
ประเภทของดินในระบบ Unified	CH	CL	CL
pH	8.58	5.52	7.27
Organic content (%w/w)	1.65	4.92	5.50
SO ₄ ²⁻ (mg/kg)	3,807.11	822.82	9,604.26
Cl ⁻ (mg/kg)	*280.12	100.75	10,545.10
Exchangeable cations in soils			
Na ⁺ (meq/100g)	22.64	0.87	16.54
K ⁺ (meq/100g)	1.53	0.26	2.30
Ca ²⁺ (meq/100g)	24.45	3.49	6.49
Mg ²⁺ (meq/100g)	2.52	1.00	10.70
Mineralogical composition			
SiO ₂ (%)	63.97	45.37	50.84
Al ₂ O ₃ (%)	15.66	28.69	15.54
Fe ₂ O ₃ (%)	7.74	17.32	11.87
K ₂ O (%)	0.75	6.46	5.50
SO ₃ (%)	0.75	0.18	5.04
CaO (%)	2.62	0.36	1.42

หมายเหตุ * ทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5%

ค่าองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (Organic content) ของเบนโทไนต์ ดินลูกรัง คอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ มีค่าเท่ากับ 1.65, 4.92 และ 5.50 %w/w ตามลำดับ โดยดินลูกรัง คอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ ซึ่งเก็บมาจากดินในสภาพธรรมชาติที่ความลึกประมาณ 1.0 เมตร จึงมีสารอินทรีย์ปนอยู่ในปริมาณที่มากกว่าเบนโทไนต์ ซึ่งเกิดจากเถ้าภูเขาไฟและขุดมาจากเหมือง ที่มีความลึกจากผิวดินมาก

ดินเหนียวเกาะยอมีปริมาณ SO_4^{2-} และ Cl^- ที่สูงมาก เมื่อเทียบกับเบนโทไนต์และ ดินลูกรังคอหงส์ ทั้งนี้เนื่องจากดินเหนียวเกาะยอเป็นดินเหนียวทะเล (Marine clay) ที่เก็บจาก ชายฝั่งทะเลบริเวณเกาะยอ อ.เมือง จ.สงขลา ค่าประจุบวกที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable cations) เป็นค่าที่แสดงถึงจำนวนประจุลบของแร่ดินเหนียว ซึ่งสามารถบอกถึงความเหนียวของดิน และ Swelling potential ของดิน โดยความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินในภาพรวม เรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ เบนโทไนต์, ดินเหนียวเกาะยอ และดินลูกรังคอหงส์ ตามลำดับ

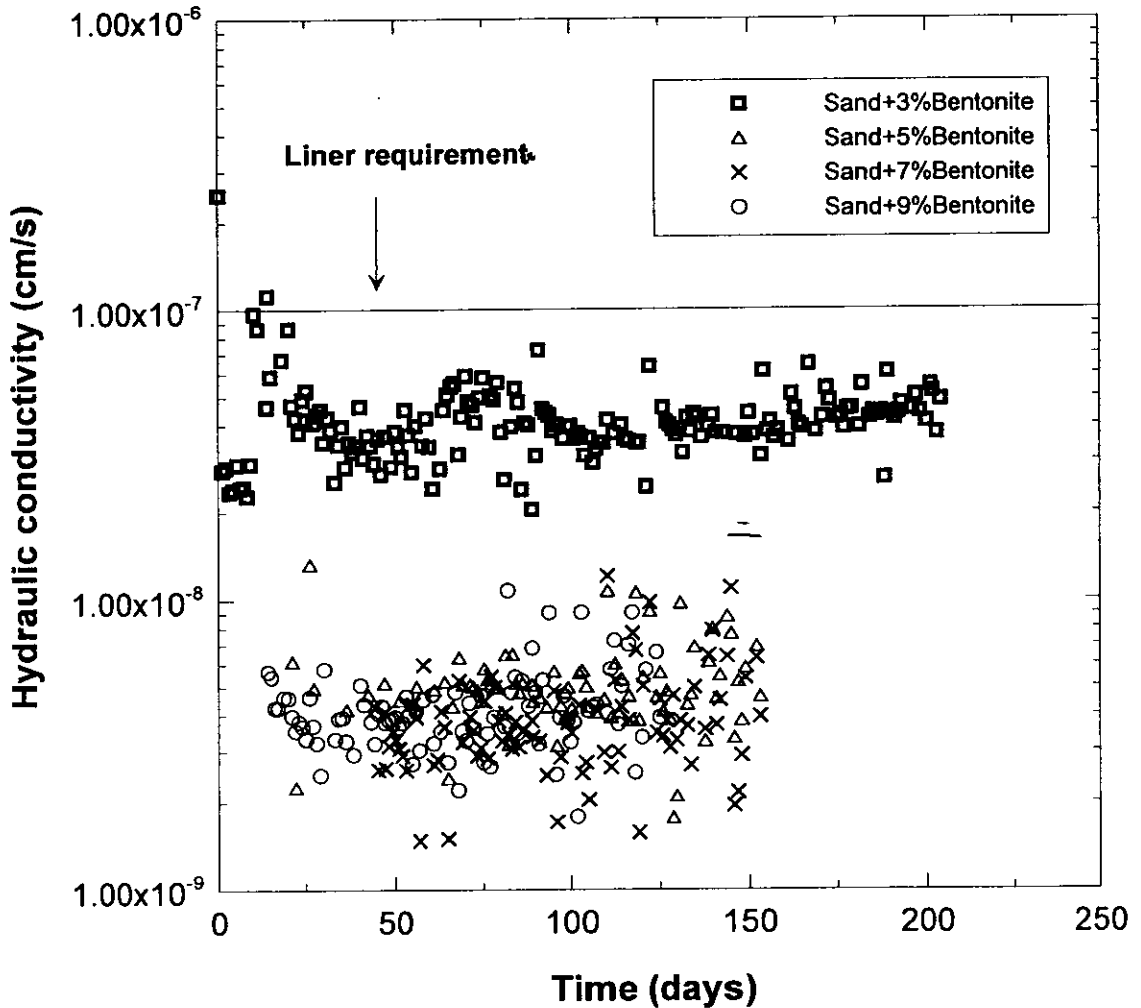
ผลการหาส่วนประกอบแร่ธาตุ (Mineralogical Composition) พบว่า ดินทั้ง 3 ชนิด ประกอบด้วย Silica และ Alumina เป็นหลัก โดยดินลูกรังคอหงส์ มีเหล็กเป็นธาตุประกอบอยู่ใน ส่วนผสมในปริมาณที่สูงกว่าดินอีก 2 ชนิด ซึ่งเกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและฟิสิกส์ ของหินจนกลายเป็นดินลูกรัง และจากการที่มีเหล็กในปริมาณสูงนี้เอง ทำให้ดินลูกรังมีสีน้ำตาลแดง

4.2 ผลการศึกษาค่า K

4.2.1 ผลการศึกษาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์เพื่อหาปริมาณเบนโทไนต์ที่เหมาะสม

ค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 3%, 5%, 7% และ 9% ถูกหาด้วยวิธี Falling head test และคำนวณค่า K โดยใช้สมการที่ 3.1 ผลความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของ ทรายผสมเบนโทไนต์ ที่ 3%, 5%, 7% และ 9% ซึ่งได้ทำการทดสอบนานประมาณ 150 – 200 วัน ดังแสดงไว้ในภาพประกอบที่ 4.1 พบว่าค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 3% มีค่าคงที่ประมาณ 4.00×10^{-8} cm/s เมื่อทดสอบผ่านไปประมาณ 25 วัน จนถึงประมาณ 210 วัน ในขณะที่ทรายผสม เบนโทไนต์ที่ 5%, 7% และ 9% มีค่าใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทดสอบที่ประมาณ $4.00 - 5.00 \times 10^{-9}$ cm/s ตลอดระยะเวลา 150 วันในการทดสอบ ค่า K เฉลี่ยสำหรับทรายผสมเบนโทไนต์ ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.2 โดย K มีค่าประมาณ 4.14×10^{-8} , 5.15×10^{-9} , 4.89×10^{-9} และ 4.13×10^{-9} cm/s สำหรับ ส่วนผสมเบนโทไนต์ที่ 3%, 5%, 7% และ 9% ตามลำดับ ค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ ที่ 0% เท่ากับ 3.6×10^{-5} cm/s ซึ่งจากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า ค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์จะ ลดลงเมื่อมีปริมาณเบนโทไนต์ที่มากขึ้น โดยค่า K จะไม่มีความแตกต่างกันมากนักเมื่อมี ปริมาณเบนโทไนต์มากกว่า 5%

การทดสอบในชั้นตอนนี้ถูกกระทำขึ้นเพื่อหาอัตราส่วนระหว่างทรายผสมเบนโทไนต์ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบในชั้นคอนค่อไป โดยจากผลการทดสอบในชั้นตอนนี้พบว่า อัตราส่วนของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 3% - 5% เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทดสอบ เนื่องจากมีค่า K ที่ไม่มากกว่า 1×10^{-7} cm/s ตามเกณฑ์มาตรฐานชั้นกันซึม



ภาพประกอบที่ 4.1 ค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์

ตารางที่ 4.2 ผลการหาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนด์

% เบนโทไนด์	ค่า K โดยเฉลี่ย (cm/s)
0	3.60×10^{-5}
3	4.14×10^{-8}
5	5.15×10^{-9}
7	4.89×10^{-9}
9	4.13×10^{-9}

4.2.2 ผลการศึกษาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนด์ ดินลูกรังคอกหงส์และดินเหนียวเกาะยอ

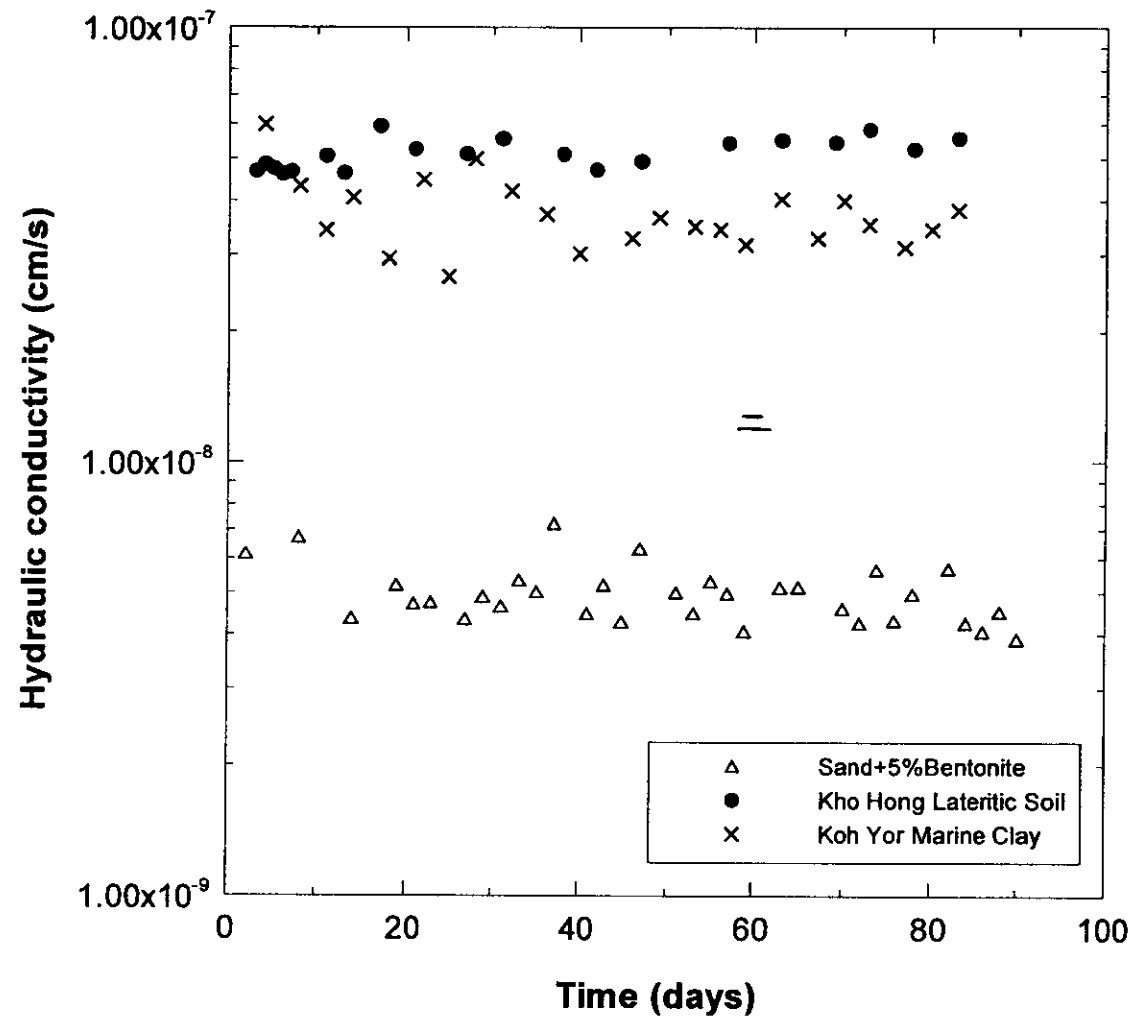
ผลการทดสอบหาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนด์และดินเหนียวทั้ง 2 ชนิด ซึ่งแสดงในรูปของความสัมพันธ์ของค่า K ที่คำนวณได้ โดยใช้สมการที่ 3.1 กับเวลา (ภาพประกอบที่ 4.2) พบว่า ค่า K ของดินทั้งหมดที่ทำการทดสอบมีค่าแปรเปลี่ยนเล็กน้อยตามเวลา จึงมีการกำหนดเงื่อนไขในการเลือกค่า K ที่สามารถยอมรับเป็นผลการทดสอบได้ โดยมีเงื่อนไขว่าค่า K จากการทดสอบจะใช้ได้เมื่อผลต่างของอัตราการไหลเข้าของ Influent (Q_{in}) และอัตราการไหลออกของ Effluent (Q_{out}) อยู่ในช่วง $\pm 5\%$ และมีช่วงของค่า K คงที่ตามเวลา โดยจากผลการทดสอบในภาพประกอบที่ 4.2 พบว่า ค่า K ของดินทั้ง 3 ชนิด อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เมื่อเข้าสู่สัปดาห์ที่ 3 ของการทดสอบ โดยค่า K เฉลี่ยของทรายผสมเบนโทไนด์ที่ 5 % ต่ำกว่าดินเหนียวเกาะยอและดินลูกรังคอกหงส์ ตามลำดับ โดยมีค่า K เฉลี่ยเท่ากับ 5.15×10^{-9} , 3.39×10^{-8} และ 5.67×10^{-8} cm/s ตามลำดับ ค่า K ของดินทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s ตามเกณฑ์มาตรฐานของชั้นกั้นซึม

4.3 ผลการศึกษาความต้านทานสารเคมีของค่า K

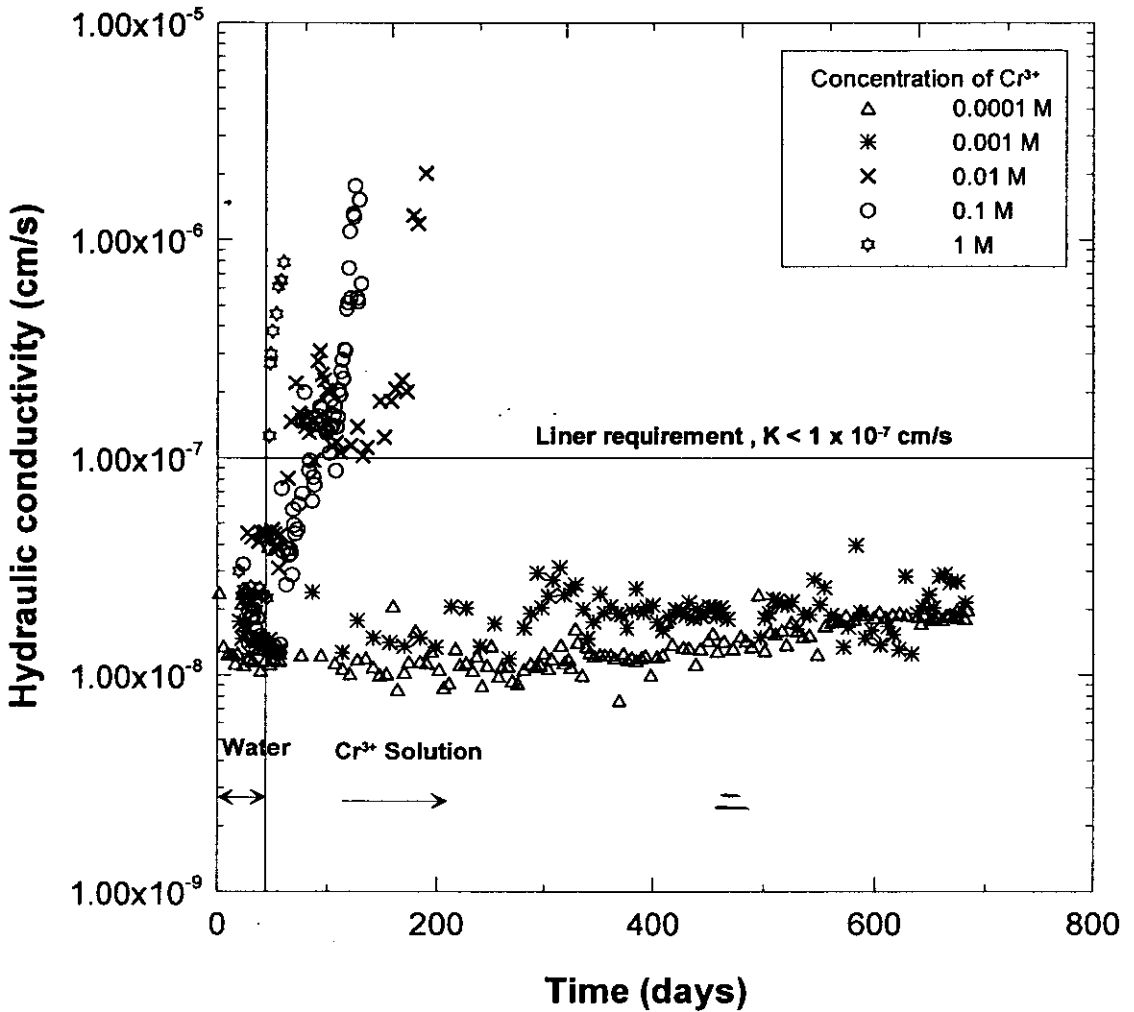
4.3.1 ความต้านทานสารเคมีของทรายผสมเบนโทไนด์

การทดสอบความต้านทานสารเคมีของทรายผสมเบนโทไนด์ที่ 3% ซึ่งทำการทดสอบด้วยการเตรียมดินผสมเบนโทไนด์ 5 ตัวอย่าง แล้วปล่อยให้สารละลายโลหะหนัก Cr^{3+} ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 และ 1 M ไหลผ่าน โดยใช้ระยะเวลาในการทดสอบสูงสุด ประมาณ 700 วัน ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาจากการทดสอบได้แสดงในภาพประกอบที่ 4.3 พบว่า ทรายผสมเบนโทไนด์ที่ 3 % ทั้ง 5 ตัวอย่าง เมื่อทดสอบกับน้ำกลั่น พบว่ามีค่า K อยู่ระหว่าง 1.00×10^{-8} – 5.00×10^{-8} cm/s ซึ่งหลังจากมีการเปลี่ยนมาทดสอบกับสารละลาย Cr^{3+} ในวันที่ 57 ของการทดสอบ ค่า K เริ่มมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะในตัวอย่างดินที่ทดสอบกับสารละลาย Cr^{3+} ที่มีความเข้มข้นสูง โดยค่า K ของตัวอย่างดินเมื่อใช้สารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น

0.0001 และ 0.001 M มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการทดสอบประมาณ 700 วัน และยังคงมีค่าต่ำกว่า 1.00×10^{-7} cm/s ดังนั้นทรายผสมเบนโทไนต์ สามารถต้านทานสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 0.0001 และ 0.001 M ได้ สำหรับทรายผสมเบนโทไนต์ที่ทดสอบกับสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.1 และ 1 M พบว่า ค่า K สูงขึ้นมากกว่า 1.00×10^{-7} cm/s หลังวันที่ 70, 77 และ 59 ของการทดสอบ ตามลำดับ ดังนั้นทรายผสมเบนโทไนต์ 3% จึงไม่สามารถต้านทานสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้นระดับที่สูง 0.01 M ได้



ภาพประกอบที่ 4.2 ผลการศึกษาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% ดินลูกรังคองหงส์และดินเหนียวเกาะขอม

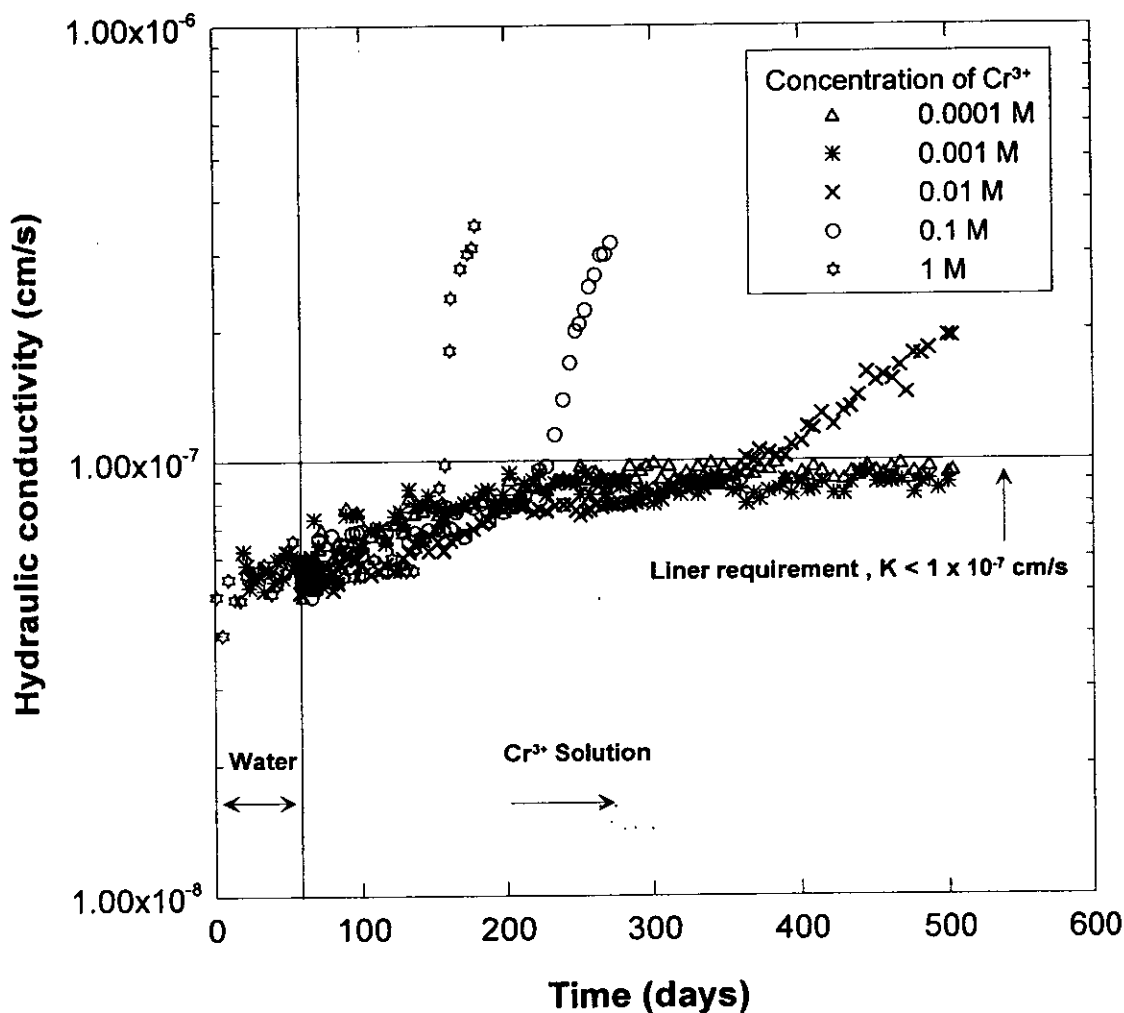


ภาพประกอบที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับเวลาของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Cr^{3+}

4.3.2 ความต้านทานสารเคมีของดินลูกรังคองหงส์

ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของดินลูกรังคองหงส์ที่ได้จากการทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Cr^{3+} ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 และ 1 M สำหรับระยะเวลาในการทดสอบประมาณ 500 วัน ได้แสดงในภาพประกอบที่ 4.4 โดยค่า K เริ่มต้นของดินลูกรังคองหงส์ ขณะทำการทดสอบกับน้ำกลั่นในทุกชุดการทดสอบ มีค่าอยู่ระหว่าง $5.00 \times 10^{-8} - 6.00 \times 10^{-8}$ cm/s โดยหลังจากมีการเปลี่ยนมาทดสอบกับสารละลาย Cr^{3+} ในวันที่ 70 ของการทดสอบ พบว่า ค่า K เริ่มมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะในตัวอย่างดินที่ทดสอบกับสารละลาย Cr^{3+} ที่มีความเข้มข้นสูง กล่าวคือ ค่า K ของตัวอย่างดินลูกรังคองหงส์ เมื่อทดสอบด้วยสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.1 และ 1 M มีค่า K สูงขึ้นมากกว่า 1.00×10^{-7} cm/s หลังจาก

วันที่ 400, 233 และ 162 ของการทดสอบ ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่า ดินลูกรังคองหงส์ ไม่สามารถต้านทานสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้นมากกว่า 0.01 M ได้ ในขณะที่ค่า K ของตัวอย่างดินเมื่อใช้สารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 0.0001 และ 0.001 M มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการทดสอบประมาณ 500 วัน โดยมีค่า K คงที่อยู่ภายในช่วง $7.00 \times 10^{-8} - 9.00 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ ซึ่งยังคงมีค่าต่ำกว่า $1.00 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ จึงสามารถต้านทานสารเคมีที่มีความเข้มข้นระดับที่ต่ำกว่า 0.001 M ได้



ภาพประกอบที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับเวลาของดินลูกรังคองหงส์ที่ทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Cr^{3+}

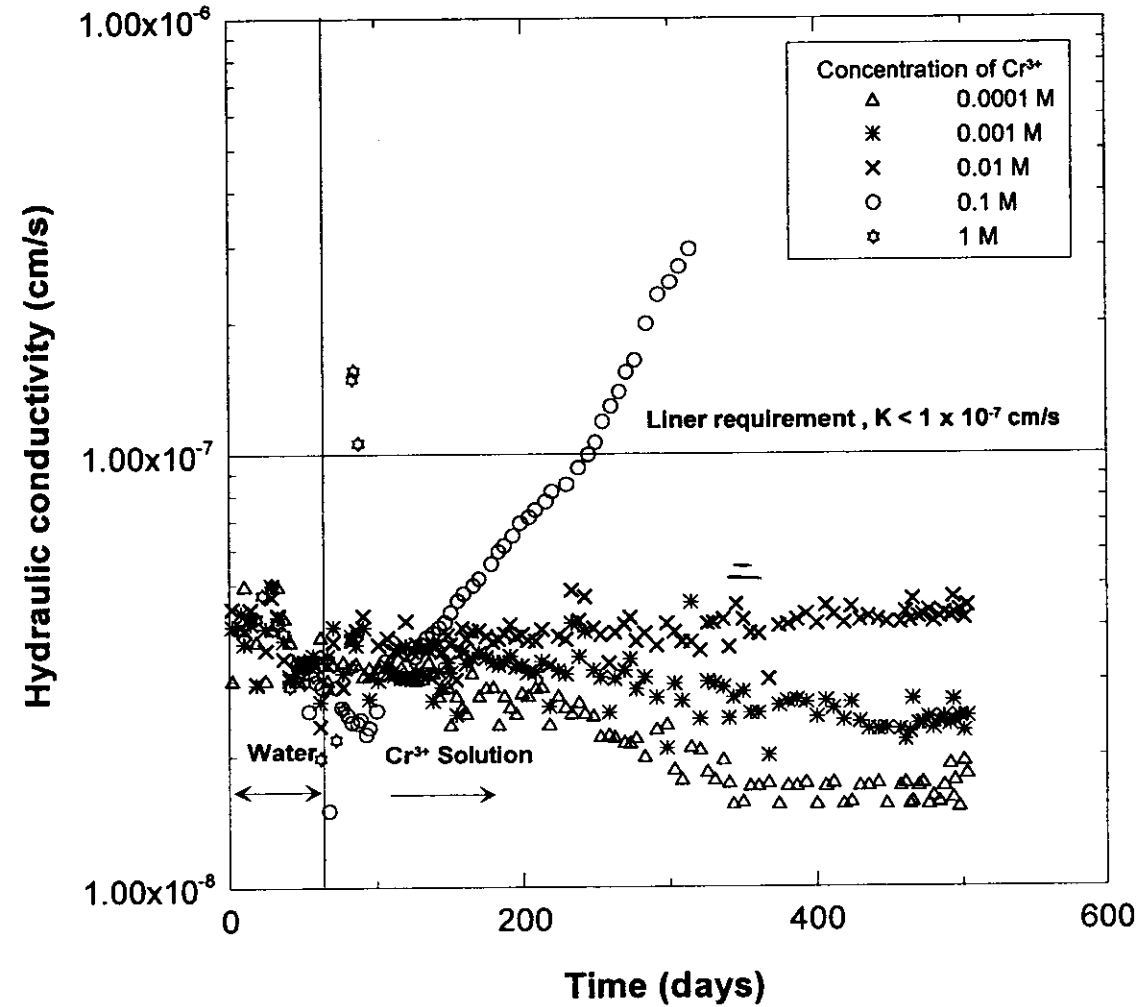
4.3.3 ความต้านทานสารเคมีของดินเหนียวเกาะยอ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับเวลา ของดินเหนียวเกาะยอที่ได้จากทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Cr^{3+} ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 และ 1 M ใช้ระยะเวลาในการทดสอบสูงสุด ประมาณ 500 วัน ได้แสดงในภาพประกอบที่ 4.5 โดยดินเหนียวเกาะยอมีค่า K เริ่มต้นขณะทำการทดสอบกับน้ำกลั่นในทุกชุดการทดสอบ อยู่ระหว่าง $3.00 \times 10^{-8} - 5.00 \times 10^{-8}$ cm/s และหลังจากมีการเปลี่ยนมาทดสอบกับสารละลาย Cr^{3+} ในวันที่ 83 ของการทดสอบ พบว่า ค่า K เริ่มมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะในตัวอย่างดินที่ทดสอบกับสารละลาย Cr^{3+} ที่มีความเข้มข้นสูง ค่า K ของตัวอย่างดินเมื่อใช้สารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 0.0001, 0.001 และ 0.01 M มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการทดสอบประมาณ 500 วัน โดยมีค่า K ของทั้ง 3 ระดับความเข้มข้น ประมาณ 1.70×10^{-8} , 2.40×10^{-8} และ 4.50×10^{-8} cm/s ตามลำดับ ซึ่งค่า K ของความเข้มข้นทั้ง 3 ระดับนี้ ยังมีค่าต่ำกว่า 1.00×10^{-7} cm/s ดังนั้นดินเหนียวเกาะยอจึงมีความต้านทานสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 0.0001, 0.001 และ 0.01 M ได้ ค่า K ของตัวอย่างดินเหนียวเกาะยอไม่สามารถต้านทานสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 0.1 และ 1 M ได้ เนื่องจากค่า K สูงขึ้นมากกว่า 1.00×10^{-7} cm/s โดยพบว่าหลังจบการเติมสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 0.1 M ค่า K ค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีค่ามากกว่า 1.00×10^{-7} cm/s ในวันที่ 250 ของการทดสอบ สำหรับสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 1 M พบว่า หลังจากเติมสารละลาย Cr^{3+} แล้ว ค่า K สูงขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 1 วัน

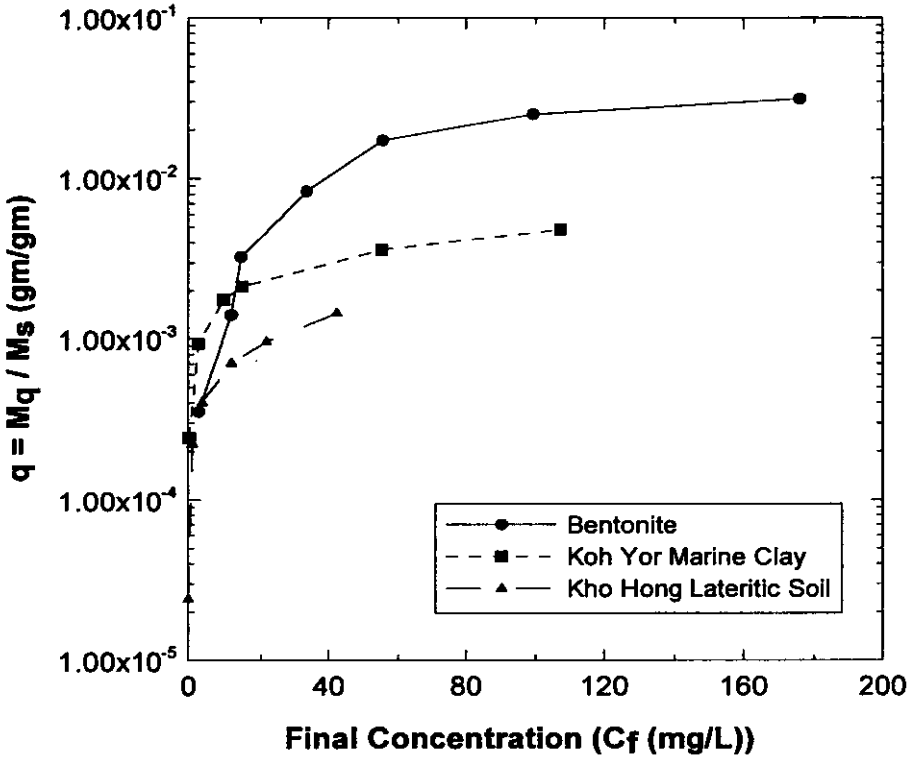
4.4 คุณสมบัติการดูดติดผิว

ผลการทดสอบแบบแบทช์ ในการศึกษาคุณสมบัติการดูดติดผิวของเบนโทไนด์, ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ กับโลหะหนัก 5 ชนิด อันได้แก่ Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} และ Cr^{3+} ได้แสดงไว้ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนของมวลโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวต่อมวลของดินที่ดูดสารนั้น (q) (สมการที่ 2.14) และความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโลหะหนัก (C) เมื่อกระบวนการดูดติดผิวสมดุลแล้ว หรือที่เรียกว่า “ไอโซเทอม” ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.6 – 4.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสำหรับทุกโลหะหนักที่ศึกษา ความสามารถในการดูดติดผิวของดินทั้ง 3 ชนิด พิจารณาจากค่า q_{max} จากมากไปหาน้อย ได้แก่ เบนโทไนด์, ดินเหนียวเกาะยอและดินลูกรังคอหงส์ ตามลำดับ ความสามารถในการดูดติดผิวของดินจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของดินใน ส่วนที่เป็นดินเม็ดละเอียด ซึ่งมีประจุลบอยู่โดยธรรมชาติ ดินเม็ดละเอียดที่มีประจุลบมากกว่าหรือมี CEC มากกว่า ก็จะดูดสารละลายประจุบวกมาเกาะติดผิวได้มากกว่า ดังนั้นสำหรับชีวิตจำนวนประจุลบอย่างง่าย คือ ค่า Plasticity index (PI) ดินที่มีประจุบวกมาก (หรือมี CEC มาก) ก็จะมีค่า PI สูง

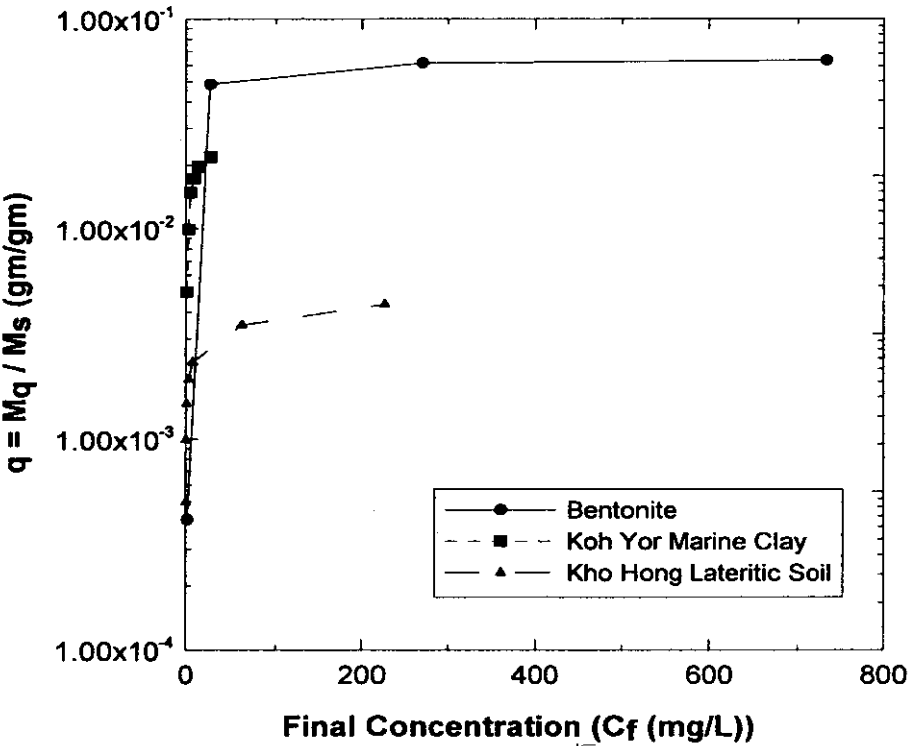
ค่า PI ของดินในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า เบนโทไนต์มี PI มากกว่าดินเหนียวเกาะขยและดินลูกรังคอหงส์ ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับของเบนโทไนต์สูงกว่าดินเหนียวเกาะขยและดินลูกรังคอหงส์



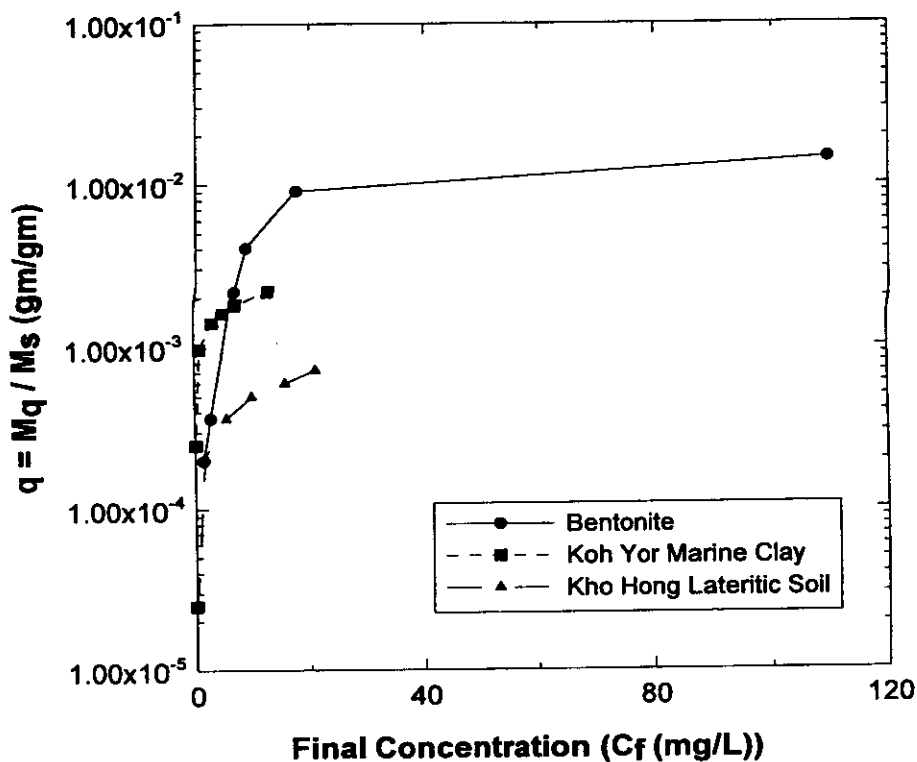
ภาพประกอบที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับเวลาของดินเหนียวเกาะขยที่ทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Cr^{3+}



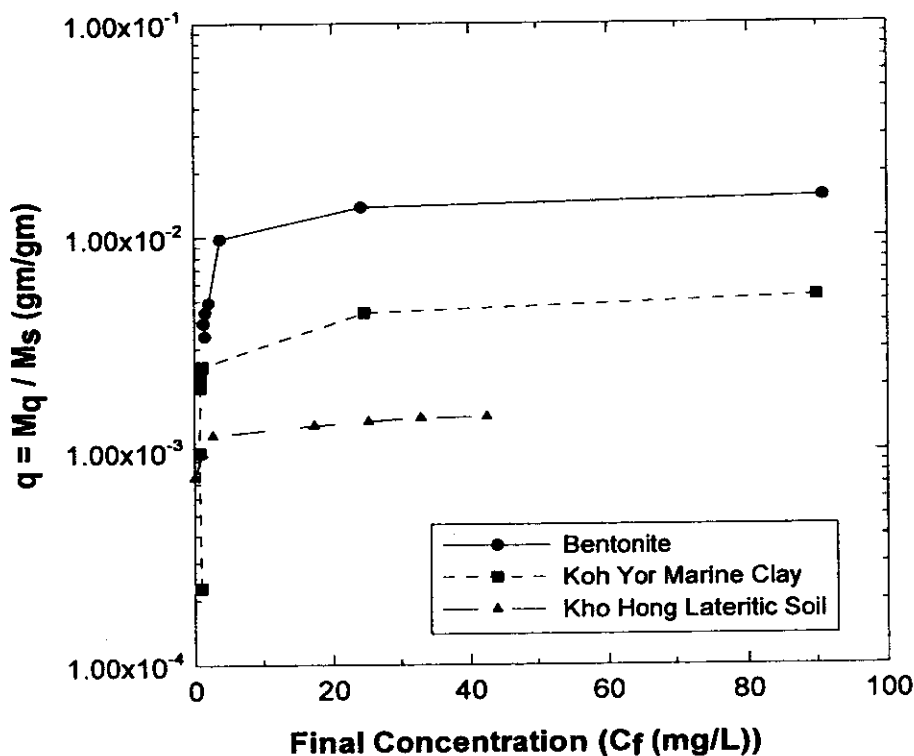
ภาพประกอบที่ 4.6 ไอโซเทอมแสดงการดูดซับของ Cd^{2+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคองหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ



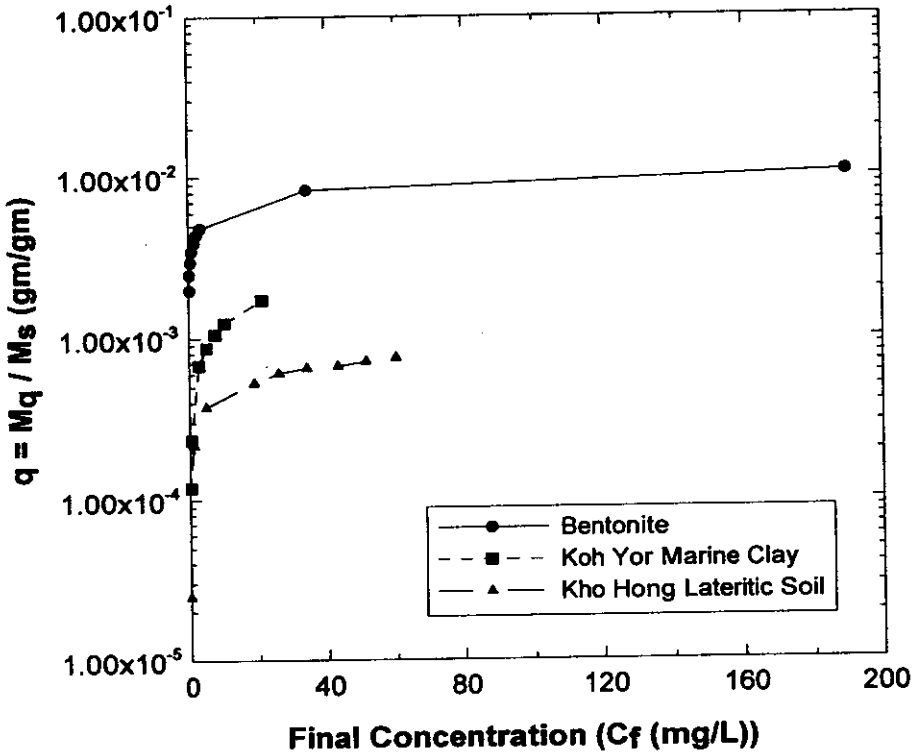
ภาพประกอบที่ 4.7 ไอโซเทอมแสดงการดูดซับของ Pb^{2+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคองหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ



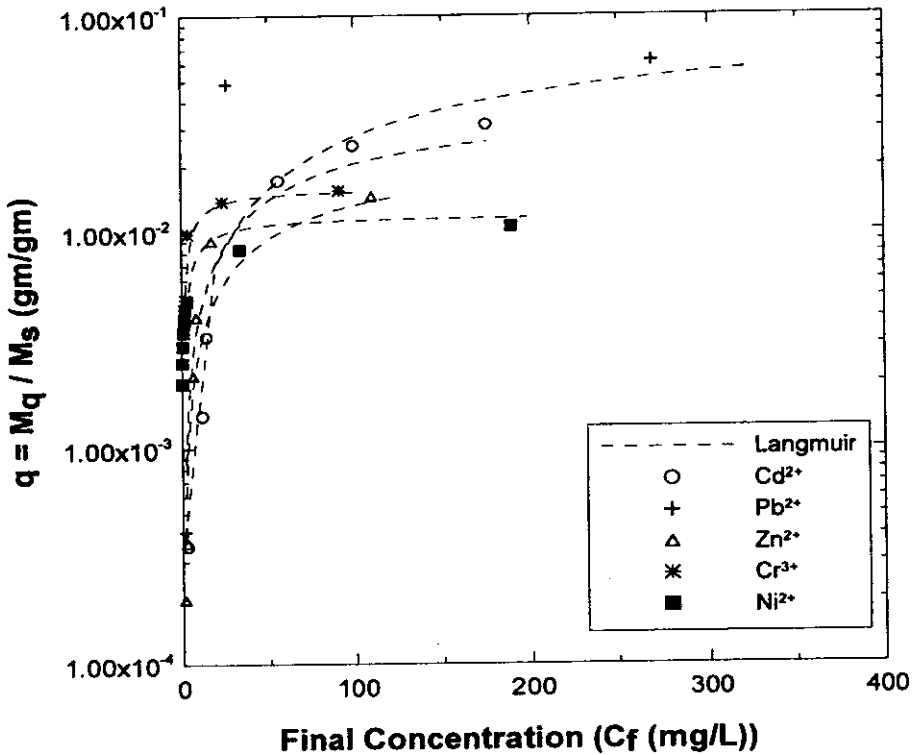
ภาพประกอบที่ 4.8 ไอโซเทอมแสดงการดูดซับของ Zn^{2+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคองหงส์ และดินเหนียวเกาะขอม



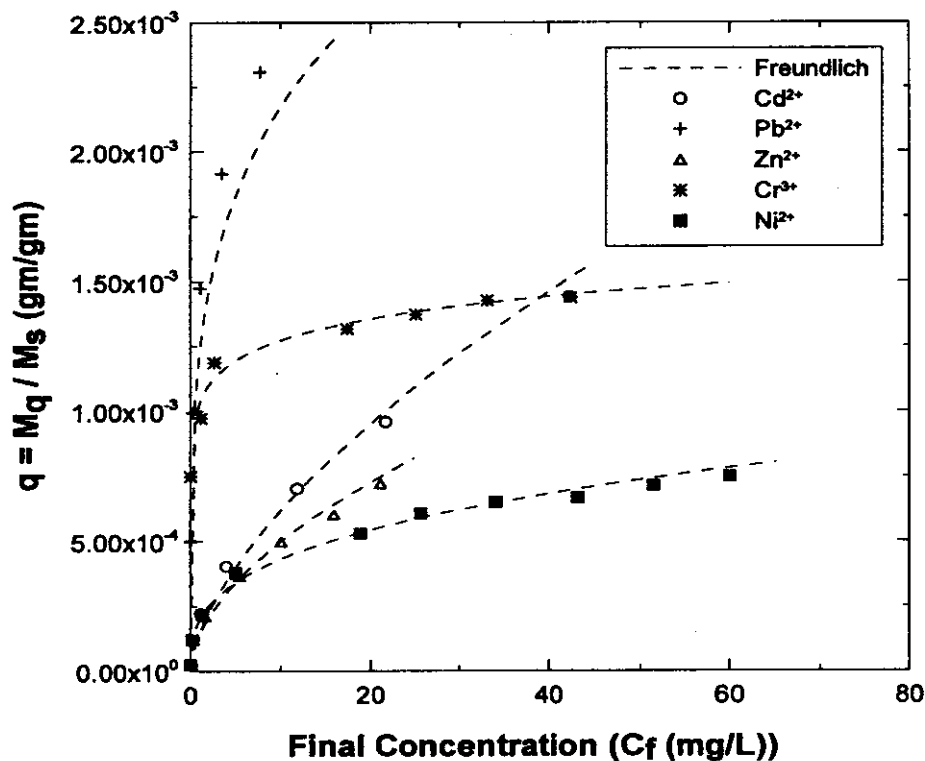
ภาพประกอบที่ 4.9 ไอโซเทอมแสดงการดูดซับของ Cr^{3+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคองหงส์และดินเหนียวเกาะขอม



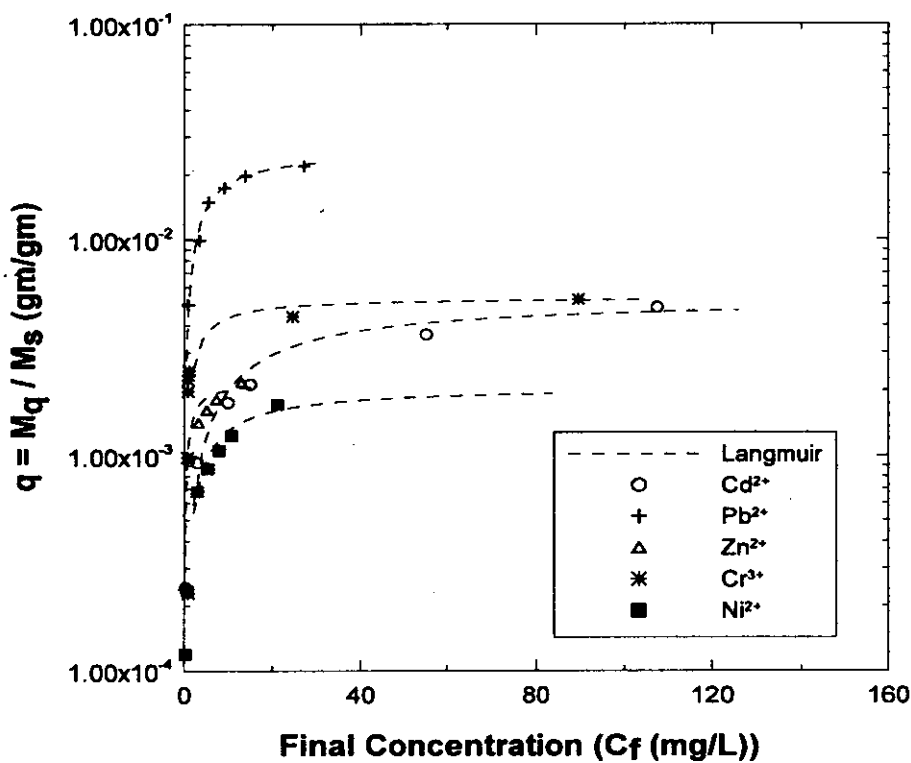
ประกอบที่ 4.10 ไอโซเทอมแสดงการดูดติดผิวของ Ni^{2+} โดยบนโทไนต์ ดินลูกรังของสงและดินเหนียวเกาะช



ภาพประกอบที่ 4.11 ไอโซเทอมแสดงการดูดติดผิวแบบ Langmuir ของบนโทไนต์



ภาพประกอบที่ 4.12 ไอโซเทอมแสดงการดูดซับผิวแบบ Freundlich ของดินลูกรังคอหงส์



ภาพประกอบที่ 4.13 ไอโซเทอมแสดงการดูดซับผิวแบบ Langmuir ของดินเหนียวเกาะขอ

4.4.1 ไอโซเทอมของการดูดติดผิว

ไอโซเทอมการดูดโลหะหนักติดผิวของดินทั้ง 3 ชนิด แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า q กับ ค่าความเข้มข้นของสารละลาย เมื่อการดูดติดผิวสมดุลแล้ว (C_e) ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถทำได้โดยสมการแบบ Freundlich Isotherm (สมการที่ 2.16) หรือสมการแบบเส้นตรง (สมการที่ 2.17) หรือสมการแบบ Langmuir (สมการที่ 2.18) การทดสอบการทดสอบกับสมการแบบ Freundlich ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 โดยจากหลักเกณฑ์ว่า ดินจะดูดติดผิวได้ดีกว่า ถ้าค่า K_F และ $1/n$ สูงกว่า พบว่า เบนโทไนต์มีความสามารถดูดโลหะหนักทุกชนิดมาติดผิวได้ดีกว่าดินเหนียวเกาะยอและดินลูกรังคอกหงส์ ตามลำดับ

การฟิตไอโซเทอมกับสมการของ Langmuir ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 พบว่า เบนโทไนต์มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทุกชนิดมาติดผิวได้ดีกว่าดินเหนียวเกาะยอและดินลูกรังคอกหงส์ ตามลำดับ โดยไอโซเทอมการดูดติดผิวของเบนโทไนต์และดินเหนียวเกาะยอสามารถฟิตเข้ากับสมการแบบ Langmuir ได้ดีที่สุดในค่า R^2 ของเบนโทไนต์ เท่ากับ 0.933, 0.955, 0.804, 0.999, และ 0.995 สำหรับ Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{3+} และ Ni^{2+} ตามลำดับ ส่วนค่า R^2 ของดินเหนียวเกาะยอ เท่ากับ 0.970, 0.997, 0.974, 0.998 และ 0.960 สำหรับ Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{3+} และ Ni^{2+} ตามลำดับ ในขณะที่ไอโซเทอมการดูดติดผิวของดินลูกรังคอกหงส์ สามารถฟิตเข้ากับสมการแบบ Freundlich ได้ดีที่สุดในค่า R^2 เท่ากับ 0.985, 0.967, 0.996, 0.979 และ 0.998 สำหรับ Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{3+} และ Ni^{2+} ตามลำดับ

โดยทั่วไปในน้ำชะมูลฝอยจะมีความเข้มข้นของโลหะหนักที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งที่ความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำๆ นี้ เมื่อนำไปฟิตไอโซเทอม จะมีค่าความชัน (Slope) ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือ Linear โดยเรียกค่า Slope นี้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์พาร์ทิชัน (K_p) โดยค่า K_p และ Adsorption capacity ซึ่งได้คำนวณมาจากค่า q_{max} (q_{max} คือ มวลโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวสูงสุดต่อมวลของดินที่ดูดสารนั้นๆ) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 พบว่า เบนโทไนต์มีความสามารถในการดูดซับดีกว่าดินเหนียวเกาะยอและดินลูกรังคอกหงส์ ตามลำดับ โดยค่า K_p ของเบนโทไนต์ มีค่าอยู่ระหว่าง 200 – 2,700 L/kg ดินลูกรังคอกหงส์ มีค่าอยู่ระหว่าง 70 – 600 L/kg ส่วนดินเหนียวเกาะยอ มีค่าอยู่ระหว่าง 200 – 2,800 L/kg

การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของดินทั้ง 3 ชนิด พิจารณาจาก Adsorption capacity แบ่งตามชนิดของการดูดซับ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 โดยพบว่า เบนโทไนต์สามารถดูดโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด อันได้แก่ Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{3+}

และ Ni^{2+} มาติดที่ผิว ได้ดีกว่าดินเหนียวเกาะขยและดินลูกรังคองหงส์ ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาลำดับการดูดซับโลหะหนักของดินทั้ง 3 ชนิด จากสมการที่พิตกับดิน ทั้ง 3 ชนิด ได้ดีที่สุด ดังภาพประกอบที่ 4.11 – 4.13 (ตารางที่ 4.6) พบว่า เบนโทไนต์สามารถดูด Cr^{3+} มาติดที่ผิว ได้ดีกว่า Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} และ Ni^{2+} ตามลำดับ สำหรับดินลูกรังคองหงส์ สามารถดูด Cr^{3+} มาติดที่ผิว ได้ดีกว่า Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , และ Cd^{2+} ตามลำดับ และดินเหนียวเกาะขย สามารถดูด Cr^{3+} มาติดที่ผิว ได้ดีกว่า Pb^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} และ Zn^{2+} ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของไอโซเทอมแบบ Freundlich

โลหะหนัก	เบนโทไนต์			ดินลูกรังคองหงส์			ดินเหนียวเกาะขย		
	K_F (L/kg)	1/n	R^2	K_F (L/kg)	1/n	R^2	K_F (L/Kg)	1/n	R^2
Cd^{2+}	2,230.158	0.456	0.692	147.707	0.621	0.985	510.270	0.501	0.992
Pb^{2+}	890.369	0.680	0.773	1,238.511	0.244	0.967	5,891.149	0.448	0.948
Zn^{2+}	471.931	0.739	0.790	141.938	0.545	0.996	840.040	0.438	0.989
Cr^{3+}	4,366.164	0.246	0.821	1,033.951	0.090	0.979	1,887.122	0.245	0.760
Ni^{2+}	3,451.437	0.233	0.981	199.986	0.333	0.998	314.087	0.593	0.991

ตารางที่ 4.4 ค่า K_p และ Adsorption capacity จากไอโซเทอมแบบเส้นตรง

โลหะหนัก	เบนโทไนต์		ดินลูกรังคองหงส์		ดินเหนียวเกาะขย	
	K_p (L/kg)	Adsorption capacity (meq/100g)	K_p (L/kg)	Adsorption capacity (meq/100g)	K_p (L/kg)	Adsorption capacity (meq/100g)
Cd^{2+}	82.848	55.473	59.279	1.251	65.553	6.439
Pb^{2+}	64.596	81.591	19.264	4.200	801.962	21.055
Zn^{2+}	69.320	53.308	49.517	1.524	288.133	5.572
Cr^{3+}	170.039	88.841	43.134	8.188	58.408	30.190
Ni^{2+}	55.592	35.772	19.154	2.211	81.341	5.847

ตารางที่ 4.5 ค่าปริมาณสูงสุดของมวลโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักของมวลดิน (X_m) และ Adsorption capacity จากไอโซเทอมแบบ Langmuir

โลหะหนัก	เบนโทไนต์			ดินลูกรังคอหงส์			ดินเหนียวเกาะขย		
	X_m (mg/g)	Adsorption capacity (meq/100g)	R^2	X_m (mg/g)	Adsorption capacity (meq/100g)	R^2	X_m (mg/g)	Adsorption capacity (meq/100g)	R^2
Cd^{2+}	39.370	70.041	0.933	1.035	1.842	0.978	5.274	9.383	0.970
Pb^{2+}	106.383	102.657	0.955	4.305	4.154	0.999	25.126	24.246	0.997
Zn^{2+}	23.148	70.800	0.804	0.797	2.437	0.942	2.195	6.715	0.974
Cr^{3+}	15.848	91.097	0.999	1.661	9.549	0.996	5.333	30.657	0.998
Ni^{2+}	11.834	40.205	0.995	0.748	2.540	0.986	2.050	6.966	0.960

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดติดผิวโลหะหนักของเบนโทไนต์, ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะขย

ชนิดของการดูดซับ	ลำดับของการดูดซับ
ความสามารถในการดูดซับ Cd^{2+}	เบนโทไนต์ > ดินเหนียวเกาะขย > ดินลูกรังคอหงส์
ความสามารถในการดูดซับ Pb^{2+}	เบนโทไนต์ > ดินเหนียวเกาะขย > ดินลูกรังคอหงส์
ความสามารถในการดูดซับ Zn^{2+}	เบนโทไนต์ > ดินเหนียวเกาะขย > ดินลูกรังคอหงส์
ความสามารถในการดูดซับ Cr^{3+}	เบนโทไนต์ > ดินเหนียวเกาะขย > ดินลูกรังคอหงส์
ความสามารถในการดูดซับ Ni^{2+}	เบนโทไนต์ > ดินเหนียวเกาะขย > ดินลูกรังคอหงส์
การดูดซับของเบนโทไนต์	$Cr^{3+} > Pb^{2+} > Cd^{2+} > Zn^{2+} > Ni^{2+}$
การดูดซับของดินลูกรังคอหงส์	$Cr^{3+} > Pb^{2+} > Ni^{2+} > Zn^{2+} > Cd^{2+}$
การดูดซับของดินเหนียวเกาะขย	$Cr^{3+} > Pb^{2+} > Cd^{2+} > Ni^{2+} > Zn^{2+}$

4.5 ผลการหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่

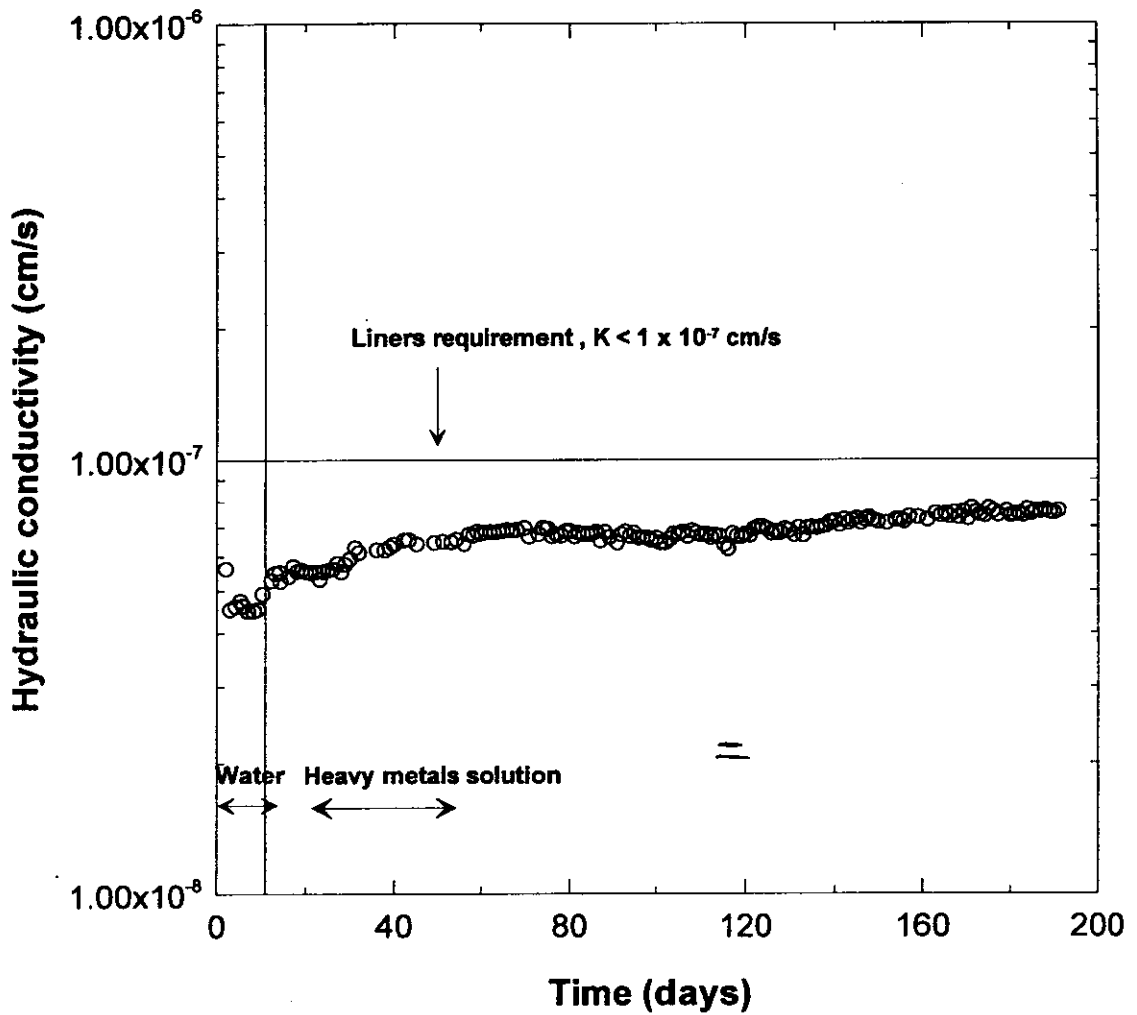
4.5.1 ผลการหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของดินลูกรังคอกหงส์จาก Breakthrough curves

การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Breakthrough curves ซึ่งทำได้โดยนำค่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักของ Effluent เทียบกับเวลา ไปพิดกับสมการที่ 2.11 ผลการทดสอบ พบว่า การทดสอบโดยวิธีนี้สามารถทำได้กับดินลูกรังคอกหงส์เท่านั้น การทดสอบกับทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวเกาะยอ ไม่ประสบผลสำเร็จ ทั้งนี้เนื่องจากไม่พบ Breakthrough curves ของสารละลายโลหะหนักทุกชนิด หลังจากเวลาในการทดสอบผ่านไปประมาณ 380 วัน การที่ไม่พบ Breakthrough curves ของโลหะหนักในการทดสอบกับทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวเกาะยอนี้ เนื่องจากดินทั้ง 2 ชนิดนี้มีค่า K ที่ต่ำ (ดังแสดงให้เห็นในหัวข้อต่อไป) ทำให้ไม่สามารถเห็น Breakthrough curves ตลอดเวลาในการทดสอบ การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวเกาะยอ จึงเปลี่ยนไปทำโดยการหา Concentration profile ในดินโดยวิธีการสกัดหาความเข้มข้นในดินด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด ดังแสดงในหัวข้อ 4.5.2

ผลการทดสอบแบบสดมภ์ สามารถแสดงได้เป็น 2 ส่วน คือ 1) ค่า K ของดินลูกรังคอกหงส์เทียบกับเวลา และ 2) ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ที่หาจากการพิด Breakthrough curves ดังมีรายละเอียดดังนี้

4.5.1.1 ค่า K ของดินลูกรังคอกหงส์เมื่อทดสอบด้วย Mixed solution

ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า K กับเวลาดินลูกรังคอกหงส์เมื่อทดสอบด้วย Mixed solution ได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 4.14 การทดสอบเริ่มต้นด้วยการทดสอบดินลูกรังคอกหงส์กับน้ำกลั่น ใช้ความดันสูงสุดเท่ากับ 0.5 ksc ($i = 88.65$) แล้วจึงเปลี่ยนมาใช้สารละลาย Mixed solution โดยใช้เวลาในการทดสอบทั้งหมดประมาณ 191 วัน พบว่า ค่า K เริ่มต้นเมื่อทดสอบด้วยน้ำกลั่นมีค่าอยู่ในช่วง $4.30 - 5.0 \times 10^{-8}$ cm/s หลังจากเปลี่ยนมาทดสอบกับสารละลาย Mixed solution ในวันที่ 14 ของการทดสอบ พบว่า ค่า K เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ตลอดการทดสอบประมาณ 191 วัน โดยมีค่า K เฉลี่ยเท่ากับ 7.581×10^{-8} cm/s ซึ่งยังต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s จนจบการทดสอบ



ภาพประกอบที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของดินลูกรังคองหงส์
เมื่อทดสอบกับ Mixed solution

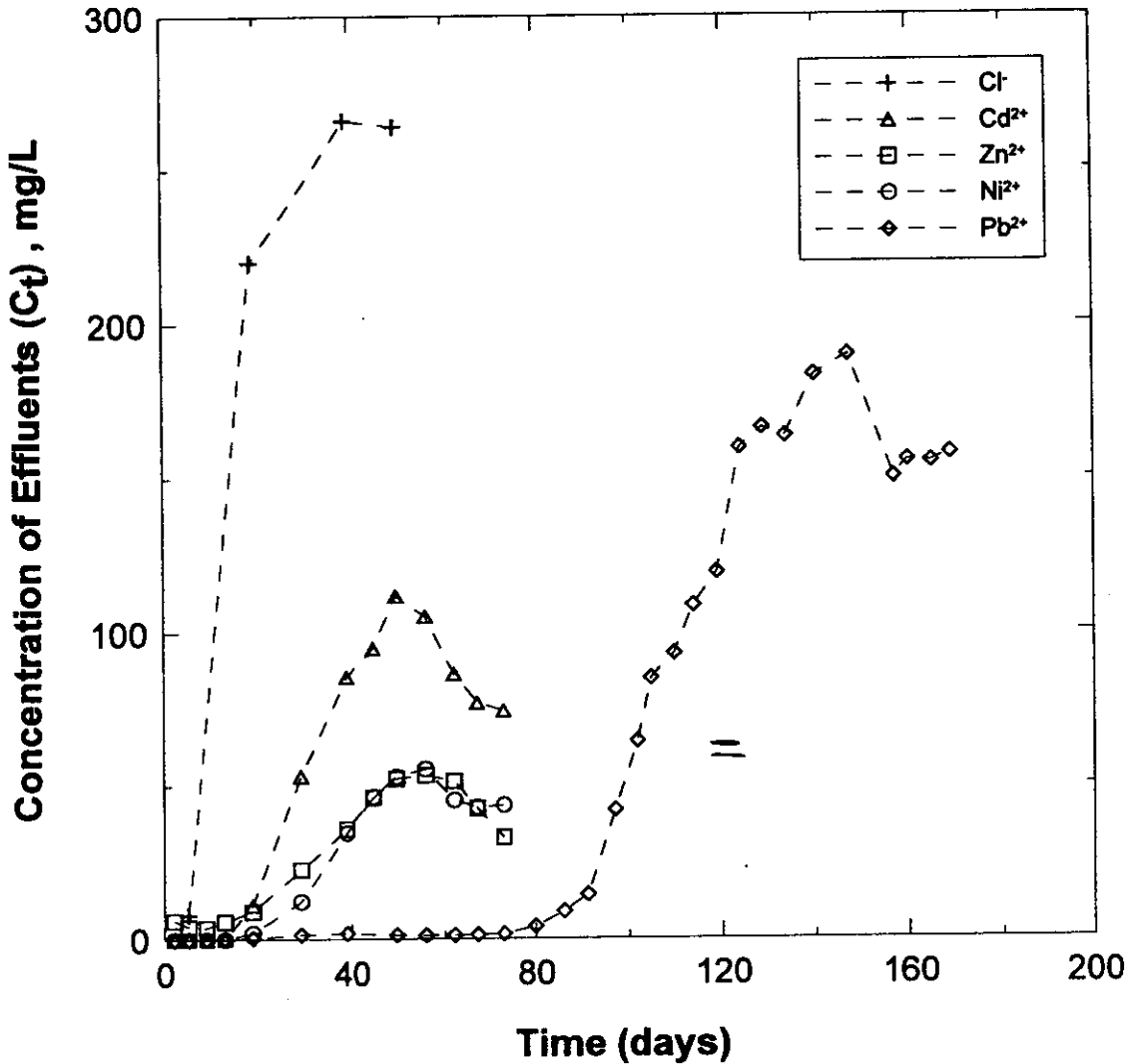
4.5.1.2 พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของดินลูกรังคอกหงส์

Breakthrough curves ของดินลูกรังคอกหงส์ที่มี Influent เป็นสารละลาย Mixed solution ที่ประกอบด้วย Cd^{2+} ($C_0 = 0.001$ M หรือ 112.42 mg/L), Pb^{2+} ($C_0 = 0.001$ M หรือ 207.26 mg/L), Zn^{2+} ($C_0 = 0.001$ M หรือ 65.39 mg/L), Ni^{2+} ($C_0 = 0.001$ M หรือ 58.87 mg/L) และ Cl^- ($C_0 = 283.33$ mg/L) ได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 4.15 จะเห็นได้ว่า Cl^- ซึ่งเป็นสารประเภท Non - Reactive ($R = 1$) จะมี Breakthrough ก่อน ตามด้วย Zn^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} และ Pb^{2+} ตามลำดับ ซึ่งสารละลายโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดนี้ มีประจุเป็นบวก (Reactive) จะมีค่า $R > 1$ ดังนั้นจึง Breakthrough ออกมาหลัง Cl^-

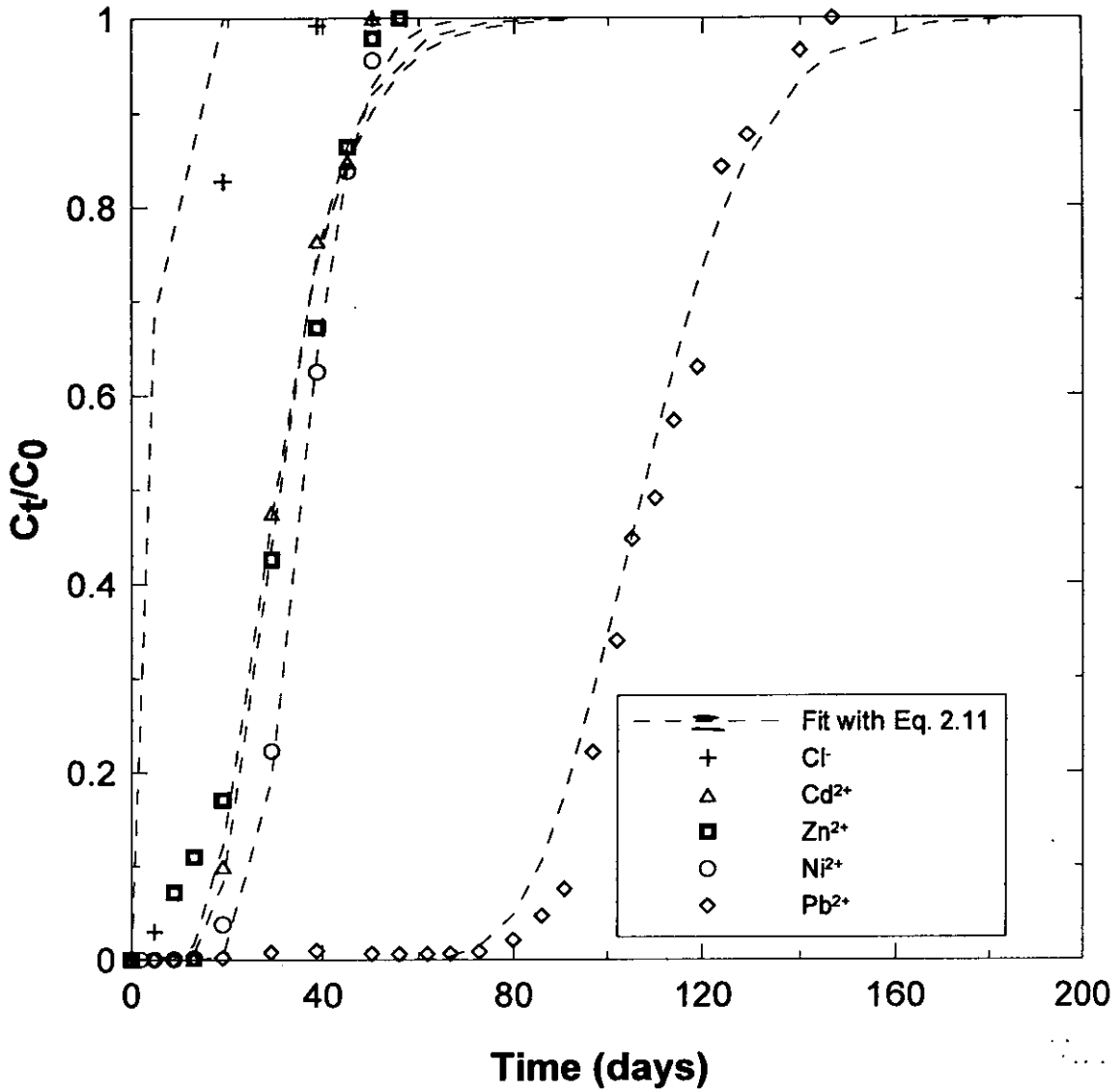
พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ (D และ R) ของดินลูกรังคอกหงส์ ถูกหาจากการพิตสมการที่ 2.11 กับผลการทดสอบในรูปของอัตราส่วนความเข้มข้นของ Effluent ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) เทียบกับเวลา ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.16 โดยการ Trial and error ค่า D และ R ไปจนกว่าค่า C/C_0 ที่ได้จากสมการที่ 2.11 สอดคล้องกับค่า C/C_0 จากผลการทดสอบ ความสอดคล้องดังกล่าวแสดงไว้ในรูปของค่า MSE ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ D และ R ที่ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ค่า R ที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 สอดคล้องกับ Breakthrough curves ในภาพประกอบ 4.15 กล่าวคือ Cl^- ซึ่ง Breakthrough ออกมาก่อน มีค่าน้อยที่สุด ($R = 1$) สำหรับสารละลายโลหะหนักที่ Breakthrough ออกมาทีหลัง ก็มีค่า R เพิ่มขึ้น Zn^{2+} ($R = 6.55$), Cd^{2+} ($R = 7.00$), Ni^{2+} ($R = 7.60$) และ Pb^{2+} ($R = 36.00$) ตามลำดับ

ค่า D ของสารละลายโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 2.00×10^{-6} - 6.00×10^{-6} cm^2/s สำหรับการทดสอบกับดินลูกรังคอกหงส์ ส่วนดินชนิดอื่นๆ ค่า D ก็อาจจะเปลี่ยนแปลงไปได้ เช่น ค่า D ของดินเหนียวกรุงเทพฯ เท่ากับ 5.00×10^{-6} cm^2/s (Amatya and Takemura, 2002), ค่า D ของ Kirby Lake Till เท่ากับ 4.5×10^{-5} cm^2/s (Kim et al., 1997), ค่า D ของดินเหนียวลัฟกิน (Lufkin clay) เท่ากับ 1.7×10^{-6} - 4.7×10^{-6} cm^2/s (Shackelford, 1990) และ ค่า D ของ Illite clay เท่ากับ 3.08×10^{-7} - 103×10^{-7} cm^2/s (Tanchuling et al., 2003)



ภาพประกอบที่ 4.15 ความเข้มข้นของสุดท้ายของ Effluents จากดินลูกรังคองหงส์
เมื่อทดสอบด้วย Mixed solution



ภาพประกอบที่ 4.16 ผลการฟิตระหว่าง Breakthrough curve จากการหา C_t/C_0 จากการทดสอบ และการคำนวณของดินลูกรังคองหงส์เมื่อทดสอบด้วย Mixed solution

ตารางที่ 4.7 ผลค่า D, R และ n จาก Breakthrough curve (C/C_0) ของดินลูกรังคอกหงส์เมื่อทดสอบด้วย Mixed solution

โลหะหนัก	D (cm ² /s)	R	n	MSE
Cl ⁻	1.00×10^{-5}	1.00	0.34	0.113814
Zn ²⁺	6.64×10^{-6}	6.55	0.34	0.003962
Cd ²⁺	5.01×10^{-6}	7.00	0.34	0.001423
Ni ²⁺	2.16×10^{-6}	7.60	0.34	0.000392
Pb ²⁺	1.94×10^{-5}	36.00	0.34	0.001712

4.5.2 ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Concentration Profile

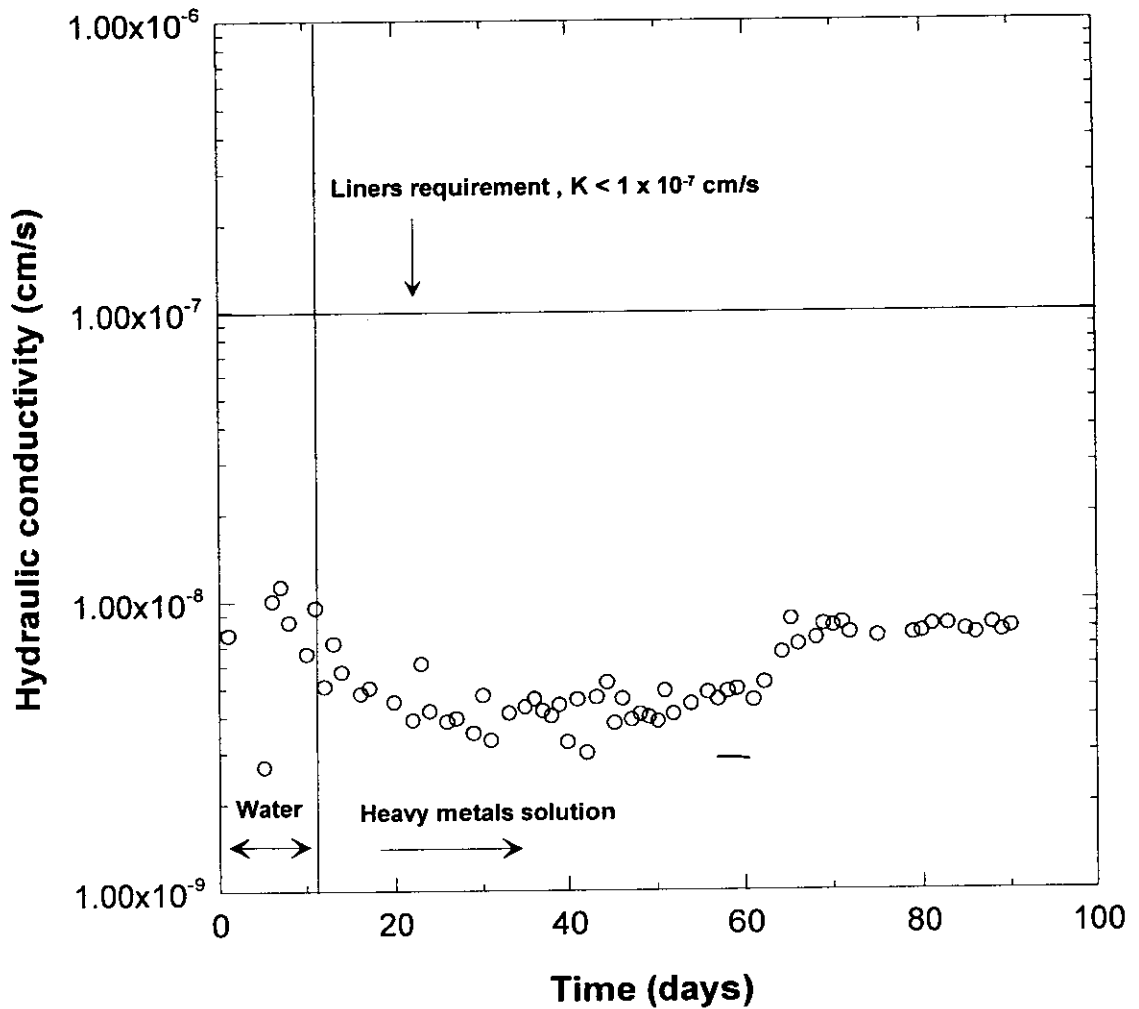
ผลการทดสอบแบบสดมภ์ในวิธีนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ 1) ค่า K ของดินเทียบกับเวลา เมื่อมีสารละลายโลหะหนักไหลผ่าน และ 2) ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ที่คำนวณได้จาก Concentration profile ของโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวโดยดินที่ระดับความลึกแตกต่างกัน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.5.2.1 ค่า K ของดินตัวอย่าง

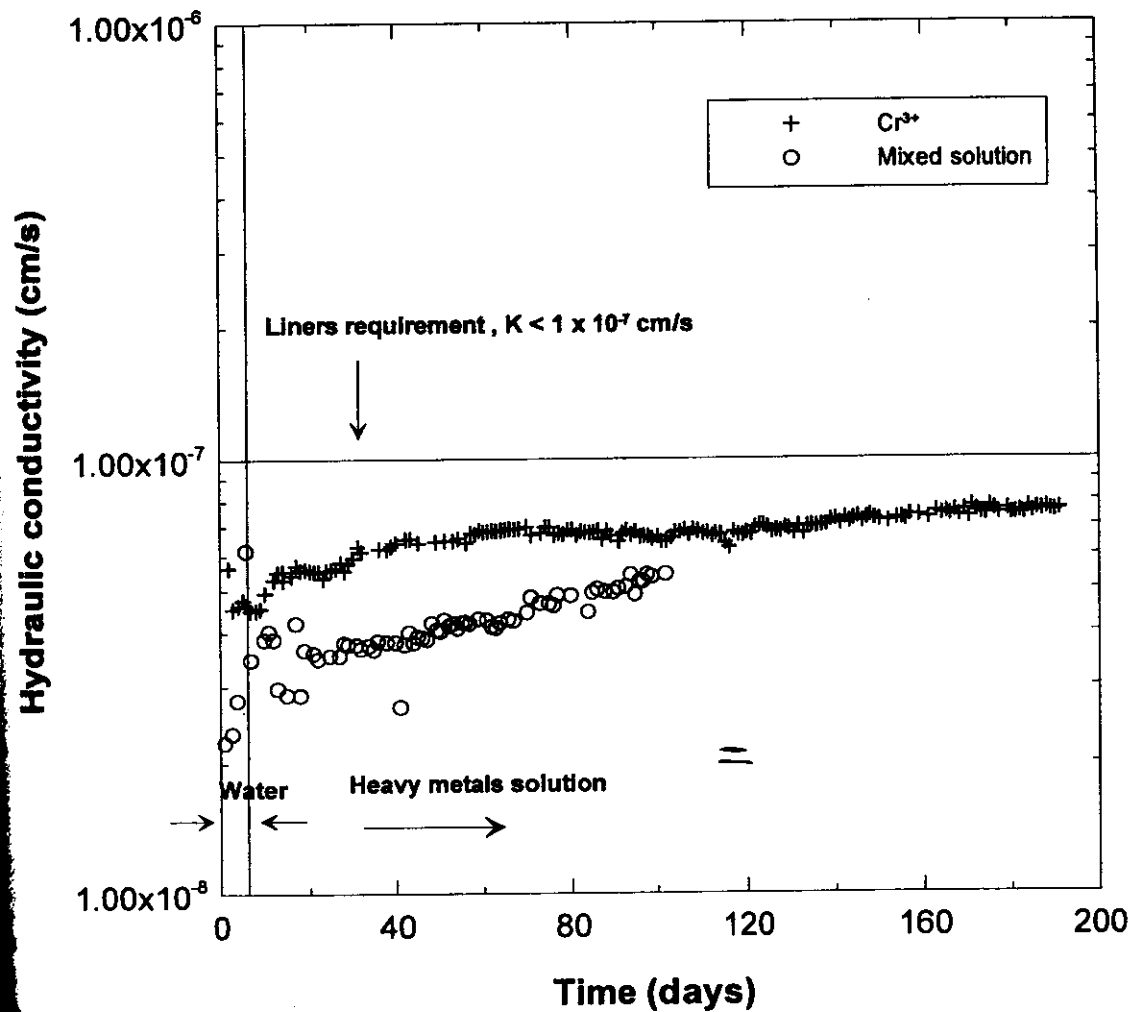
ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5 % เมื่อทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Mixed solution ได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 4.17 โดยเมื่อเริ่มต้นการทดสอบ ค่า K เฉลี่ยของทรายผสมเบนโทไนต์เมื่อทดสอบกับน้ำกลั่น มีค่าประมาณ 7.00×10^{-9} cm/s และหลังจากเปลี่ยนมาทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Mixed solution ในวันที่ 12 ของการทดสอบ พบว่า K มีค่าอยู่ในช่วง 5.00×10^{-9} - 9.00×10^{-9} cm/s จนถึงวันที่ 65 ของการทดสอบ โดยหลังจากวันที่ 65 พบว่า Effluent ในภาชนะเก็บน้ำ มีสีขุ่น โดยพบว่ามีเบนโทไนต์รั่วจากทรายผสมเบนโทไนต์ ผ่านวัสดุกรองหรือผ่านรอยต่อระหว่างดินตัวอย่างกับวัสดุกันซึมในระบบในส่วนที่ไม่สมบูรณ์ไหลออกมา หลังจากนั้นอีก 2 - 3 วัน พบว่า Effluent มีลักษณะใสเหมือนเดิม ผลการรั่วของเบนโทไนต์นี้ แสดงให้เห็นว่า ทรายผสมเบนโทไนต์ มีคุณสมบัติที่เรียกว่า “Self - healing” ทำให้เมื่อทรายผสมตัวอย่างรั่วแล้วสามารถปรับปรุงตัวเองให้มีค่า K คงที่อีกครั้งหนึ่ง โดยสามารถอธิบายในทางกายภาพได้ว่า มีเบนโทไนต์บางส่วนไปอุดรูรั่วของเบนโทไนต์ที่ไหลไปกับ Effluent จึงทำให้ค่า K กลับมาคงที่อีกครั้งหนึ่ง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับเวลา ของดินลูกรังคองหงส์ เมื่อทดสอบด้วยสารละลาย Cr^{3+} เข้มข้น 0.001 M กับสารละลาย Mixed solution ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 4.18 โดยเมื่อเริ่มดำเนินการทดสอบ ค่า K เฉลี่ยของดินลูกรังคองหงส์ เมื่อทดสอบกับน้ำกลั่น มีค่าอยู่ในช่วง $4.00 \times 10^{-8} - 5.00 \times 10^{-8}$ cm/s และหลังจากเปลี่ยนมาทดสอบด้วยสารละลาย Cr^{3+} เข้มข้น 0.001 M ในวันที่ 15 ของการทดสอบ พบว่า K มีค่าแปรเปลี่ยนเล็กน้อยตลอดการทดสอบ โดยค่า K มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 116 ของการทดสอบ พบว่า K มีค่าอยู่ที่ประมาณ 7.00×10^{-8} cm/s จนกระทั่งจบการทดสอบประมาณ 450 วัน สำหรับการเปลี่ยนมาทดสอบด้วยสารละลาย Mixed solution ของดินลูกรังคองหงส์ (ภาพประกอบที่ 4.18) พบว่า มีค่าประมาณ 5.00×10^{-8} cm/s ตลอดระยะเวลาการทดสอบประมาณ 100 วัน

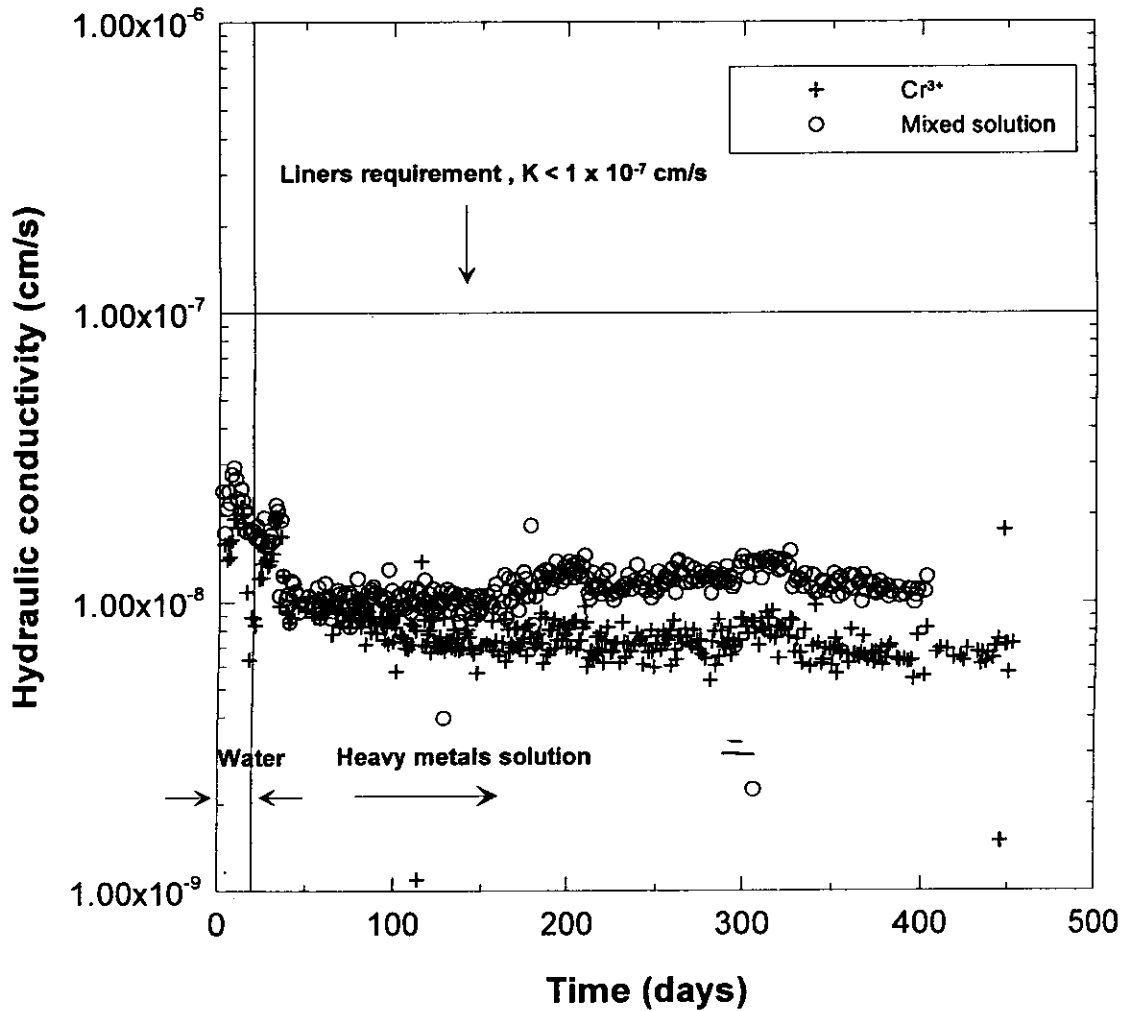
ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับเวลา ของดินเหนียวเกาะยอ เมื่อทดสอบด้วยสารละลาย Cr^{3+} เข้มข้น 0.001 M กับสารละลาย Mixed solution ได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 4.19 โดยเมื่อเริ่มดำเนินการทดสอบ ค่า K เฉลี่ยของดินเหนียวเกาะยอเมื่อทดสอบด้วยน้ำกลั่น มีค่าอยู่ในช่วง $1.50 \times 10^{-8} - 3.00 \times 10^{-8}$ cm/s และหลังจากเปลี่ยนมาทดสอบกับสารละลาย Cr^{3+} เข้มข้น 0.001 M และสารละลาย Mixed solution ในวันที่ 14 ของการทดสอบ พบว่า K ของดินเหนียวเกาะยอ เมื่อทดสอบด้วยสารละลาย Cr^{3+} เข้มข้น 0.001 M มีค่าอยู่ในช่วง $6.00 \times 10^{-9} - 8.00 \times 10^{-9}$ cm/s ตลอดการทดสอบประมาณ 450 วัน ส่วน K ของดินเหนียวเกาะยอเมื่อทดสอบด้วยสารละลาย Mixed solution มีค่าคงที่อยู่ที่ประมาณ 1×10^{-8} cm/s ตลอดการทดสอบ 400 วัน ทั้งนี้ค่า K ของดินทั้ง 3 ชนิดในทุกชุดการทดสอบมีค่าต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s ซึ่งจัดอยู่ในขอบเขตมาตรฐานของชั้นกันซึม



ภาพประกอบที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5 %



ภาพประกอบที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของดินลูกรังกองหงส์



ภาพประกอบที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของดินเหนียวเกาะขย

4.5.2.2 พารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Concentration profile

Concentration profile ในรูปของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวในดิน (C) ต่อความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิว (C_{sm}) ของโลหะหนักในทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% และดินเหนียวเกาะขย ได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ พบว่า ค่า C/C_{sm} มีค่าเท่ากับ 1.0 บริเวณดินชั้นแรก (ลึกประมาณ 0.7 cm) กล่าวคือ ดินนี้ได้ดูดสารละลายโลหะหนักมาติดผิวสูงสุด ตามความสามารถของดินแล้ว (สูงสุดตามค่า Cation exchange capacity) สำหรับดินที่ลึกลงไป ค่า C/C_{sm} จะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากดินยังดูดสารละลายโลหะหนักที่เคลื่อนที่ผ่านมาได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ กล่าวคือ ดินในความลึกดังกล่าวนี้ยังสามารถหน่วงสารละลายได้อีก สำหรับดินชั้นล่างสุด คือ ดินชั้นที่ 6 (ความลึก 5.7 cm) มี C/C_{sm} เท่ากับ 0 แสดงให้เห็นว่ายังไม่มีการดูดสารละลายโลหะหนักชนิดใด เคลื่อนที่มาถึงความลึกนี้เลย ในช่วงของการทดสอบ

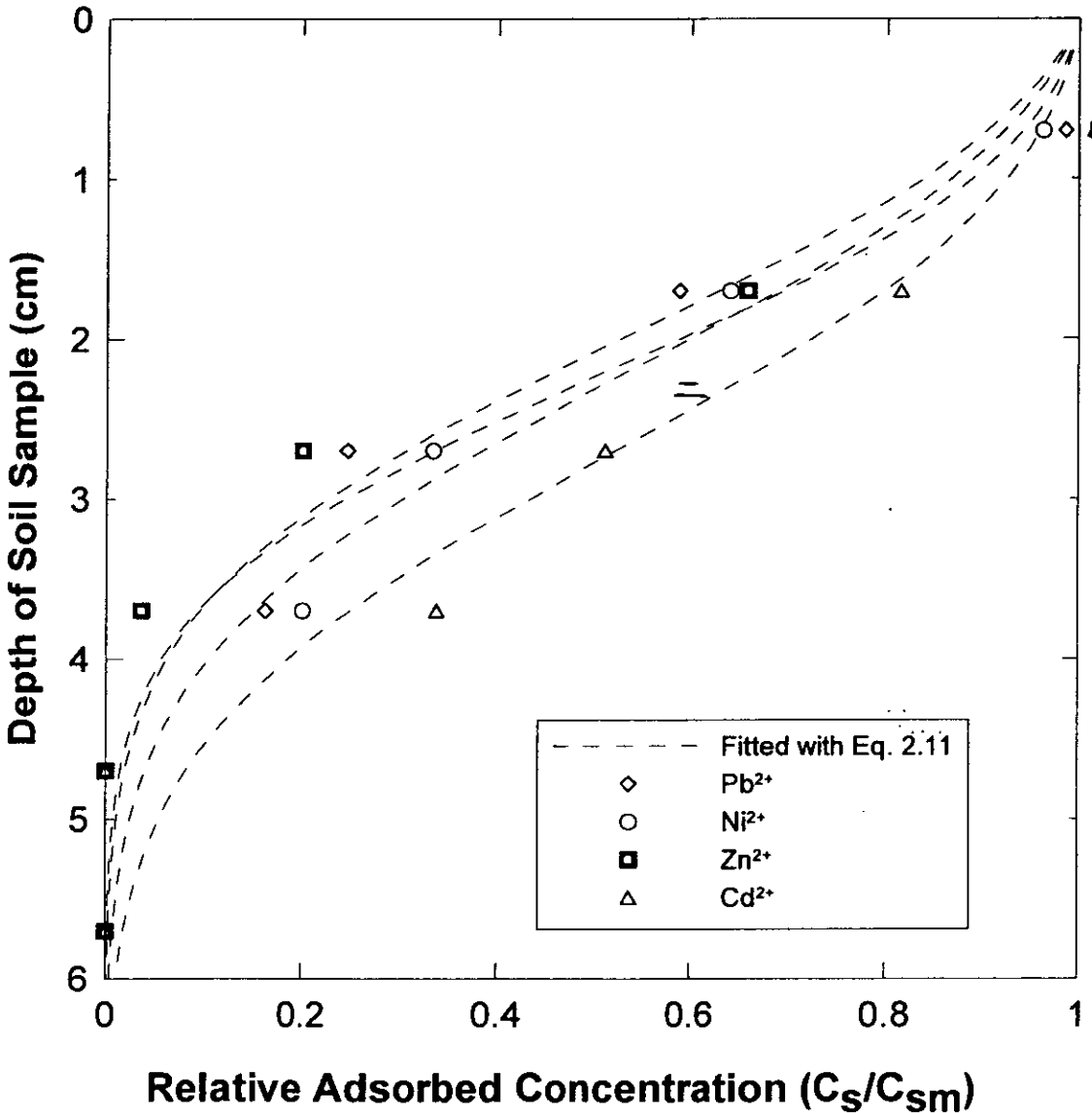
Concentration profile ในภาพประกอบที่ 4.20 และ 4.21 สามารถบอกถึงความสามารถในการหน่วงสารละลายที่เคลื่อนที่ผ่านทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวเกาะขย โดยมีหลักการว่า สำหรับที่เวลาในการเคลื่อนที่เท่ากัน สารละลายที่มี Front (C/C_{sm} สูง) ที่ระดับลึกกว่า จะถูกหน่วงโดยดินน้อยกว่า ลำดับการหน่วงสารละลายโลหะหนักของทรายผสมเบนโทไนต์จากน้อยไปมาก ได้แก่ Cd^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , และ Pb^{2+} สำหรับลำดับการหน่วงสารละลายโลหะหนักของดินเหนียวเกาะขยจากน้อยไปมาก ได้แก่ Cd^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} และ Cr^{3+}

ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนัก (R และ D) เมื่อเคลื่อนที่ผ่านทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวเกาะขย ซึ่งคำนวณโดยพืด Concentration profile ในภาพประกอบที่ 4.20 และ 4.21 กับสมการที่ 2.11 โดยวิธี Trial and error ตามรายละเอียดที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.5.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 โดย Concentration profile ได้จากการ plot โดยใช้ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ในตารางที่ 4.8 และสมการที่ 2.11 ได้แสดงไว้เป็นเส้นประควบคู่กับ Concentration profile จากผลการทดสอบในภาพประกอบที่ 4.20 และ 4.21

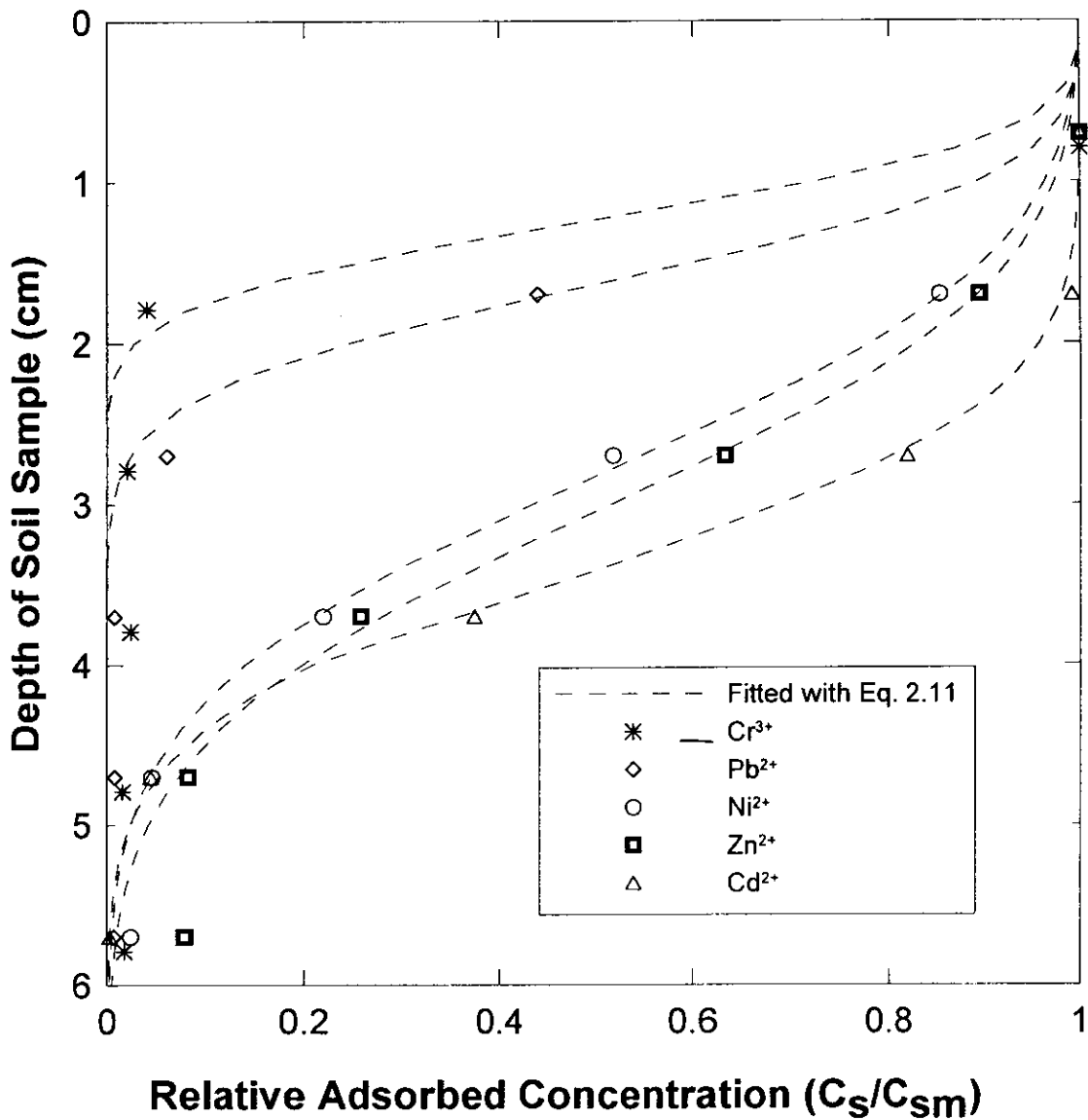
ความสามารถในการหน่วงโลหะหนักของทรายผสมเบนโทไนต์ สามารถแสดงได้ในรูปของค่า R ในตารางที่ 4.8 โดยลำดับการถูกหน่วงจากน้อย (ค่า R น้อย) ไปมาก (ค่า R มาก) ได้แก่ Cd^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , และ Pb^{2+} ตามลำดับ ส่วนของดินเหนียวเกาะขย มีลำดับการหน่วงจากน้อยไปมาก ได้แก่ Cd^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} และ Cr^{3+} ตามลำดับ ซึ่งผลของค่า R ที่ได้ ก็สอดคล้องกับ Adsorption capacity (ตารางที่ 4.4 และ 4.5) ซึ่งได้จากผลการทดสอบแบบแบทช์ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เบนโทไนต์ ดินลูกรังคองหงส์และดินเหนียวเกาะขย มี Adsorption capacity ของ Cr^{3+} มากกว่า Pb^{2+} ดินทั้ง 3 ชนิดจึงสามารถหน่วง Cr^{3+} ไว้ได้นานกว่า Pb^{2+} ลำดับการถูกหน่วงของ Cr^{3+} จึงมีมากกว่า

Pb^{2+} ดังนั้นสำหรับดินที่มีค่า Sorption capacity ของโลหะหนักที่มากกว่า จะหน่วงโลหะหนักชนิดนั้นไว้ได้นานกว่า สำหรับ Sorption capacity ของ Cd^{2+} , Zn^{2+} และ Ni^{2+} ในดินทั้ง 3 ชนิดก็จัดว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ลำดับการถูกหน่วงของโลหะหนักจึงใกล้เคียงกันด้วย

ค่า D ของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวเกาะยอ มีค่าอยู่ในช่วง 10^{-5} cm^2/s และ 10^{-7} cm^2/s ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก โดยการแพร่กระจายในระดับโมเลกุลของทรายผสมเบนโทไนต์มากกว่าในดินเหนียวเกาะยอ



ภาพประกอบที่ 4.20 Concentration profile ของสารละลายโลหะหนักในทรายผสมเบนโทไนต์ ที่ 5% ที่เวลา 80 วัน



ภาพประกอบที่ 4.21 Concentration profile ของสารละลายโลหะหนักในดินเหนียวเกาะยอที่เวลา 440 วันสำหรับทดสอบ Cr^{3+} และ 388 วันสำหรับทดสอบ Cd^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} และ Zn^{2+}

ตารางที่ 4.8 ผลค่า D, R และ n จาก Concentration profile (C_L/C_0) ของดินทั้ง 3 ชนิด

a) ทรายผสมเบนโทไนด์ที่ 5 %				
โลหะหนัก	D (cm ² /s)	R	n	MSE
Pb ²⁺	1.72 x 10 ⁻⁵	130.00	0.26	0.0031274
Ni ²⁺	1.77 x 10 ⁻⁵	115.09	0.26	0.0022115
Zn ²⁺	1.12 x 10 ⁻⁵	111.31	0.26	0.0015020
Cd ²⁺	1.40 x 10 ⁻⁵	89.93	0.26	0.0026762
b) ดินเหนียวเกาะยอ				
โลหะหนัก	D (cm ² /s)	R	n	MSE
Cr ³⁺	1.80 x 10 ⁻⁷	81.00	0.38	0.0031936
Pb ²⁺	3.50 x 10 ⁻⁷	79.10	0.42	0.0004673
Ni ²⁺	9.14 x 10 ⁻⁷	47.10	0.42	0.0002715
Zn ²⁺	8.90 x 10 ⁻⁷	43.36	0.42	0.0009201
Cd ²⁺	4.00 x 10 ⁻⁷	37.00	0.42	0.0000578