

บทที่ 3

ผลการทดลองและบทวิจารณ์



1. สมบัติเชิงฟิสิกส์และเคมีของดิน

เก็บตัวอย่างดินปนเปื้อนโลหะหนักจากอู่ซ่อมเรือ ป้อมพระจุลจอมเกล้า กองทัพเรือ จังหวัดสมุทรปราการ ที่ระดับความลึก 0-15 cm น้ำหนักรวม 10 กิโลกรัม นำมาผึ่งลมให้แห้ง ผสมและบดให้มีขนาด เล็กกว่า 2 mm ย่อยด้วยกรดและ วิเคราะห์หาปริมาณโลหะ Cd Cu Cr Pb Ni และ Zn โดยเทคนิค AAS และ ICP-AES ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 3-1 ปริมาณโลหะที่พบในดิน

โลหะ	ค่าเฉลี่ย g/kg (n=6)	s.d.	พิสัย, g/kg
Cd	4.45	6.58	1.3-17.9
Cu	27.72	3.21	24.8-32.0
Cr	42.32	5.29	36.7-48.8
Ni	33.70	7.38	28.6-44.4
Pb	48.61	8.24	40.4-59.6
Zn	82.75	6.45	76.4-91.3

ตารางที่ 3-2 สมบัติเชิงฟิสิกส์และเคมีของดิน

สมบัติ	ค่า	สมบัติ	ค่า
Soil Water content (%)	6.8	CEC (me/100g)	10.1
Soil texture	clay loam	Bulk density (g cm^{-3})	0.95
pH	7.34	Particle density (g cm^{-3})	1.1
Lime potential	6.2	Total organics C (g kg^{-1})	2.1
Organic Carbon (%)	1.5	Loss on ignition (%)	
Organic matter (%)	3.7	LOI-1 at 480°C	63.4
Humic acid (%)	0.38	LOI-2 at $1,100^\circ\text{C}$	18.8

2. การแยกกรดฮิวมิกและการหาลักษณะเฉพาะ

ทำการแยกกรดฮิวมิกจากดินโดยการสกัดและทำให้บริสุทธิ์ตามวิธีมาตรฐานของ IHSS พบว่าดินตัวอย่าง มีกรดฮิวมิก 0.38 % w/w และศึกษาคุณลักษณะ ได้ผลดังตารางที่ 3-3



ตารางที่ 3-3 ลักษณะของกรดฮิวมิกที่สกัดได้จากดินตัวอย่าง

ปริมาณ C	41.8 %	สภาพกรดรวม	7.7 me/g
ปริมาณ H	4.03 %	สภาพกรดคาร์บอกซิล	1.1 me/g
ปริมาณ N	0.48 %	สภาพกรดไฮดรอกซี	6.6 me/g
% ash content	21.1 %		
FTIR spectra	3397 cm ⁻¹ (OH) 2913 cm ⁻¹ (aliphatic CH) 1680 cm ⁻¹ (C=C, C=O) 1060 cm ⁻¹ (C-O)		
Absorption ratio (465 และ 665 nm by UV-Vis)	0.85 (pH 4) และ 0.96 (pH 11)		

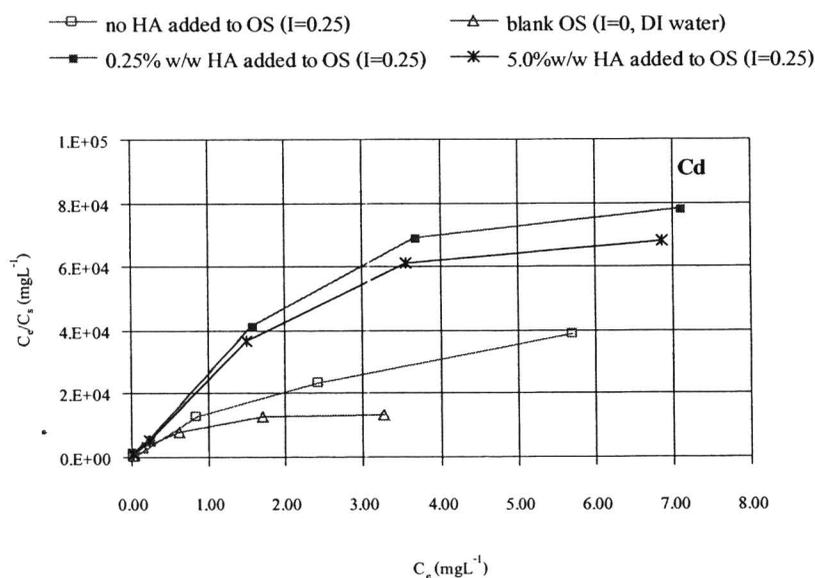
3. การศึกษา adsorption isotherm

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ (adsorption isotherm) ทำการทดลองที่ L/S เท่ากับ 3 นาน 24 ชั่วโมง Langmuir adsorption isotherm ตามสมการที่ 3-1

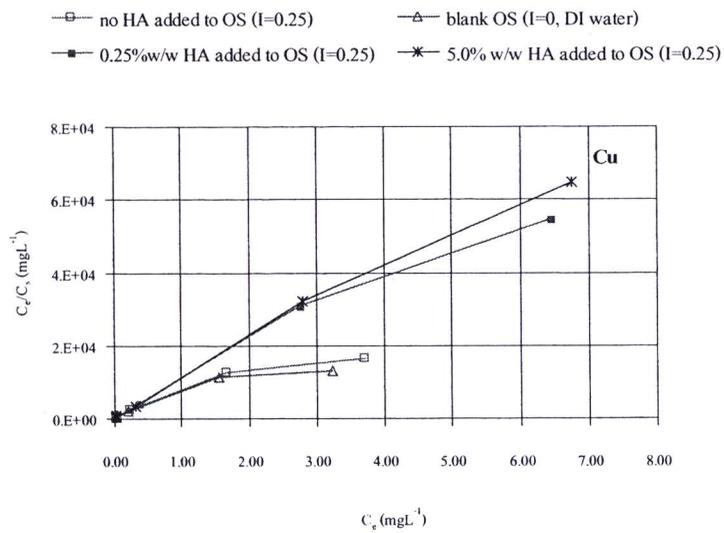
$$\frac{C_e}{C_s} = \frac{C_e}{C_0} + \frac{I}{bC_0} \quad (3-1)$$

- เมื่อ C_e คือความเข้มข้นของโลหะที่สมดุล (mg/L)
 C_s คือปริมาณโลหะที่ดูดซับบนของแข็ง (mg/mg)
 C_0 คือปริมาณโลหะสูงสุดที่ดูดซับได้บนของแข็ง (mg/g)
 b ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

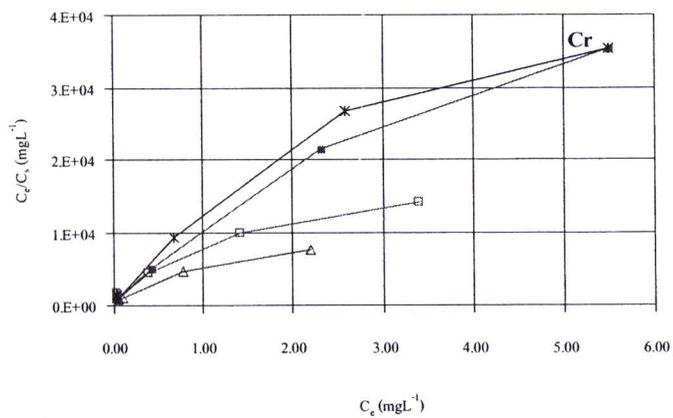
เมื่อพลอตกราฟระหว่าง C_e/C_s กับ C_e ของโลหะแต่ละชนิดได้ดังรูปที่ 3-1 (a-f)



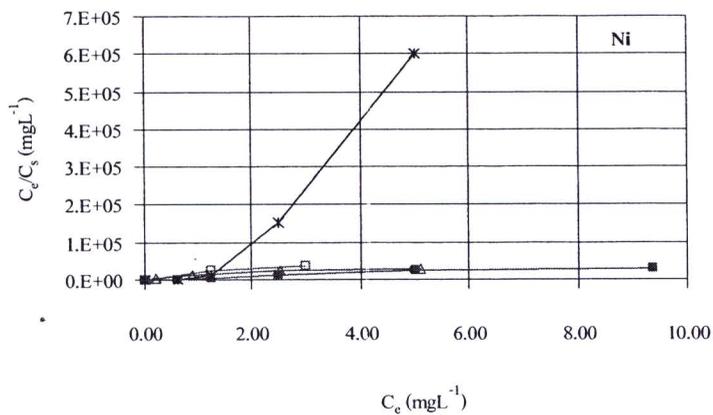
รูปที่ 3-1 (a) Langmuir isotherm of adsorption of Cd onto soil samples at 25 °C



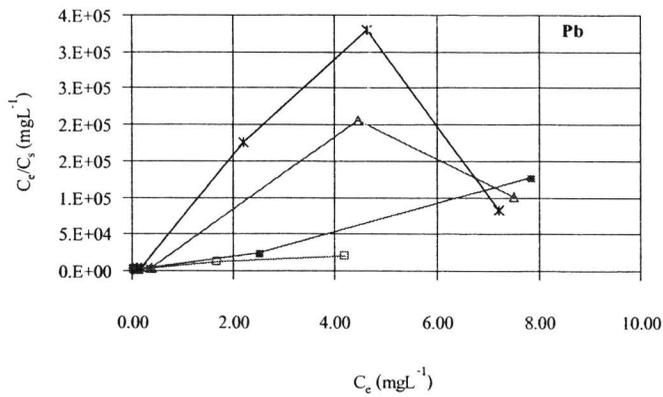
รูปที่ 3-1 (b) Langmuir isotherm of adsorption of Cu onto soil samples at 25 °C



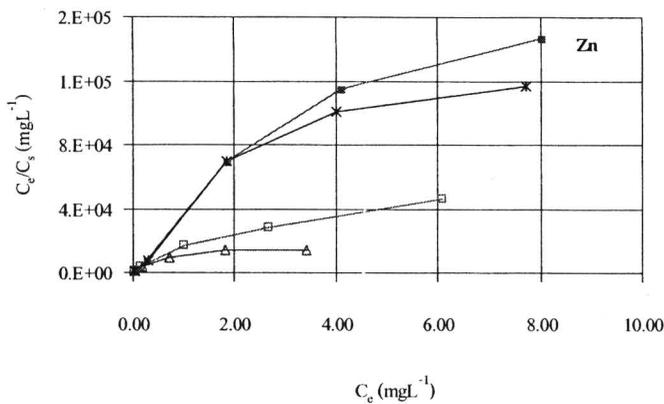
รูปที่ 3-1 (c) Langmuir isotherm of adsorption of Cr onto soil samples at 25 °C



รูปที่ 3-1 (d) Langmuir isotherm of adsorption of Ni onto soil samples at 25 °C

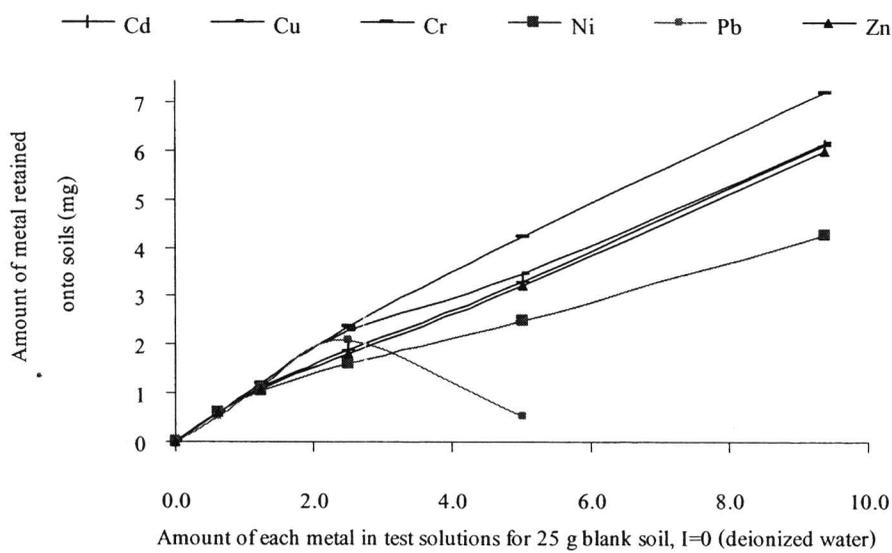


รูปที่ 3-1 (e) Langmuir isotherm of adsorption of Pb onto soil samples at 25 °C

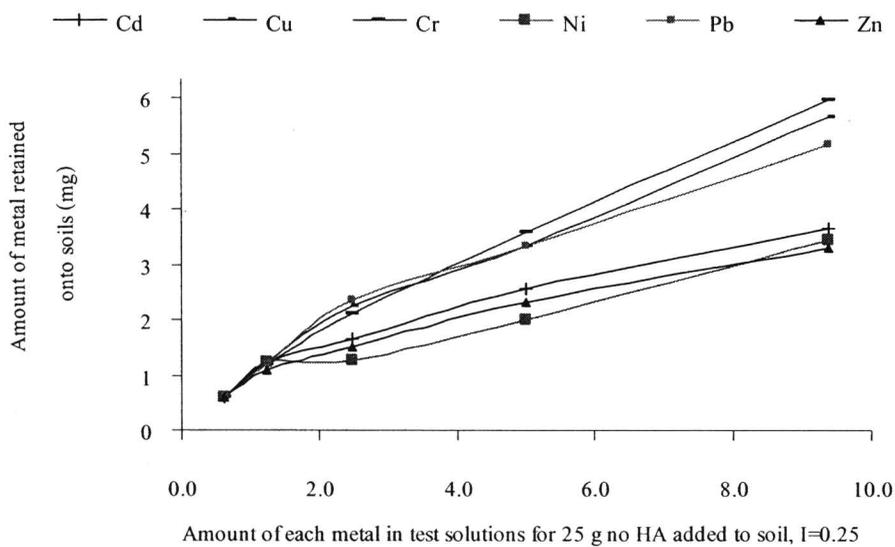


รูปที่ 3-1 (f) Langmuir isotherm of adsorption of Zn onto soil samples at 25 °C

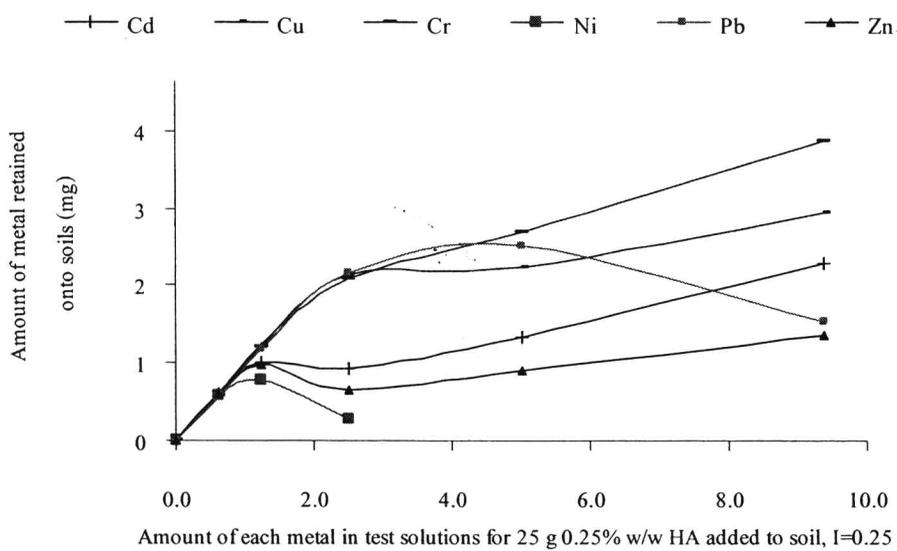
เมื่อพลอตกราฟระหว่างปริมาณโลหะที่ดูดซับ (mg) บนดิน 25 g ได้ดังรูปที่ 3-2



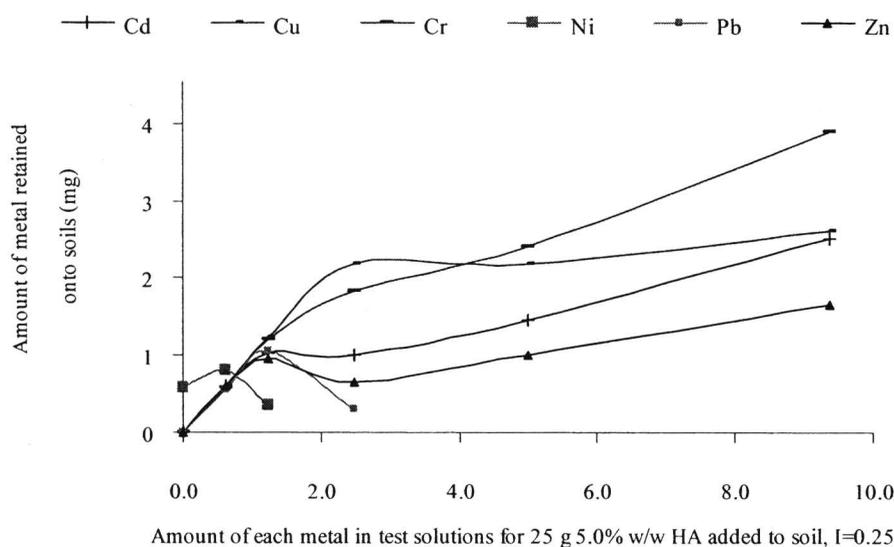
รูปที่ 3-2 (a) ปริมาณโลหะที่ดูดซับ (mg) บนดิน OS 25 g สารละลายตัวกลางคือน้ำ DI



รูปที่ 3-2 (b) ปริมาณโลหะที่ดูดซับ (mg) บนดิน OS 25 g สารละลายตัวกลางคือ KNO_3



รูปที่ 3-2 (c) ปริมาณโลหะที่ดูดซับ (mg) บนดิน HS (0.25 %w/w) 25 g สารละลายตัวกลางคือ KNO_3



รูปที่ 3-2 (d) ปริมาณโลหะที่ดูดซับ (mg) บนดิน HS (5 %w/w) 25 g สารละลายตัวกลางคือ KNO_3

การดูดซับของ Cd Cu Cr และ Zn เป็นแบบแลงเมียร์ที่ความเข้มข้นของโลหะต่ำ ซึ่งเป็นการดูดซับเชิงกายภาพแบบชั้นเดียว (monolayer) [22] ส่วนการดูดซับของ Ni และ Pb แตกต่างออกไป พบว่าการดูดซับเกิดได้สูงสุดเมื่อความเข้มข้นของโลหะเท่ากับ 66.67 mg/L (5 mg Ni และ Pb per 25g soil) สำหรับ 0.25 และ 5.0 % w/w HS- KNO_3

พิจารณาการดูดซับของตะกั่ว จากรูป 3-1 (e) และรูป 3-2 พบว่า การดูดซับของตะกั่วบน OS- KNO_3 เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายเพิ่มขึ้น ปริมาณสูงสุดที่ตะกั่วดูดซับได้เท่ากับ 2.1 2.5 และ 1.1 mg สำหรับดิน OS, 0.25 และ 5.0 % w/w HS- KNO_3 (25 g) ตามลำดับ เมื่อความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายสูงขึ้นทำให้การดูดซับตะกั่วลดลง อาจเป็นผลมาจากที่ความเข้มข้นสูง ตะกั่วเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับกรดฮิวมิกและมีการละลายที่สูงขึ้น จึงดูดซับได้น้อยลง

เมื่อพิจารณาสมการของฟรอนด์ลิช (Freundlich equation) ดังสมการที่ 3-2

$$C_s = x/m = K_f C_e^{1/n} \quad (3-2)$$

เมื่อ C_e คือความเข้มข้นของโลหะที่สมดุล (mg/L)

C_s คือปริมาณโลหะที่ดูดซับบนของแข็ง (mg/mg)

K_f ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช

ถ้า $n = 1$, K_f สามารถแทนได้ด้วย K_d จะได้ว่า

$$K_d = C_s/C_e \quad (3-3)$$

การประมาณค่า *distribution coefficient* K_d (L mg^{-1}) อยู่บนสมมติฐานที่ว่าความเข้มข้นของโลหะต่ำ และสมดุลการดูดซับเกิดได้ในเวลา 24 ชั่วโมง

จากสมการของฟรอนด์ลิช สามารถหาค่า K_d ได้ดังตาราง 3-4 ค่า K_d ของ Cd และ Cu ในดิน OS- KNO_3 ลดลง

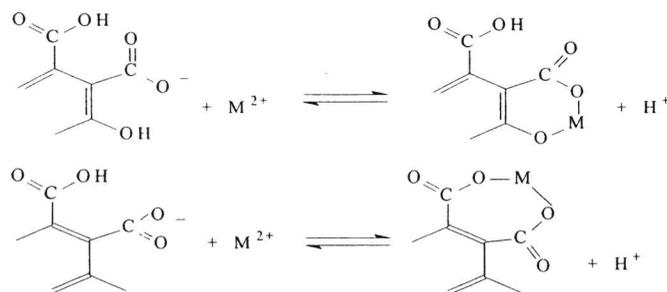
อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับดิน 0.25 และ 5.0 % w/w HS- KNO_3 ในขณะที่ค่า K_d ของ Cr Ni Pb และ Zn ไม่แตกต่างกันในดินแต่ละชนิด

ตาราง 3-4 soil distribution coefficient, K_d under various soil sorbents

Sorbents	K_d ($\times 10^{-3}$ L mg^{-1})					
	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	Zn
OS-deionized water	9	9	6	6	13	13
OS-KNO ₃	20	20	6	7	9	9
0.25% w/w HS-KNO ₃	7	7	7	6	11	11
5.0 % w/w HS-KNO ₃	8	8	6	7	8	8

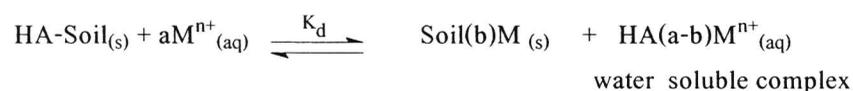
ปริมาณโลหะที่ดูดซับบนดินน้อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และมีแนวโน้มคงที่เมื่อความเข้มข้นของโลหะในสารละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากดินเริ่มอิ่มตัวด้วยโลหะ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า CEC ที่ pH ที่ศึกษา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดสมดุลการดูดซับขึ้นในระบบ

ความสัมพันธ์ของกรดฮิวมิกและสารอินทรีย์ในดินในสารละลายตัวกลาง KNO₃ 0.25 mol/L กับความสามารถในการดูดซับ สำหรับดิน OS และ OS-KNO₃ มีความสามารถในการดูดซับโลหะสูงกว่า HS เนื่องจากการเกิดฮิวมิกเกิดสารเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะที่ละลายน้ำได้ดังรูป 3-3



รูปที่ 3-3 Postulated reactions between M^{2+} และ humic acid function groups influencing a water-soluble complexation [44]

เมื่อดินมีกรดฮิวมิกมากขึ้น ค่า K_d ของดินกับโลหะส่วนใหญ่ลดลง เพราะเกิดสารเชิงซ้อนที่ละลายน้ำ ดังรูปที่ 3-4



เมื่อ mole of metal ions ($a > b$), M^{n+} : metal ion with n charge

รูปที่ 3-4 สมดุลการดูดซับและการละลายของสารเชิงซ้อนโลหะ-กรดฮิวมิก

4. การปรับเสถียร

ศึกษาอัตราส่วนผสมก่อนของแข็งซีเมนต์-ดินปนเปื้อน เลือกอัตราส่วนที่ให้ค่าการรับแรงอัดสูงที่สุด ทำการหล่อของแข็งปรับเสถียร 4 ชุด คือ ดินปนเปื้อน ดินปนเปื้อนที่เติมโลหะหนัก ดินปนเปื้อนที่เติมสารชีวมีคองอิง และดินปนเปื้อนที่เติมสารชีวมีคองอิงและโลหะหนัก

ทำการศึกษาอัตราส่วนของแข็งซีเมนต์-ดินปนเปื้อนทั้งหมด 5 อัตราส่วนดังตารางที่ 4 โดยอัตราส่วนซีเมนต์ต่อดิน (C/S) เป็น 1:1 1:1.5 1:2 1:3 1:4 และ 1:5 ทำการหล่อของแข็งปรับเสถียรในแบบขนาด 53-mm x 60-mm x 46-mm ทิ้งให้แข็งตัวเป็นเวลา 28 วัน แล้วถอดออกจากแบบ นำก้อนของแข็งมาวัดค่าการรับแรงอัด ได้ผลดังตารางที่ 3-5

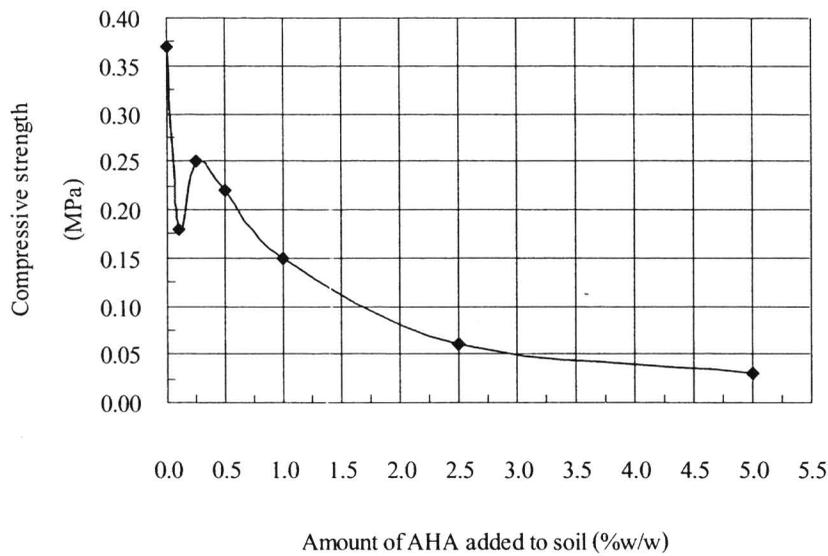
ตารางที่ 3-5 ค่าการรับแรงอัด (compressive strength) ของของแข็งปรับเสถียร

Batch number	Water (% w/w)	Cement to soil (C/S) ratio	Weight of concrete (g)	Compressive strength, (MPa)
1	40	1/1	228.9	1.16
2	44	1/1.5	219.4	1.03
3	47	1/2	195.5	0.59
4	55	1/3	193.8	0.19
5	55	1/4	189.5	0.19

จากตารางที่ 3-5 พบว่าก้อนของแข็งที่ 1 และ 2 ให้ค่าการรับแรงอัดมากกว่า 1 MPa ซึ่งเป็นค่าที่สูงพอที่ก้อนของแข็งสามารถนำไปฝังกลบ หรือทำใช้ในทางวิศวกรรมโยธาได้ แต่ของแข็งปรับเสถียรชุดที่ 2 มีอัตราส่วน C/S สูงกว่า จึงเลือกอัตราส่วนนี้ในการเตรียมของแข็งปรับเสถียรชุดอื่นๆ สำหรับการทดลองต่อไป

ศึกษาผลของปริมาณกรดฮิวมิกต่อการรับแรงอัดของก้อนของแข็ง ทำการหล่อก้อนของแข็งโดยการเติมกรดฮิวมิกที่อัตราส่วน (%w/w) ต่างๆ ตั้งแต่ 0.1 – 5.0 % ทำการหล่อของแข็งปรับเสถียรในแบบขนาด 53-mm x 60-mm x 46-mm ทิ้งให้แข็งตัวเป็นเวลา 28 วัน แล้วถอดออกจากแบบ นำก้อนของแข็งมาวัดค่าการรับแรงอัด ได้ผลดังรูปที่ 3-5

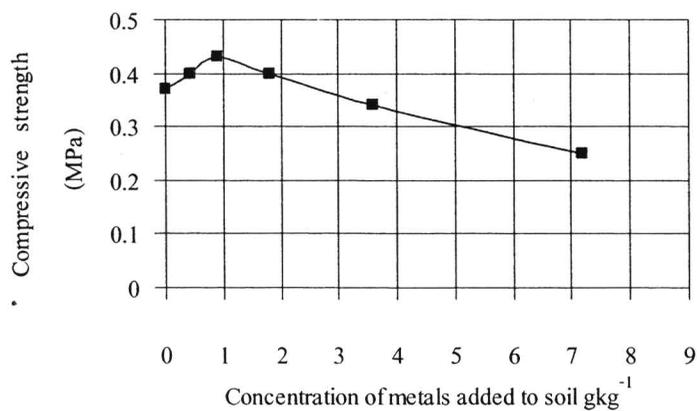




รูปที่ 3-5 ค่าการรับแรงอัดของของแข็งปรับเสถียร ที่อัตราส่วนต่างๆ ของกรดฮิวมิกที่เติม

จากรูปที่ 3-5 พบว่าการเติมกรดฮิวมิกมีผลทำให้ค่าการรับแรงอัดของของแข็งปรับเสถียรลดลง ปริมาณกรดฮิวมิกที่เติมยิ่งมาก ทำให้การรับแรงอัดน้อยลง

ศึกษาผลของปริมาณโลหะต่อการรับแรงอัดของก้อนของแข็ง ทำการหล่อก้อนของแข็งโดยการเติมสารละลายโลหะ Cd Cu Cr Pb Ni และ Zn (ละลายจากเกลือไนเตรต) โดยปริมาณโลหะแต่ละชนิดเท่ากันและปริมาณรวมที่เติมลงไป ตั้งแต่ 0 - 7 g/kg ทำการหล่อของแข็งปรับเสถียรในแบบ ทิ้งให้แข็งตัวเป็นเวลา 28 วัน แล้วถอดออกจากแบบ นำก้อนของแข็งมาวัดค่าการรับแรงอัด ได้ผลดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 ค่าการรับแรงอัด (Compressive strength) ของของแข็งปรับเสถียร ที่ปริมาณโลหะต่างๆ ที่เติม

จากรูปที่ 3-6 พบว่าการเติมโลหะทั้ง 6 ชนิด ทำให้การรับแรงอัดเพิ่มขึ้นจะกระทั่งที่ปริมาณโลหะเท่ากับ 1.0-2.0 g/kg ให้ค่าการรับแรงอัดสูงสุดและลดลงตามลำดับเมื่อปริมาณโลหะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเปรียบเทียบกับของแข็งปรับเสถียรที่ไม่มีการเติมโลหะ พบว่า การเติมโลหะมีผลทำให้การรับแรงอัดลดลงอย่างมาก

ทำการหล่อของแข็งปรับเสถียร 4 ชุด คือ ดินปนเปื้อน (S-OS) ดินปนเปื้อนที่เติมโลหะหนัก (S-MS) ดินปนเปื้อนที่เติมสารอิฐอิฐ (S-HS) และดินปนเปื้อนที่เติมโลหะหนักและกรวดอิฐอิฐ (S-HMS) ด้วยอัตราส่วนผสมของแข็งปรับเสถียรดังนี้ ซีเมนต์ 31 % ดิน 41 % และน้ำ 28% และตารางที่ 3-6 นำของแข็งปรับเสถียรแต่ละชนิดไปหาปริมาณโลหะทั้งหมดด้วยการละลายและตรวจวัดด้วยด้วยเทคนิค AAS และ ICP-AES ได้ผลดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-6 อัตราส่วนผสมของแข็งปรับเสถียร

ชนิด	โลหะ (g/kg)	กรวดอิฐอิฐ (%w/w)
S-OS	-	-
S-MS	1.5	-
S-HS	-	5
S-HMS	1.5	5

ตารางที่ 3-7 ปริมาณโลหะทั้งหมดในของแข็งปรับเสถียรชนิดต่างๆ

Element	Total content (mg/kg), n=3			
	S-OS	S-MS	S-MHS	S-HS
Na	2,053	9,540	5,483	-
Ca	545,094	513,912	389,428	531,214
Cd	69	2363	2127	73
Cr	248	2226	2115	255
Cu	104	1694	1489	99
Ni	108	4716	925	100
Pb	132	1914	2208	125
Zn	105	1761	1044	100

5. การทดสอบการละลาย

5.1 หาปริมาณของโลหะหนักใน pore water ของก้อนของแข็ง

นำของแข็งปรับเสถียรตัวอย่าง (S-HS และ S-OS) ที่บดให้มีขนาดเล็กกว่า 1 mm มาแช่ในน้ำที่ปราศจากไอออน โดยกำหนดค่าอัตราส่วนของของเหลวต่อของแข็งเท่ากับ 0.5 1 5 10 50 และ 100 mL/g นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้จนเกิดสมดุลการละลายเป็นเวลา 7 วัน กรองสารละลายที่ได้ด้วยกระดาษกรอง

เบอร์ 2 แล้วแบ่งสารละลายที่ได้ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งนำไปหาค่า pH และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ ไนเตรตและซัลเฟตไอออน อีกส่วนหนึ่งนำไปทำให้เป็นกรดที่ pH ต่ำกว่า 2 ด้วยกรดไนตริก 65 % เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะทั้ง 6 ชนิดในน้ำชะด้วยเทคนิค ICP-AES (ทำการทดลอง 3 ครั้ง) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3-7

จากรูปที่ 3-7 พบว่าการละลายของโลหะต่างๆ ใน pore water มากขึ้นเมื่อ L/S ลดลง ยกเว้น Cd และ Cr มีการละลายคงที่ น่าจะเกิดจากภาวะอิ่มตัวของโลหะในสารละลาย pore water การละลายของโลหะจาก S-OS และ S-HS แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

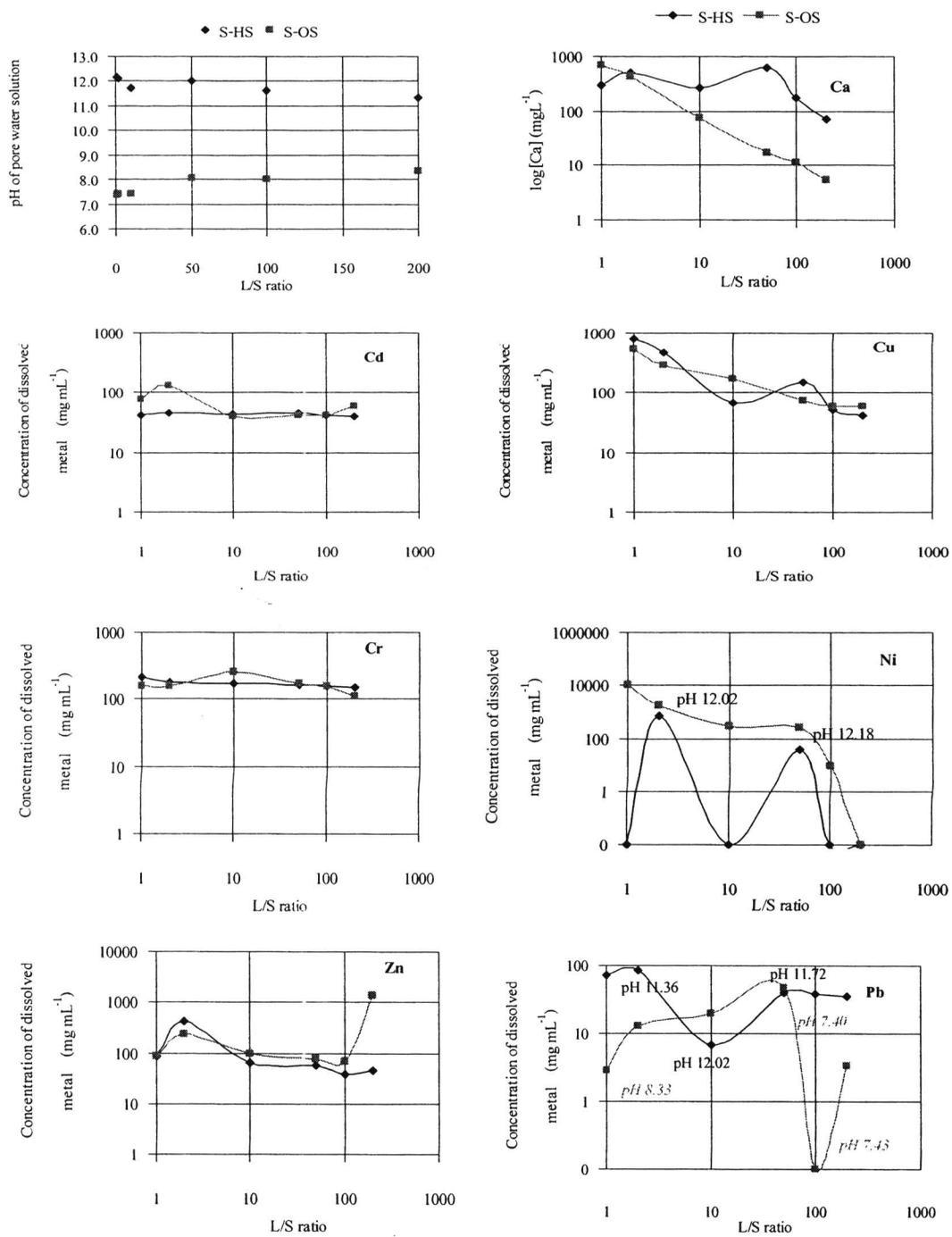
5.2 หาความสัมพันธ์ระหว่าง pH ของน้ำชะและปริมาณการถูกชะของโลหะหนักแต่ละชนิด

นำของแข็งปรับเสถียรตัวอย่าง (S-HS และ S-OS) ที่บดให้มีขนาดเล็กกว่า 1 mm มาแช่ในน้ำที่ปราศจากไอออน และเติมกรดไนตริก ลงไปเพื่อปรับค่า pH ให้มีค่าต่างๆ อยู่ในช่วง pH 4-12 โดยกำหนดค่าอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง เท่ากับ 10 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้จนเกิดสมดุลเป็นเวลา 7 วัน กรองสารละลายที่ได้ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2 แล้วแบ่งสารละลายที่ได้ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งนำไปหาค่า pH อีกส่วนหนึ่งนำไปทำให้เป็นกรดที่ pH ต่ำกว่า 2 ด้วยกรดไนตริก 65 % เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะทั้ง 6 ชนิดในน้ำชะด้วยเทคนิค ICP-AES (ทำการทดลอง 3 ครั้ง) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3-8

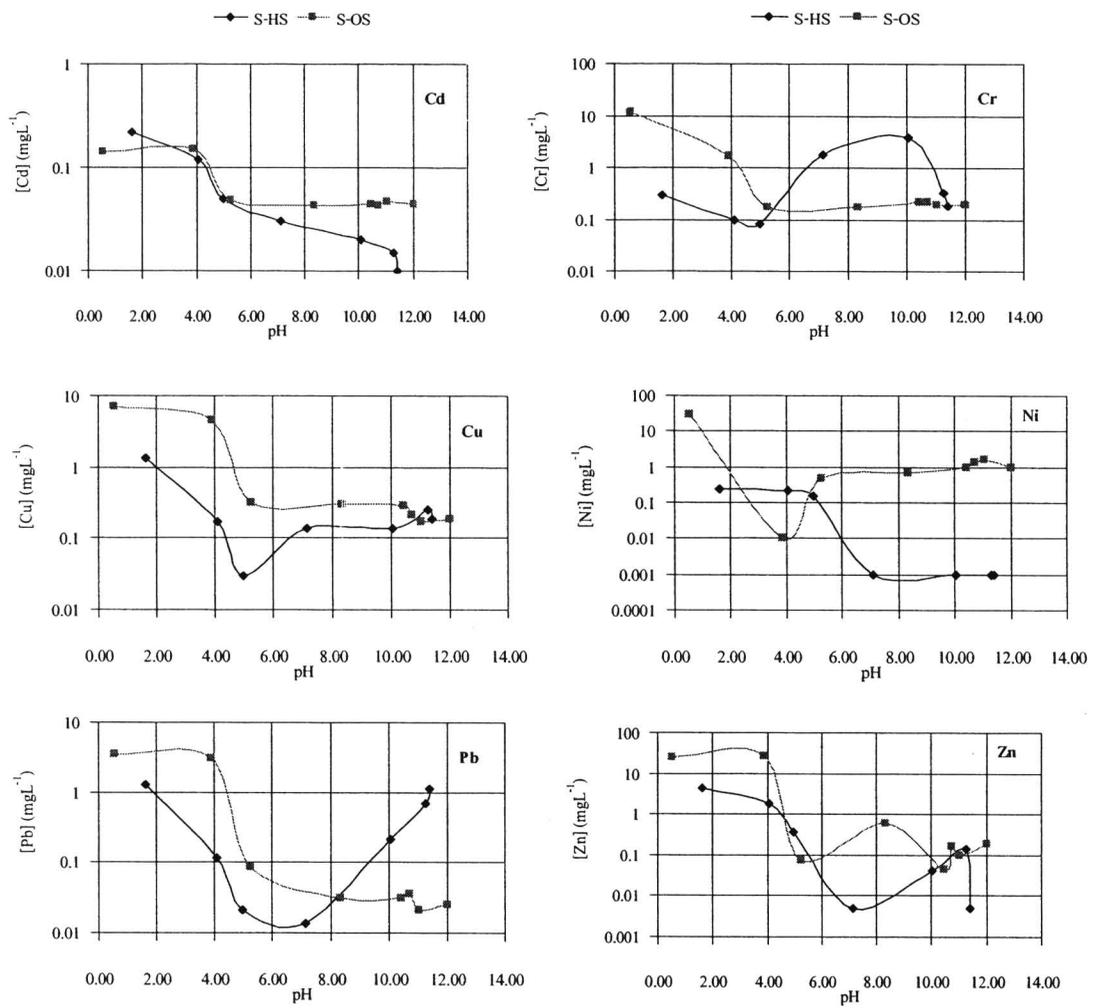
จากรูปที่ 3-8 พบว่าการละลายของโลหะทุกชนิดจากของแข็งปรับเสถียรทั้ง 2 ชนิดขึ้นกับ pH ของสารละลาย เมื่อเปรียบเทียบการละลายของโลหะชนิดเดียวกัน พบว่ามีพฤติกรรมการละลายที่แตกต่างกันจากของแข็งปรับเสถียรทั้ง 2 ชนิด ดังนี้ Cd Cu Ni และ Zn ละลายจากดินที่ปรับเสถียรที่ไม่การเติมกรดฮิวมิกได้ดีกว่า ดินที่ปรับเสถียรที่มีการเติมกรดฮิวมิก โครเมียมและตะกั่วมีพฤติกรรมการละลายเหมือนโลหะอื่นข้างต้นในสารละลายที่เป็นกรด แต่ในภาวะที่เป็นเบสโครเมียมและตะกั่วละลายจากดินที่มีการเติมกรดฮิวมิกได้ดีกว่า กรดฮิวมิกสามารถช่วยลดการละลายของโลหะได้

5.3 ศึกษาการชะด้วยสารละลาย KNO_3 สารละลายกรดอะซิติก และสารละลายกรดฮิวมิก ที่ระยะเวลาต่าง ๆ และหาค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ

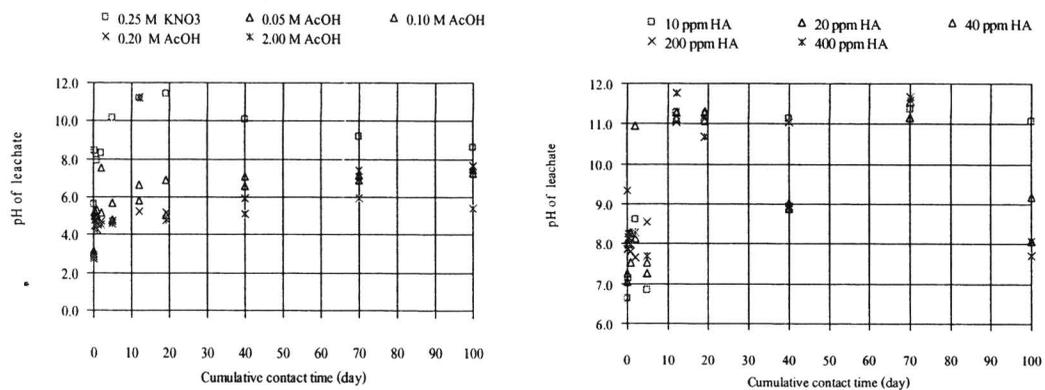
นำก้อนของแข็งตัวอย่าง (S-MS) มาชั่งน้ำหนักและหาพื้นที่ผิวของของแข็งปรับเสถียรแล้วทำการแช่ของแข็งปรับเสถียรตัวอย่างและของแข็งปรับเสถียรเปล่าตัวชะชนิดต่างๆ ดังนี้ สารละลาย KNO_3 เข้มข้น 0.25 mol/L สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 0.05, 0.1, 0.2 และ 2.0 mol/L และสารกรดฮิวมิกเข้มข้น 10, 20, 40, 200, และ 400 mg/L โดยกำหนดให้ปริมาณน้ำที่ใช้มีปริมาตรเป็น 10 เท่าของพื้นที่ผิวของของแข็งปรับเสถียรที่นำไปแช่นั้นๆ และระยะเวลาในการแช่คือ 6 ชั่วโมง 18 ชั่วโมง 1 วัน 2 วัน 5 วัน 7 วัน 20 วัน 30 วัน และ 30 วัน ตามลำดับ โดยถ่ายสารละลายที่ได้ใส่ในภาชนะที่ปิดสนิทแล้วนำไปทำให้เป็นกรดที่ pH ต่ำกว่า 2 ด้วยกรดไนตริก 65% เพื่อนำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนของ Cd Na K Ca คลอไรด์และซัลเฟต ค่าของแข็งละลายทั้งหมด และค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของของแข็งปรับเสถียร (ทำการทดลอง 3 ครั้ง) ได้ผลดังรูปที่ 3-9 – 3-18



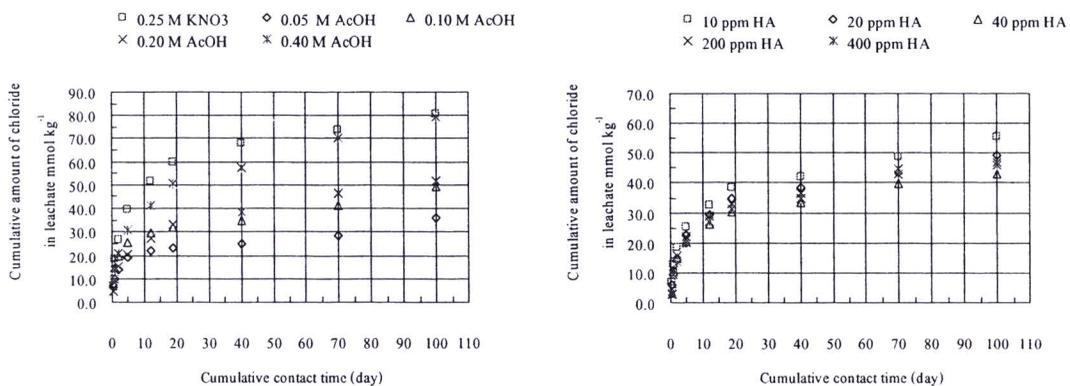
รูปที่ 3-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า L/S กับ pH และความเข้มข้นของไอออนต่าง ๆ



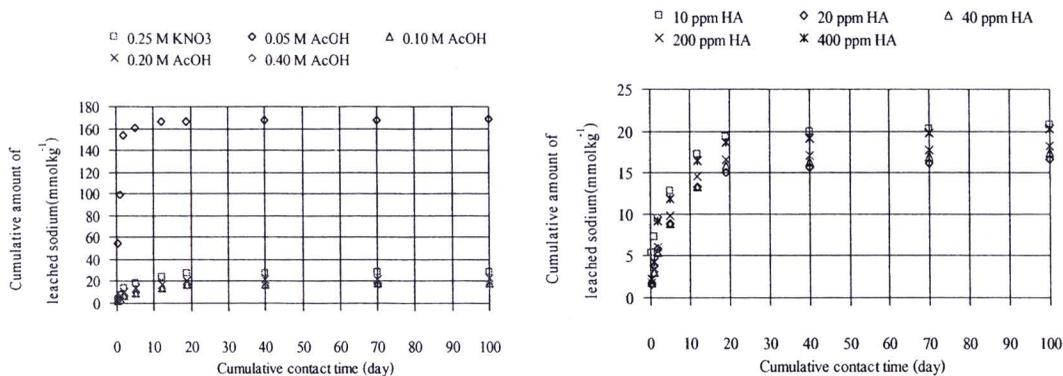
รูปที่ 3-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับความเข้มข้นของไอออนต่างๆ



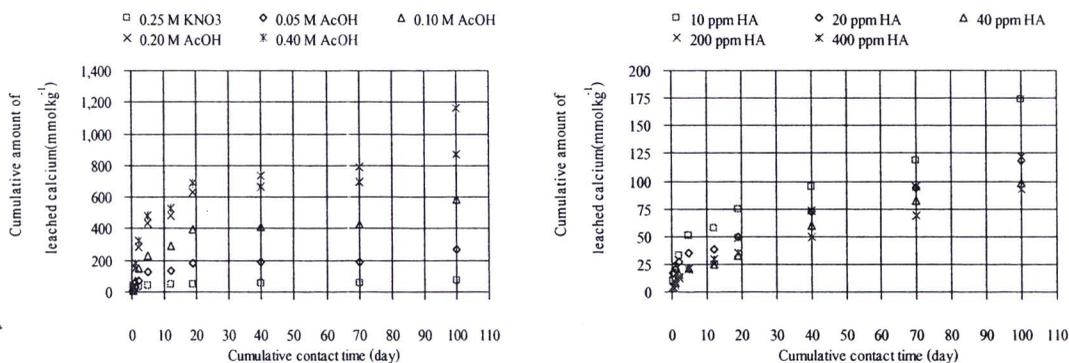
รูปที่ 3-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ของแข็งปรับเสถียรสัมผัสน้ำ กับค่า pH เมื่อใช้ตัวชะชนิดต่างๆ



รูปที่ 3-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ของแข็งปรับเสถียรสัมผัสน้ำ กับปริมาณของคลอไรด์ไอออนในน้ำชะ เมื่อใช้ตัวชะชนิดต่างๆ

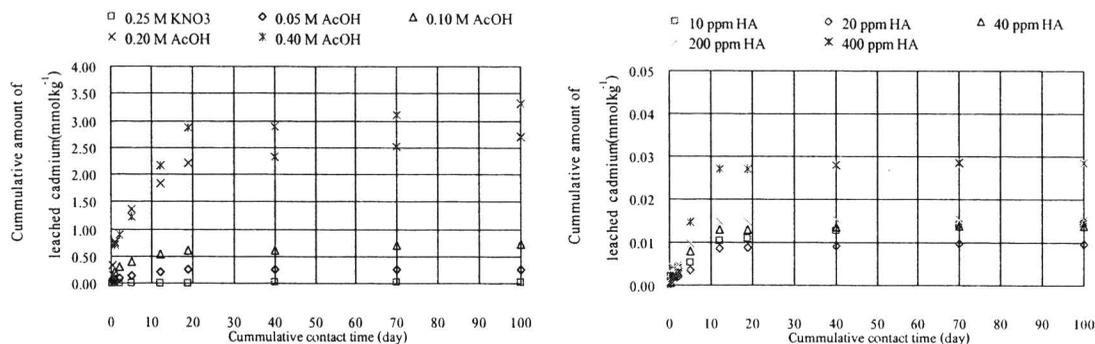


รูปที่ 3-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ของแข็งปรับเสถียรสัมผัสน้ำ กับปริมาณของโซเดียมในน้ำชะ เมื่อใช้ตัวชะชนิดต่างๆ

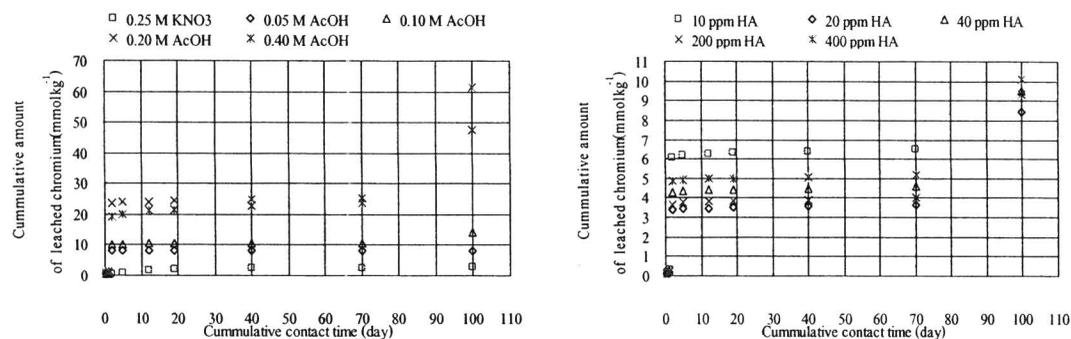


รูปที่ 3-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ของแข็งปรับเสถียรสัมผัสน้ำ กับปริมาณของ Ca ในน้ำชะ เมื่อใช้ตัวชะชนิดต่างๆ

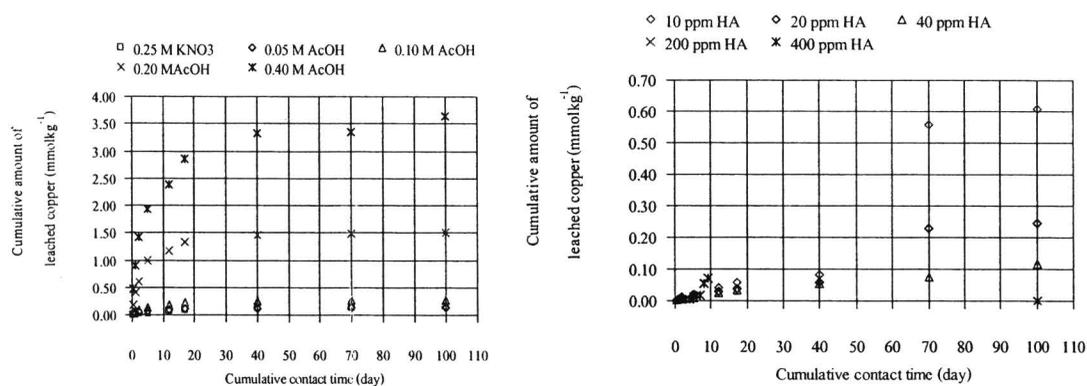




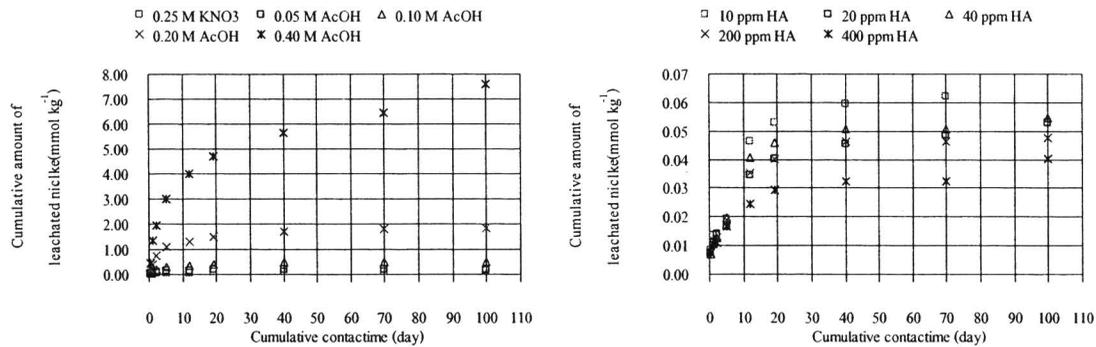
รูปที่ 3-13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ของแข็งปรับเสถียรสัมผัสน้ำ กับปริมาณของ Cd ในน้ำชะ เมื่อใช้ตัวชะชนิดต่างๆ



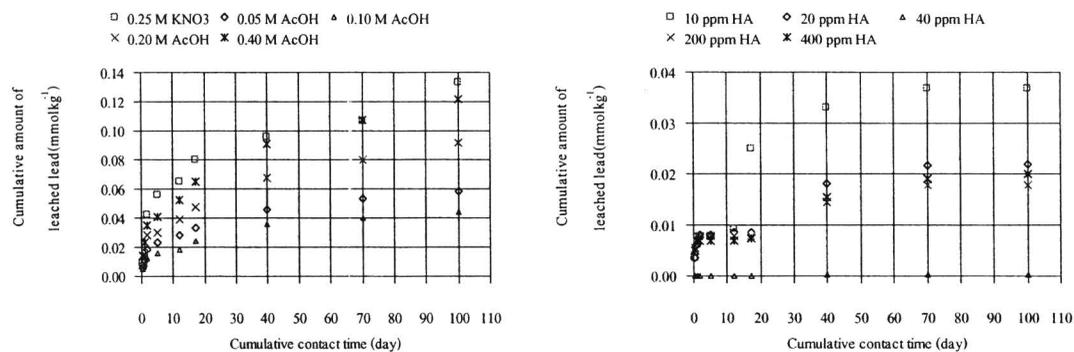
รูปที่ 3-14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ของแข็งปรับเสถียรสัมผัสน้ำ กับปริมาณของ Cr ในน้ำชะ เมื่อใช้ตัวชะชนิดต่างๆ



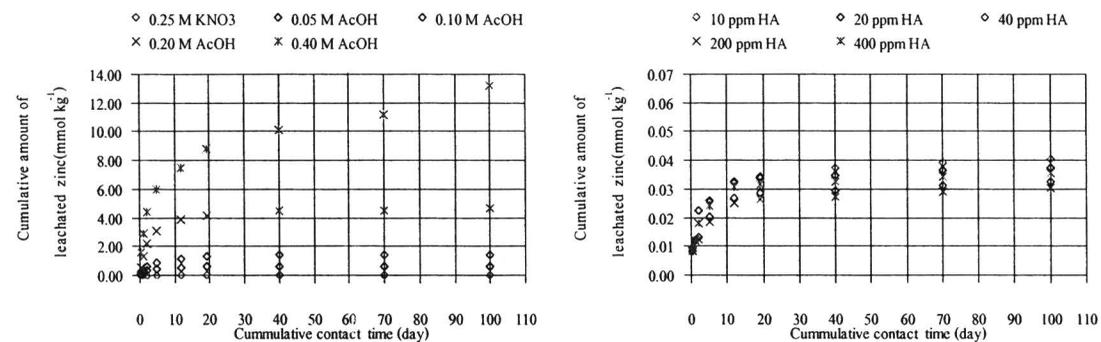
รูปที่ 3-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ของแข็งปรับเสถียรสัมผัสน้ำ กับปริมาณของ Cu ในน้ำชะ เมื่อใช้ตัวชะชนิดต่างๆ



รูปที่ 3-16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ของแข็งปรับเสถียรสัมผัสน้ำ กับปริมาณของ Ni ในน้ำชะ เมื่อใช้ตัวชะชนิดต่างๆ



รูปที่ 3-17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ของแข็งปรับเสถียรสัมผัสน้ำ กับปริมาณของ Pb ในน้ำชะ เมื่อใช้ตัวชะชนิดต่างๆ

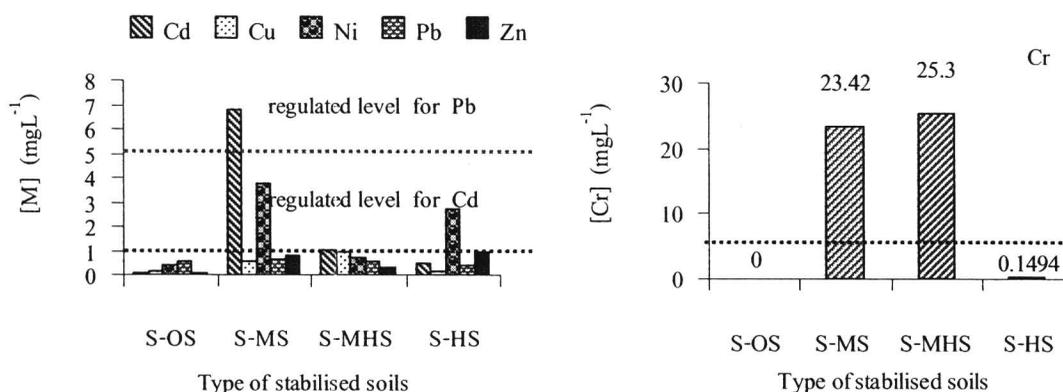


รูปที่ 3-18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ของแข็งปรับเสถียรสัมผัสน้ำ กับปริมาณของ Zn ในน้ำชะ เมื่อใช้ตัวชะชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 3-9 – 3-18 ชนิดของน้ำชะมีผลต่อการชะละลายซึ่งจะแตกต่างกันสำหรับโลหะแต่ละชนิด โดยทั่วไปน้ำปราศจากไอออนและสารละลายโพแทสเซียมไนเตรดให้ผลการชะที่ไม่แตกต่างกัน กรดอะซิติกจะชะโลหะได้ดีที่ความเข้มข้นมากส่วนกรดอิมิกที่ความเข้มข้นมากมีความสามารถชะโลหะได้ลดลง

5.4 ศึกษาการชะด้วย TCLP

TCLP หรือ Toxicity Characteristic Leaching Procedure ซึ่งเสนอโดย US EPA มีวิธีการสกัดคือ นำของแข็งปรับเสถียรตัวอย่าง (S-OS, S-MS, S-HS, และ S-MHS) ที่บดให้มีขนาดเล็กกว่า 9.5 mm มาชนิดละ 25 g ใส่ในขวดพลาสติกขนาด 500 mL เติมสารละลายกรดอะซิติก 0.1 M (pH 2.88 ± 0.05) ปริมาตร 500 mL ปิดฝาให้สนิท ผสมให้เข้ากันทิ้งไว้ 1 อาทิตย์ และนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองสารละลายผ่านเมมเบรนใยแก้วขนาด 0.2 μm นำสารละลายไปทำให้เป็นกรดที่ pH ต่ำกว่า 2 ด้วยกรดไนตริก 65 % เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะทั้ง 6 ชนิดในน้ำชะด้วยเทคนิค AAS หรือ ICP-AES ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3-19



รูปที่ 3-19 ความเข้มข้นของโลหะทั้ง 6 ชนิดในน้ำชะ จากการศึกษการชะด้วย TCLP

จากรูป 3-19 พบว่า ปริมาณของโลหะที่ถูกชะออกจากของแข็งปรับเสถียรทั้ง 4 ชนิด อยู่ในระดับต่ำกว่าเกณฑ์ที่ US EPA กำหนด ยกเว้น โลหะ Cd ใน S-MS และ Cr ใน S-MS และ S-MHS

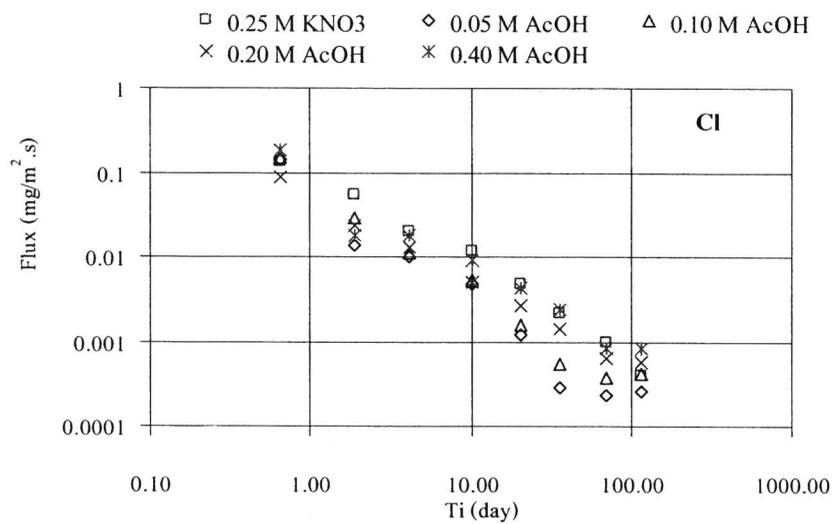
หากพิจารณาเปรียบเทียบโลหะชนิดเดียวกันระหว่าง S-OS และ S-MS พบว่าใน S-MS มีการเติมโลหะลงไปในดินก่อนการผ่านการทำ S/S ทำให้ปริมาณโลหะในน้ำชะจาก S-MS สูงกว่าจาก S-OS

หากพิจารณาเปรียบเทียบโลหะชนิดเดียวกันระหว่าง S-OS และ S-HS พบว่าการเติมกรดฮิวมิกลงในดินก่อนการทำ S/S ทำให้โลหะต่างๆ ถูกชะออกมาได้มากขึ้น โดยเฉพาะโลหะ Ni และ Zn อาจเนื่องมาจากเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะดังกล่าวกับกรดฮิวมิกที่เป็นสารที่ละลายน้ำได้ดีขึ้น

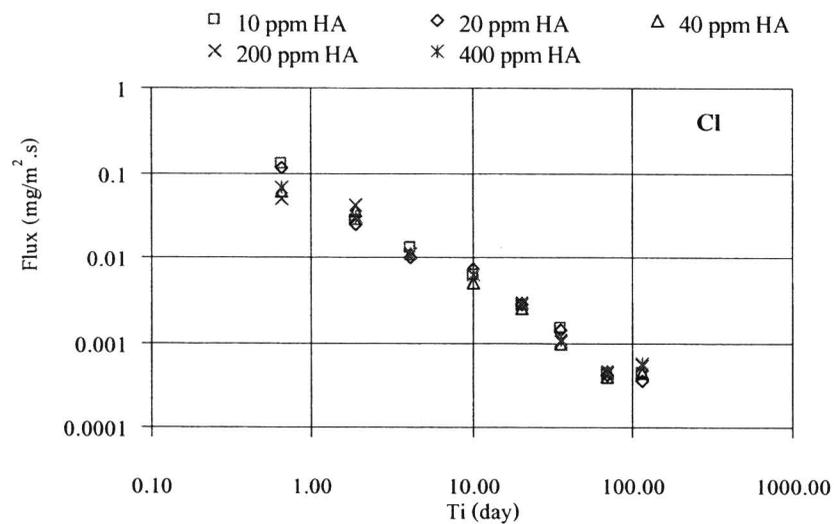
หากพิจารณาเปรียบเทียบโลหะชนิดเดียวกันระหว่าง S-MS และ S-MHS พบว่าการเติมกรดฮิวมิกลงในดินที่มีการเติมโลหะทำให้โลหะทุกชนิดละลายได้น้อยลง ยกเว้น Cu และ Cr

6. ฟลักซ์การชะละลาย (leaching flux)

จากแบบจำลองการชะละลาย กราฟฟลักซ์ของสปีชีส์ใด ๆ ($\text{mg/m}^2 \cdot \text{s}$) ของ S-OS กับเวลา T_i (leaching sequence) เมื่อใช้น้ำชะต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3-20 – 3-27

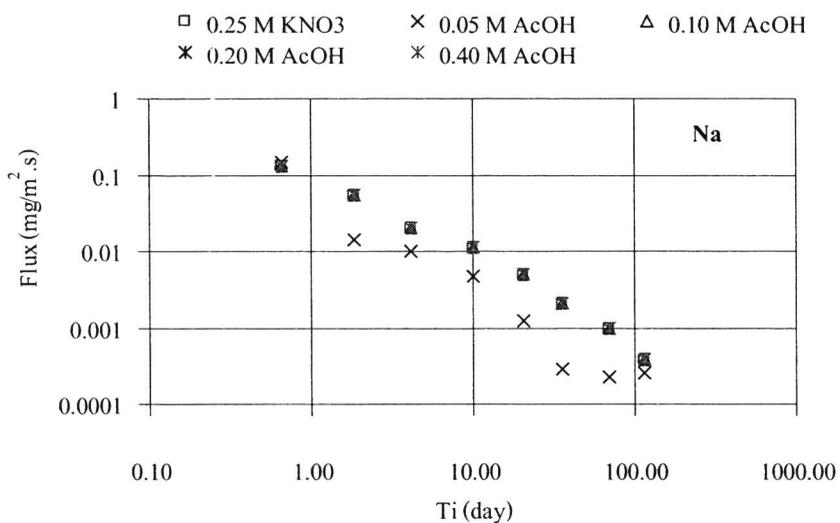


(a)

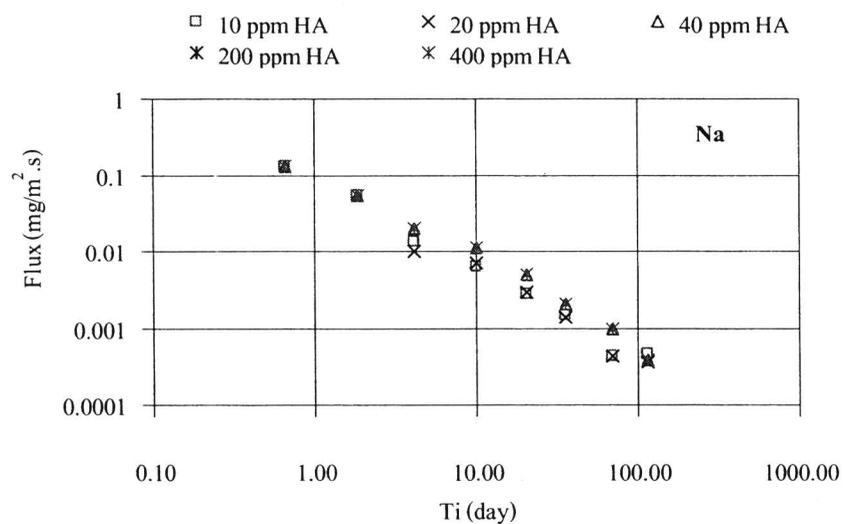


(b)

รูปที่ 3-20 ฟลักซ์ของคลอไรด์ (a) เมื่อใช้ 0.25 M KNO₃ และ 0.05, 0.10, 0.20, และ 0.40 M AcOH เป็นน้ำชะ และ (b) เมื่อใช้สารละลายกรดฮิวมิกเข้มข้น 10, 20, 40, 200, และ 400 ppm เป็นน้ำชะ

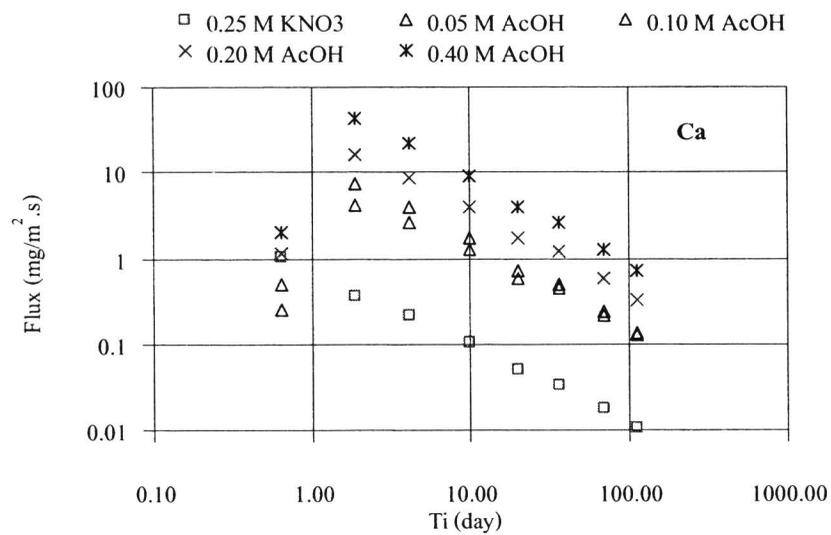


(a)

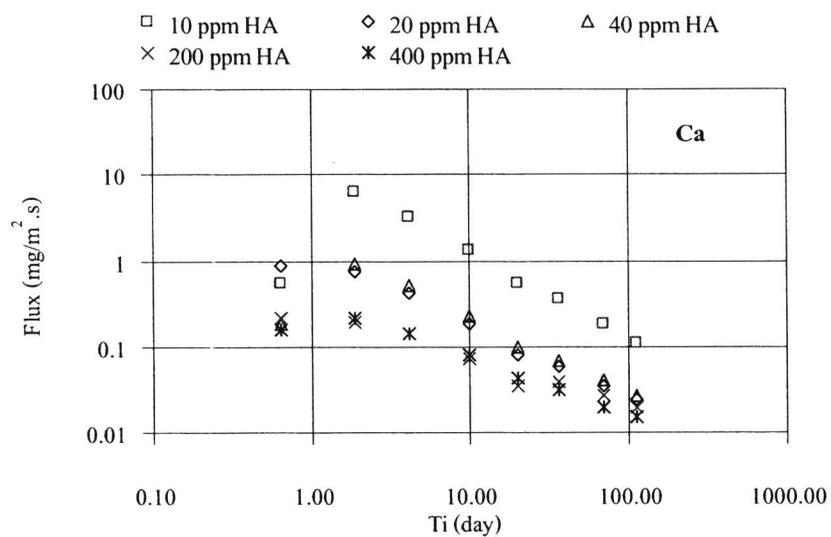


(b)

รูปที่ 3-21 ฟลักซ์ของ Na⁺ (a) เมื่อใช้ 0.25 M KNO₃ และ 0.05, 0.10, 0.20, และ 0.40 M AcOH เป็นน้ำชะ และ (b) เมื่อใช้สารละลายกรดฮิวมิกเข้มข้น 10, 20, 40, 200, และ 400 ppm เป็นน้ำชะ

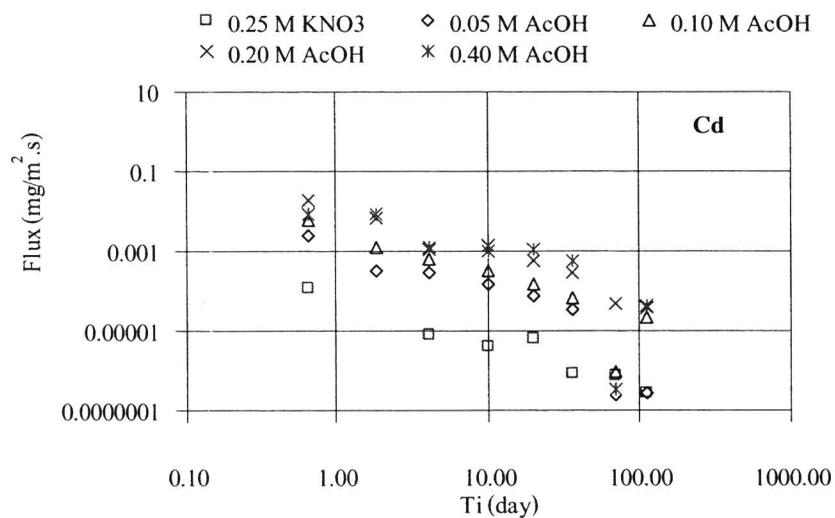


(a)

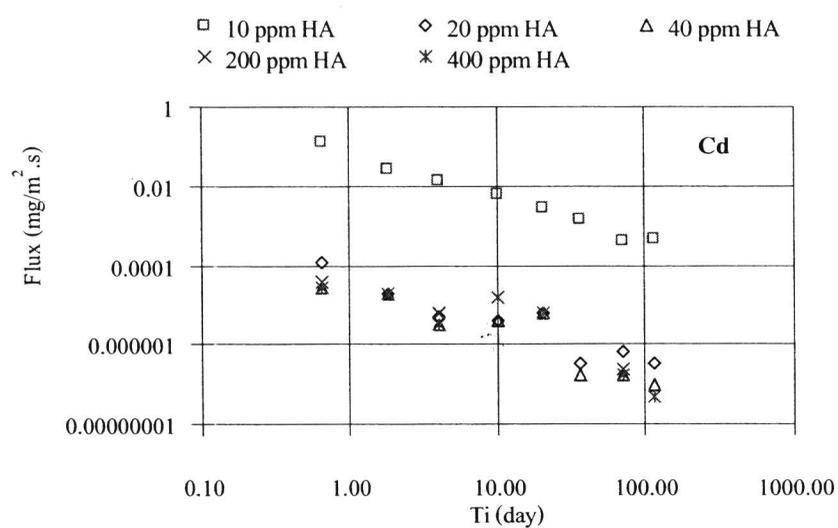


(b)

รูปที่ 3-21 พลักร์ของ Ca²⁺ (a) เมื่อใช้ 0.25 M KNO₃ และ 0.05, 0.10, 0.20, และ 0.40 M AcOH เป็นน้ำชะ และ (b) เมื่อใช้สารละลายกรดอิมิกเข้มข้น 10, 20, 40, 200, และ 400 ppm เป็นน้ำชะ

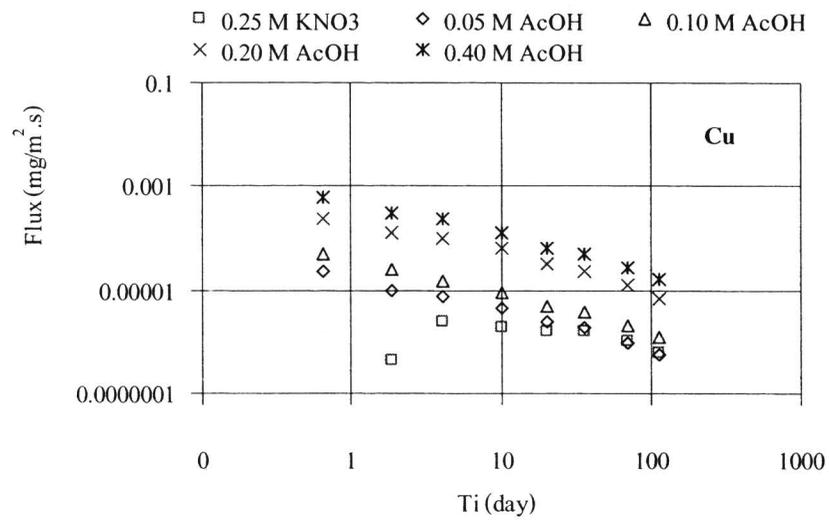


(a)

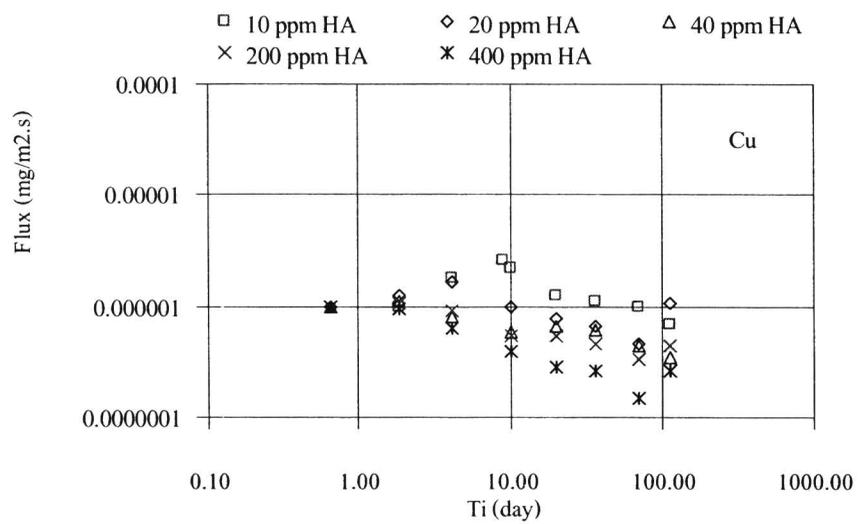


(b)

รูปที่ 3-22 ฟลักซ์ของ Cd²⁺ (a) เมื่อใช้ 0.25 M KNO₃ และ 0.05, 0.10, 0.20, และ 0.40 M AcOH เป็นน้ำชะ และ (b) เมื่อใช้สารละลายกรดฮิวมิกเข้มข้น 10, 20, 40, 200, และ 400 ppm เป็นน้ำชะ

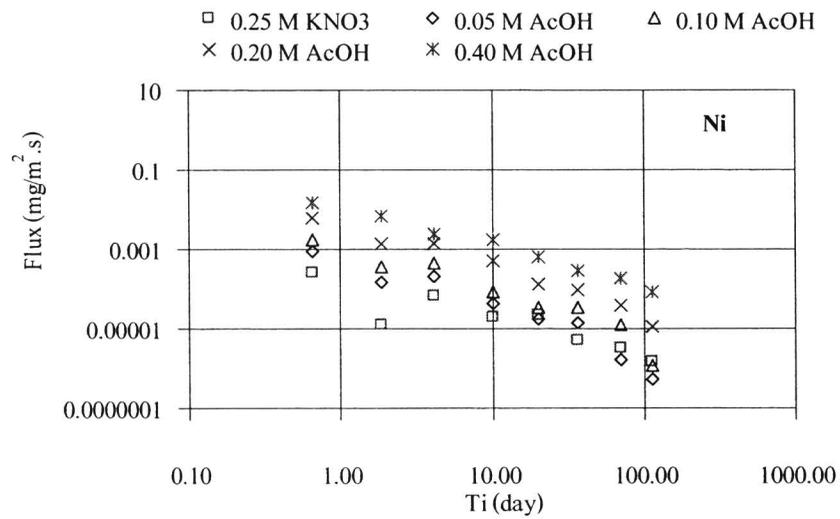


(a)

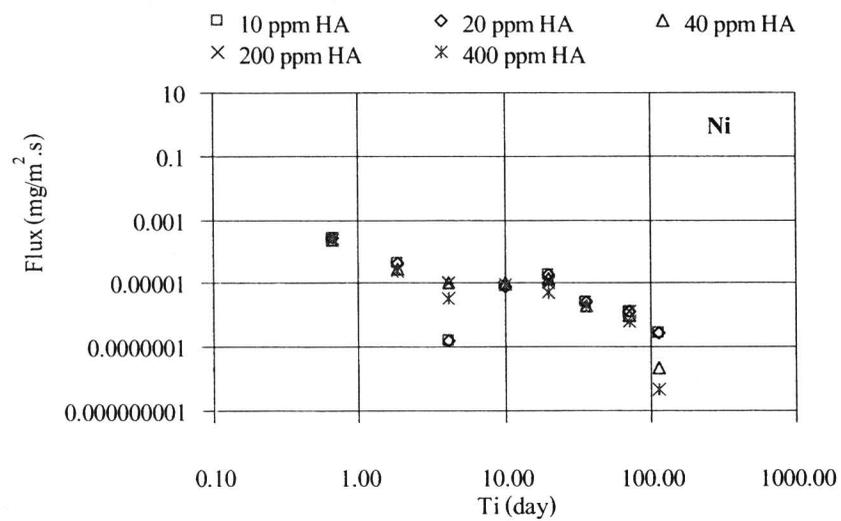


(b)

รูปที่ 3-23 ฟลักซ์ของ Cu²⁺ (a) เมื่อใช้ 0.25 M KNO₃ และ 0.05, 0.10, 0.20, และ 0.40 M AcOH เป็นน้ำชะ และ (b) เมื่อใช้สารละลายกรดฮิวมิกเข้มข้น 10, 20, 40, 200, และ 400 ppm เป็นน้ำชะ

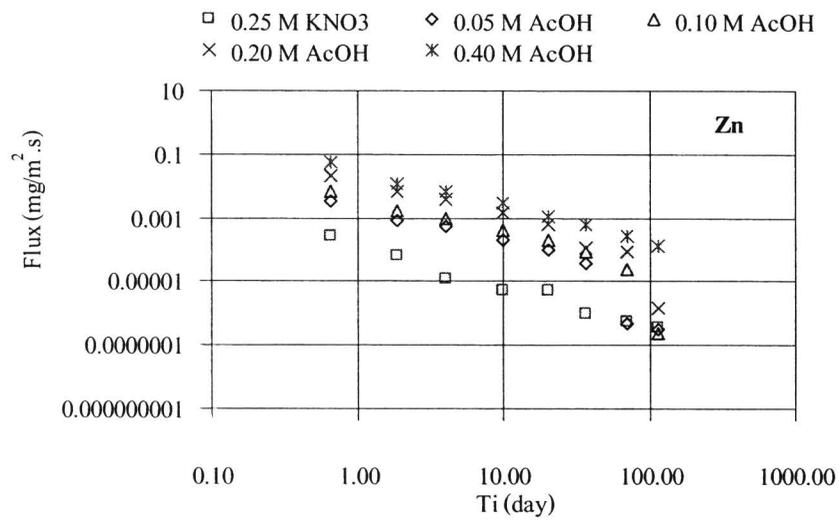


(a)

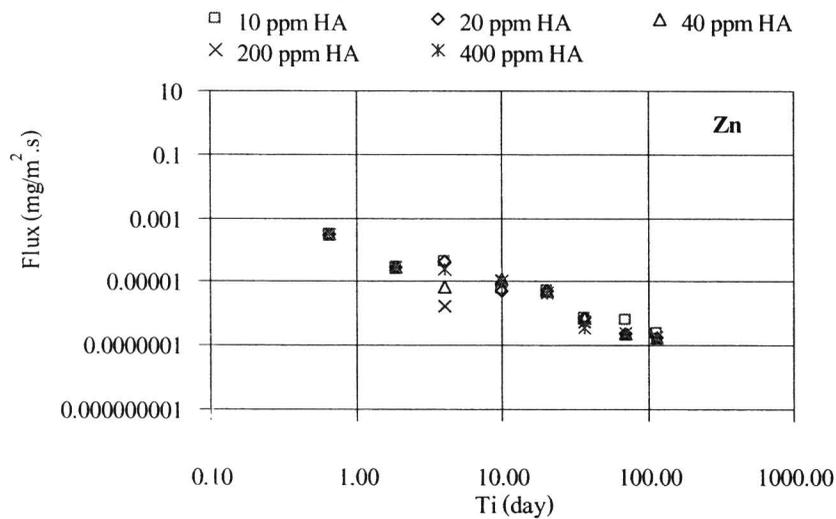


(b)

รูปที่ 3-24 ฟลักซ์ของ Ni²⁺ (a) เมื่อใช้ 0.25 M KNO₃ และ 0.05, 0.10, 0.20, และ 0.40 M AcOH เป็นน้ำชะ และ (b) เมื่อใช้สารละลายกรดฮิวมิกเข้มข้น 10, 20, 40, 200 และ 400 ppm เป็นน้ำชะ

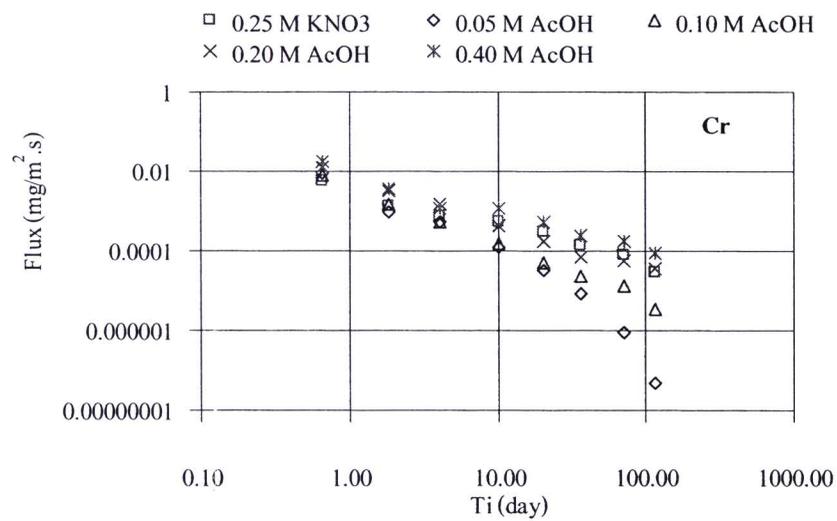


(a)

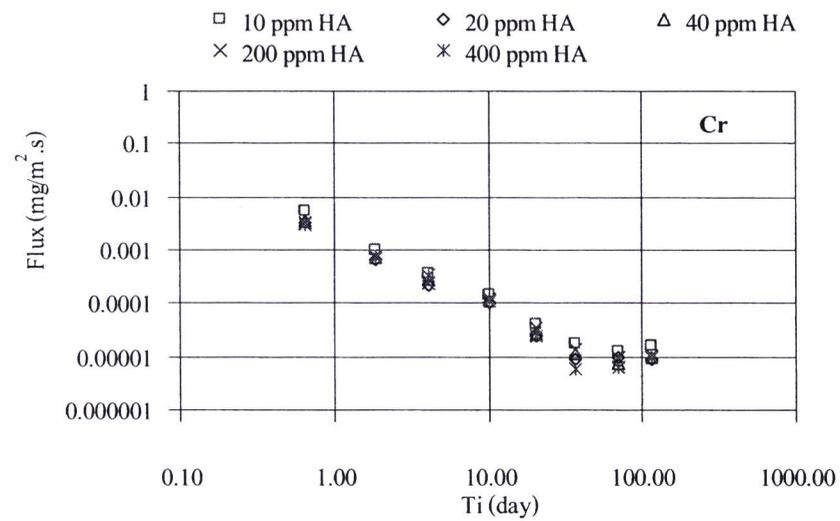


(b)

รูปที่ 3-25 พลั๊กซ์ของ Zn^{2+} (a) เมื่อใช้ 0.25 M KNO₃ และ 0.05, 0.10, 0.20, และ 0.40 M AcOH เป็นน้ำชะ และ (b) เมื่อใช้สารละลายกรดฮิวมิกเข้มข้น 10, 20, 40, 200 และ 400 ppm เป็นน้ำชะ



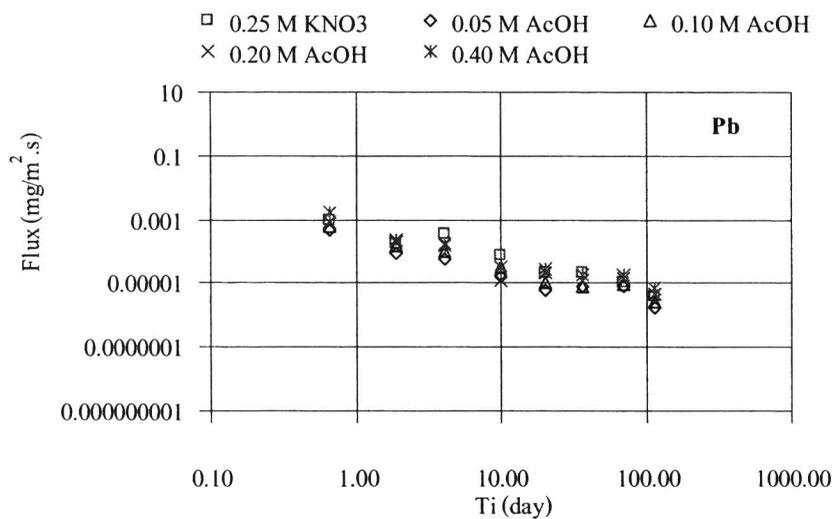
(a)



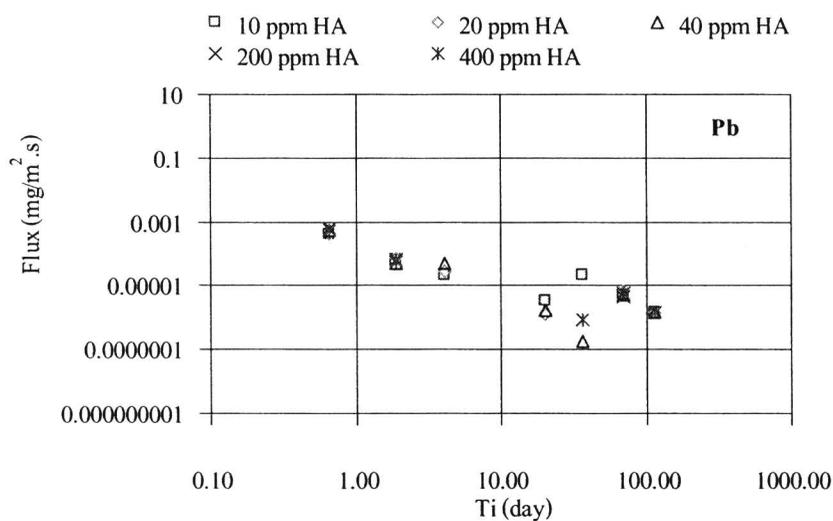
(b)

รูปที่ 3-26 ฟลักซ์ของ Cr^{3+} (a) เมื่อใช้ 0.25 M KNO_3 และ $0.05, 0.10, 0.20, \text{ และ } 0.40 \text{ M AcOH}$ เป็นน้ำชะ และ (b) เมื่อใช้สารละลายกรดฮิวมิกเข้มข้น $10, 20, 40, 200$ และ 400 ppm เป็นน้ำชะ





(a)



(b)

รูปที่ 3-27 ฟลักซ์ของ Pb^{2+} (a) เมื่อใช้ 0.25 M KNO₃ และ 0.05, 0.10, 0.20, และ 0.40 M AcOH เป็นน้ำชะ และ (b) เมื่อใช้สารละลายกรดฮิวมิกเข้มข้น 10, 20, 40, 200 และ 400 ppm เป็นน้ำชะ

จากรูปที่ 3-20 – 3-27 พบว่า หลังจากการชะละลาย 100 วัน ฟลักซ์ของสปีชีส์ต่างๆ มีค่าน้อยมาก สามารถแบ่งพฤติกรรมการชะละลายได้ 3 กรณี ดังนี้

กรณี 1: สปีชีส์ที่การละลายไม่ขึ้นกับค่า pH ของสารละลาย ชนิดและความเข้มข้นของน้ำชะ ได้แก่ คลอไรด์ และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความชันของกราฟเท่ากับ -0.5 แสดงถึงการชะละลายแบบ diffusion เท่านั้น

กรณี II: สปีชีส์การละลายขึ้นกับสภาวะของน้ำชะ ได้แก่ Ca, Cd, และ Cu การชะละลายถูกกำหนดด้วยสมดุลการละลายใน pore solution ในช่วงแรกของการชะละลาย ฟลักซ์ของ Ca มีค่าน้อย ในน้ำชะที่เป็นกรดแอซิดิกทำให้การชะละลายของ Ca เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและสูงกว่าในสารละลายกรดฮิวมิก แต่เมื่อกรดฮิวมิกมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ฟลักซ์ของ Ca กลับลดลง สำหรับ Cd และ Cu มีพฤติกรรมที่คล้ายกัน การชะละลายของ Cd เกิดได้มากที่สุดเมื่อกรดฮิวมิกมีความเข้มข้นต่ำ การชะละลายของ Cu คงที่ในกรดแอซิดิก ซึ่งการละลายของสปีชีส์เหล่านี้ขึ้นกับค่า pH ของน้ำชะและ ionic strength ของสารละลาย

สามารถเสนอแนวคิดได้ 2 ทาง สำหรับอภิปรายพฤติกรรมของการชะละลายของ Ca, Cd, และ Cu ได้ดังนี้

- (1) ปริมาณกรดฮิวมิกที่สูงในน้ำชะทำให้ ionic strength (humate ions) เพิ่มขึ้น ทำให้ concentration gradient ของ Cu และ Cd ลดลง
- (2) การชะละลายถูกกำหนดด้วยการเกิดสารเชิงซ้อน โลหะ-ฮิวมิก (เกิดเป็น humic-metal salts) ที่รอยต่อระหว่าง solid/liquid interface ของก้อนของแข็ง ทำให้การแพร่เกิดได้ช้าลง

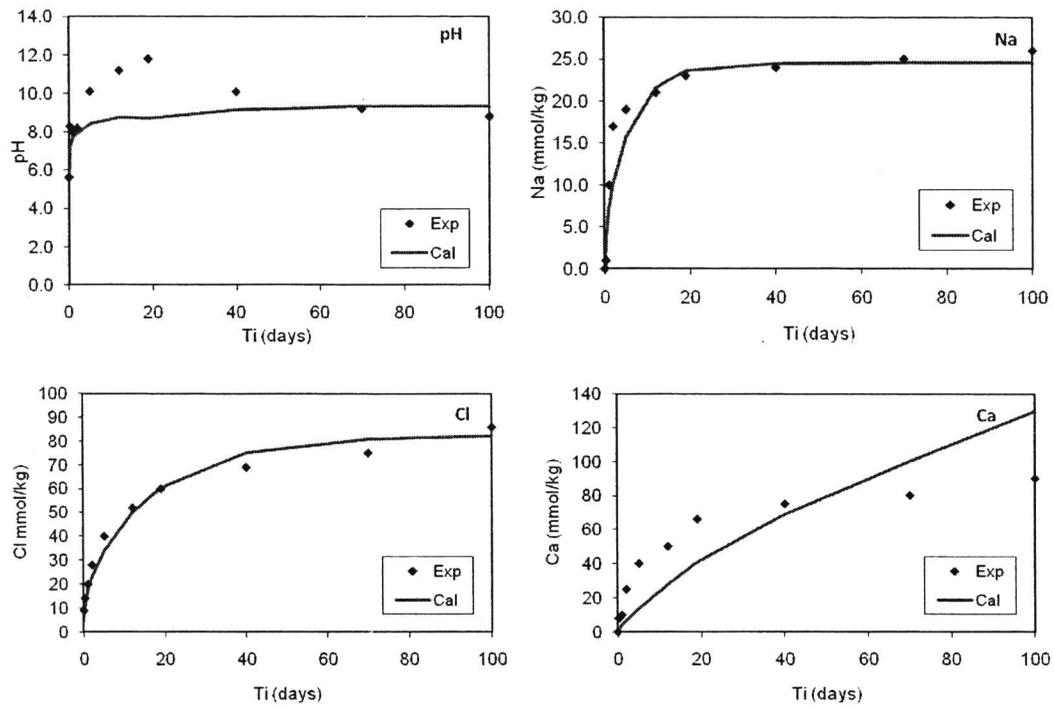
กรณี III: สปีชีส์ที่การละลายขึ้นกับกรดแอซิดิกและ KNO_3 แต่ไม่ขึ้นกับปริมาณกรดฮิวมิกในน้ำชะ ได้แก่ Ni, Zn, Cr, และ Pb การชะละลายในกรดแอซิดิกคล้ายกับ Ca, Cd และ Cu คือ ฟลักซ์สูงเมื่อความเข้มข้นของกรดแอซิดิกและ KNO_3 เพิ่มขึ้น ในขณะที่ฟลักซ์มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อน้ำชะที่มีความเข้มข้นของกรดฮิวมิกต่างกัน

7. ผลการคำนวณแบบจำลอง

ตารางที่ 3-8 ตัวแปรอินพุตสำหรับแบบจำลองการชะละลายเมื่อใช้ 0.25 M KNO_3 เป็นน้ำชะ

ตัวแปร	ค่าที่ใช้	
พื้นที่ผิวสัมผัส	9.54×10^{-4}	m^2
ความสูงของคอนกรีต	1.29×10^{-2}	m
ปริมาตรของน้ำชะ	1.00×10^{-3}	m^3
ความพรุน	0.0931	
ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Ca^{2+}	0.018	mol/L
ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cd^{2+}	1.9×10^{-5}	mol/L
ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Na^+	0.4	mol/L
ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cl^-	0.1	mol/L
ปริมาณของ Ca ในรูปของแข็ง	8.3	mol/L
สัมประสิทธิ์การแพร่ของ Ca^{2+}	5×10^{-10}	m^2/s
สัมประสิทธิ์การแพร่ของ Na^+	4×10^{-11}	m^2/s
สัมประสิทธิ์การแพร่ของ Cl^-	3×10^{-11}	m^2/s

ผลการคำนวณจากแบบจำลองการชะละลายเปรียบเทียบกับผลการทดลองแสดงดังกราฟที่ 3-28 เมื่อเปรียบเทียบ ปริมาณสปีชีส์ที่ละลายที่ได้จากการคำนวณ ณ เวลาต่างๆ (สมการที่ 2-8) มีค่าสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลองหาการละลายที่สัมพันธ์กับเวลา



รูปที่ 3-28 ปริมาณสปีชีส์ที่ละลายสะสมจากการทดลอง (Exp) เปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณ (Cal) ณ เวลาต่างๆ