อิทธิพลของปริมาณดินเหนียวต่อการดูดซับโลหะหนัก

The Effect of Clay Content on the Heavy Metal Adsorption

เลิศ เกิดชัยภูมิ[1] และ พงศกร พรรณรัตนศิลป์[2, 3]

Lerd Kerdchaiyaphum and Pongsakorn Punrattanasin

[1]นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[2]รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[3]ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ศูนย์เครือข่ายมหาวิทยาลัยขอนแก่น

E-mail: lerdkerd@gmail.com[1], ppunrattanasin@gmail.com[2,3]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของดินเหนียวต่อการดูดซับโลหะหนัก โดยทดสอบความสามารถในการดูดซับของสารละลายทองแดงในดิน ตัวอย่างดินที่นำมาศึกษาประกอบด้วยตัวอย่างดินจำนวน 7 ชุด โดยเน้นการทดสอบการดูดซับแบบแบทช์ (Batch Adsorption Test) จากการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลา 48 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารละลายทองแดงถูกดูดซับด้วยดินเข้าสู่สภาวะสมดุล การดูดซับสารละลายทองแดงของดินทั้ง 7 ชุดจากมากที่สุดไปน้อยที่สุดได้แก่ ดินมุกดาหาร, ดินหนองบัวลำภู, ดินอุดรธานี, ดินนครพนม, ดินเลย, ดินขอนแก่น และดินหนองคาย ตามลำดับ โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งเมื่อผสมดินเหนียวเข้าไปกับดินขอนแก่น การดูดซับสารละลายทองแดงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น สำหรับปริมาณอัตราส่วนของดินเหนียวที่ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของดินทั้งหมดเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

Abstract

This paper presents results of studies about the effect of clay content to absorb heavy metals. By testing the ability of absorption of copper in soil solution. Soil samples showed that the soil sample consisted of seven series, testing by batch adsorption. The study found that 48 hour period of concentration of copper to be absorbed by the soil into equilibrium. The adsorption copper soil seven series from most to least were ground Mukdahan soil, Nongbua Lamphu soil, Udon Thani soil, Nakhon Phanom soil, Loei soil, Khon Kaen soil and Nong Khai soil, respectively, using the isotherm adsorption of Langmuir. The clay was mixed into the Khon Kaen soil. Adsorption of copper was increased. The total amount of clay ratio of 60 percent by weight of total clay ratio is most appropriate.

Keywords: Adsorption, Copper, Heavy metal

1.บทนำ

การพัฒนาเทคโนโลยี การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ทำให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมเกินขีดจำกัด ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่มีความรุนแรงและยากต่อการแก้ไข หนึ่งในผลกระทบนั้นคือการรั่วไหลปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำ ซึ่งโรงงานอุตสาหรกรรมที่เกิดขึ้นมานั้น มีทั้งโรงงานที่ถูกต้องตามกฎหมายและลักลอบเปิดกิจการก็ตาม โรงงานอุตสาหกรรมบางแห่งมีการลักลอบระบายของเสียลงสู่แม่น้ำลำคลอง ซึ่งมิได้มีการบำบัดตามที่กฎหมายกำหนด น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางแห่งมีการปนเปื้อนของโลหะหนักซึ่งเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการทางธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดิน ดินถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ รวมถึงการสะสมอยู่ในสัตว์น้ำ โลหะหนักเป็นวัตถุดิบที่ถูกนำมาใช้ในหลายภาคส่วน เช่น ในด้านอุตสาหกรรม ใช้โลหะหนักในกระบวนการผลิตพลาสติก พีวีซี สี ถ่านไฟฉาย สำหรับทางด้านการเกษตร โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย ขณะเดียวกันทางการแพทย์ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยา อุปกรณ์ทางการแพทย์และเครื่องสำอาง น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้ จึงเป็นปัจจัย

RECEIVED 15 March, 2011

ACCEPTED 20 June, 2011

สำคัญให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในการดำรงชีพ เมื่อร่างกายได้รับโลหะหนักมากเกินพอ อาจทำให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพ เช่น ปรอทเมื่อได้รับเข้าสู่ร่างกายจะไปสะสมที่มันสมองของมนุษย์ ทำให้เป็นอันตรายต่อระบบประสาทเกิดโรคสมองเสื่อม เป็นต้น เนื่องจากดินเป็นวัสดุที่ถือว่ามีความสามารถในการดูดซับ โดยที่รอบอนุภาคของเม็ดดินนั้นประกอบด้วยประจุลบจำนวนมากที่สามารถดึงดูดประจุบวกของโลหะหนักยึดเกาะกับอนุภาคของเม็ดดิน [1] จากที่กล่าวมาจึงใช้ดินเป็นวัสดุในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

2.วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

2.1 ดินที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ ใช้ตัวอย่างดินจำนวน 7 ชุดสุ่มเก็บจากแหล่งต่างๆ ได้แก่ ดินอุดรธานี ดินหนองบัวลำภู ดินเลย ดินหนองคาย ดินนครพนม ดินมุกดาหาร และดินขอนแก่น โดยเก็บตัวอย่างดินแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample) ที่ระดับความลึก 0 - 20 เซนติเมตร จากผิวดินเดิม ซึ่งคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

2.2 สารละลายโลหะหนักที่ใช้ในการศึกษา

การเตรียมสารละลายโลหะที่ใช้ทดสอบคือ สารละลายทองแดง (Copper Chloride, $CuCl_3$) โดยความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการศึกษาวิจัยได้แก่ 5, 25, 50, 100, 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.วิธีการศึกษา

3.1 การทดสอบแบบแบทช์ (Batch Adsorption Test)

การทดสอบแบบแบทช์ (Batch Adsorption Test) ประกอบด้วยการทดสอบหาเวลาการดูดซับที่สภาวะสมดุล และการหาไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนัก การทดลองเริ่มต้นจากนำตัวอย่างดินมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 หนัก 2.5 กรัม ใส่ลงในขวดทดลองขนาด 120 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำสารละลายทองแดงปริมาตร 50 มิลลิลิตรที่เตรียมไว้มาผสมนำเข้าเครื่องเขย่าทันทีที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างออกจากเครื่องเขย่าที่เวลาต่างๆ คือ 0.5, 1, 3, 6, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมงตามลำดับ เมื่อเก็บตัวอย่างดินออกจากเครื่องเขย่าตามเวลาที่กำหนดทำการแยกดินออกจากสารละลายทองแดงทันทีโดยใช้ตัวกรอง (Filter) แล้วนำสารละลายทองแดงที่กรองแล้วไปเจือจางด้วยกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 1 แล้วนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) หลังจากทราบค่าความเข้มข้นของสารละลายทองแดงที่เหลืออยู่ จะนำไปวิเคราะห์หาไอโซเทอมการดูดซับ หลังจากนั้นทำการทดสอบแบทช์ซ้ำโดยเปลี่ยนความเข้มต้นเริ่มต้นของสารละลายทองแดง โดยความเข้มข้นเริ่มต้นที่ใช้มี 6 ค่า ใช้ตัวอย่างทดสอบ 5 ชุดต่อความเข้มข้นหนึ่งค่า ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้ทำการทดสอบแบบแบทช์ทั้งหมดรวม 1,680 ครั้ง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน

Soil Properties	**อุดรธานี**	**หนองบัวลำภู**	**เลย**	**หนองคาย**	**นครพนม**	**มุกดาหาร**	**ขอนแก่น**
USCS classification	CL	SM	SC	ML-CL	ML	SC	SM
ASSHTO classification	A-7-6	A-4	A-2-6	A-4	A-4	A-2-7	A-4
Specific gravity	2.64	2.60	2.64	2.67	2.61	2.65	2.60
Liquid limit (%)	46.49	18.79	35.43	19.63	20.42	54.86	16.20
Plastic limit (%)	10.64	15.17	21.54	13	16.54	29.62	13.12
Plasticity index (%)	35.85	3.62	13.89	6.63	3.88	25.24	3.08
Optimum moisture content (%)	19.81	12.74	11.68	18.48	12.35	18.28	10.00
Max. Dry unit density (kN/m^3)	15.70	18.34	20.31	15.60	18.25	16.48	21.10
Coefficient of permeability (cm/s)	5.94×10^{-7}	4.90×10^{-6}	6.79×10^{-7}	8.60×10^{-6}	1.21×10^{-6}	5.10×10^{-7}	2.80×10^{-6}

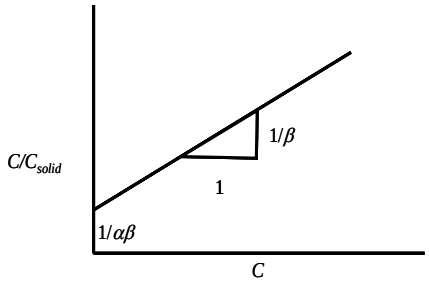
ซึ่งปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับคำนวณได้จากสมการที่ 1 ดังนี้

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

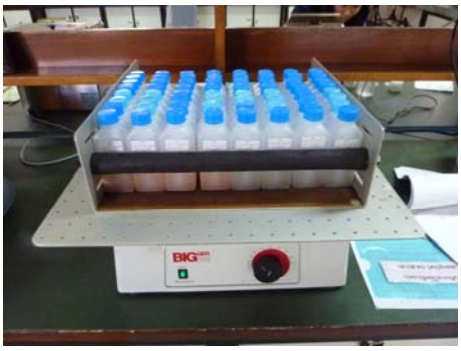
เมื่อ C_{solid} คือ ปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินที่ใช้ดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) , C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร), C_{eq} คือความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร), V_{sol} คือปริมาตรของสารละลายที่ใช้ (ลิตร) และ M_s คือ มวลของดินที่ใช้ดูดซับ (กรัม) สำหรับกราฟความสัมพันธ์ในรูปของสมการไอโซเทอมในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้สมการของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ดังแสดงในสมการที่ 2 โดยมีสมการในรูปเส้นตรงดังนี้

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

เมื่อ α คือค่าอัตราการดูดซับของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม) และ β คือปริมาณสูงสุดของสารละลายโลหะที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินที่ใช้ดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)



รูปที่ 1 ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์



รูปที่ 2 Shaking soil and solution

รูปที่ 3 Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

3.2 การทดสอบหาปริมาณอัตราส่วนดินเหนียวต่อดินขอนแก่น

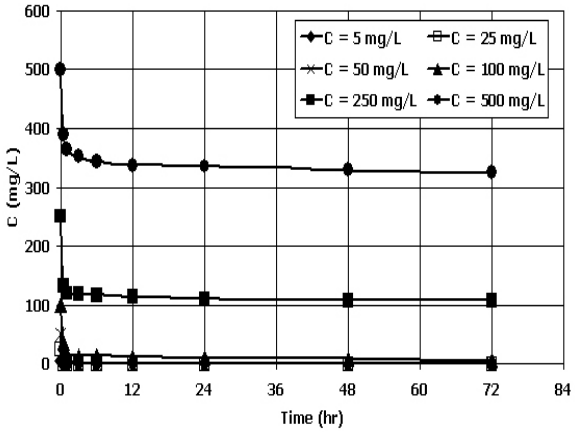
การทดลองเริ่มต้นจากนำตัวอย่างดินมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ทดสอบโดยผสมดินเหนียวกับดินขอนแก่นที่ดินเหนียวน้ำหนัก 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินทั้งหมด 2.5 กรัม ซึ่งน้ำหนักที่เหลือจะเป็นน้ำหนักของดินขอนแก่น โดยเพิ่มทีละ 10 เปอร์เซ็นต์จนถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ใส่ลงในขวดทดลองขนาด 120 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำสารละลายทองแดงปริมาตร 50 มิลลิลิตรที่เตรียมไว้มาผสมนำเข้าเครื่องเขย่าทันทีที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างออกจากเครื่องเขย่าที่เวลา 48 ชั่วโมง เมื่อเก็บตัวอย่างดินออกจากเครื่องเขย่าตามเวลาที่กำหนดทำการแยกดินออกจากสารละลายทองแดงทันทีโดยใช้ตัวกรอง (Filter) แล้วนำสารละลายทองแดงที่กรองแล้วไปเจือจางด้วยกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 1 แล้วนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) โดยความเข้มข้นเริ่มต้นที่ใช้มี 2 ค่าคือ 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ใช้ตัวอย่างดินทดสอบ 5 ชุดต่อความเข้มข้นหนึ่งค่า ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้ทำการทดสอบแบบแบทช์ทั้งหมดรวม 90 ครั้ง

4. ผลการทดสอบ

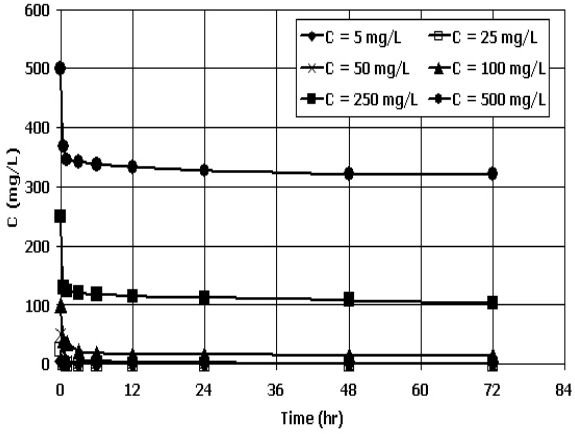
4.1. ผลการทดสอบแบบแบทช์ (Batch Adsorption Test)

ผลทดสอบการดูดซับสารละลายทองแดงของตัวอย่างดินทั้ง 7 ชุดสามารถหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการดูดซับ (Time) กับความเข้มข้นของสารละลาย (C) ซึ่งจาก

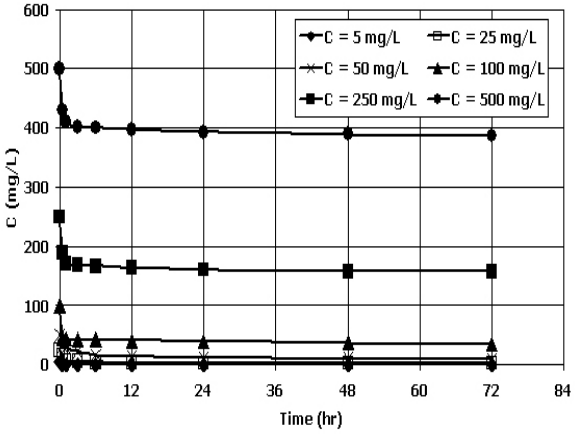
ความสัมพันธ์พบว่าความเข้นข้นของสารละลายทองแดงมีลักษณะของกราฟแสดงแนวโน้มที่จะมีค่าลดลงขึ้นกับเวลา จากรูปที่ 4 – 10 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสารละลายทองแดงเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 48 ชั่วโมง



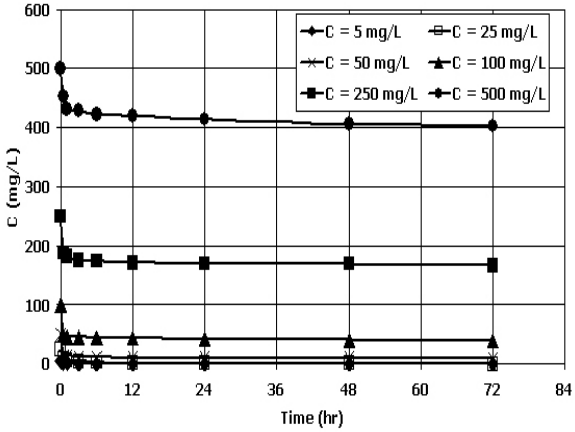
รูปที่ 4 การดูดซับสารละลายทองแดงของดินอุดรธานี



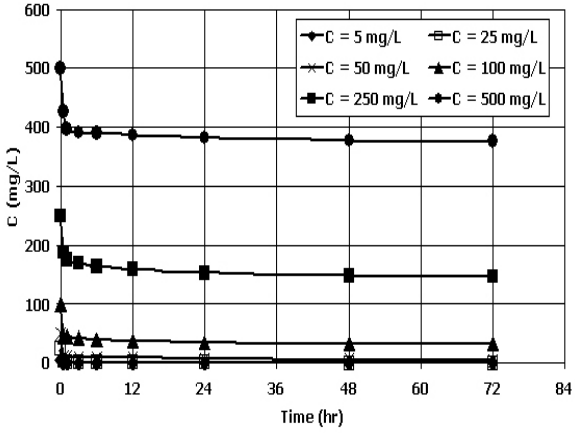
รูปที่ 5 การดูดซับสารละลายทองแดงของดินหนองบัวลำภู



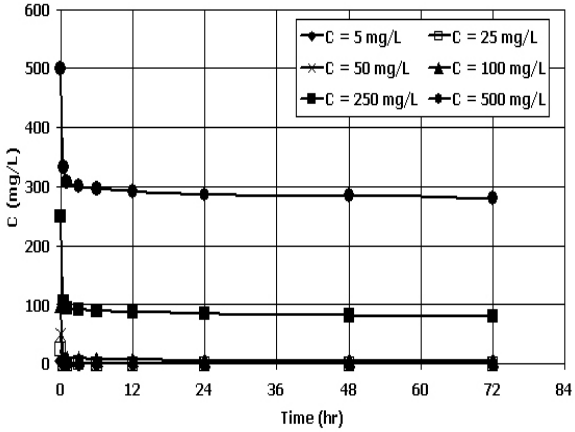
รูปที่ 6 การดูดซับสารละลายทองแดงของดินเลย



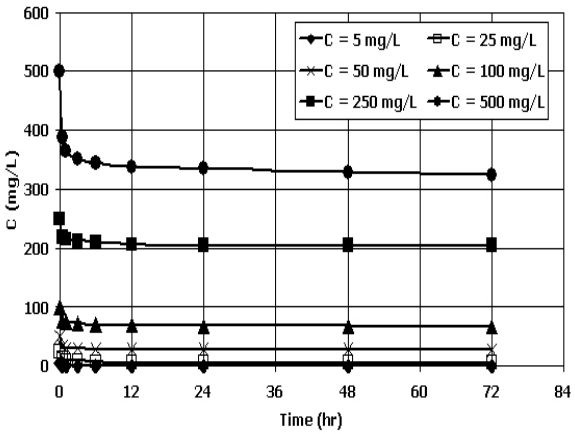
รูปที่ 7 การดูดซับสารละลายทองแดงของดินหนองคาย



รูปที่ 8 การดูดซับสารละลายทองแดงของดินนครพนม

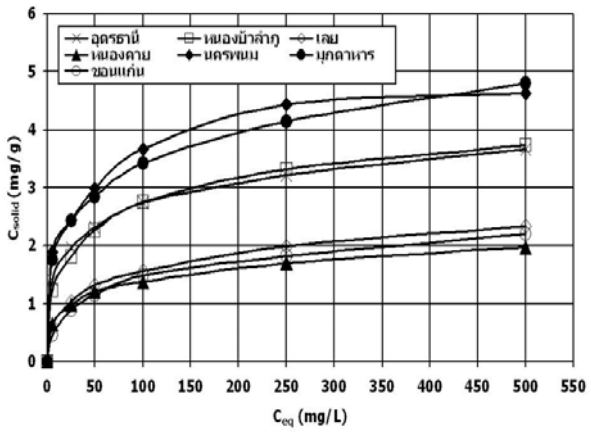


รูปที่ 9 การดูดซับสารละลายทองแดงของดินมุกดาหาร



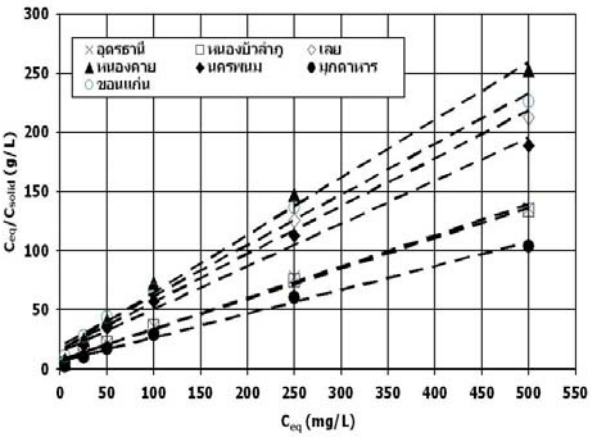
รูปที่ 10 การดูดซับสารละลายทองแดงของดินขอนแก่น

เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (C_{eq}) กับปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (C_{solid}) ของตัวอย่างดินทั้งหมด ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1) พบว่าที่ค่าความเข้มข้นสภาวะสมดุลมีค่าน้อย กราฟจะมีความชันมากและลดลงเรื่อยๆ เมื่อค่าความเข้มข้นสภาวะสมดุลมากขึ้น จากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายทองแดงมากขึ้นจนถึงจุดๆ หนึ่งดินจะมีความสามารถในการดูดซับสารละลายทองแดงได้เล็กน้อยจนถึงไม่สามารถดูดซับสารละลายทองแดงเพิ่มขึ้นได้อีก



รูปที่ 11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง C_{eq} กับ C_{solid} ของตัวอย่างดินเมื่อผสมสารละลายทองแดง

ซึ่งหาค่าไอโซเทอมของแลงเมียร์จากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (C_{eq}) กับความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (C_{eq}) ต่อปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (C_{solid}) ในรูปอัตราส่วน (C_{eq}/C_{solid}) ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งลักษณะกราฟจะเป็นเส้นตรง สามารถหาไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งจะได้ค่า ปริมาณสูงสุดของสารละลายโลหะที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินที่ใช้ดูดซับ (β) และค่าอัตราการดูดซับของแลงเมียร์ (α) แสดงดังตารางที่ 2



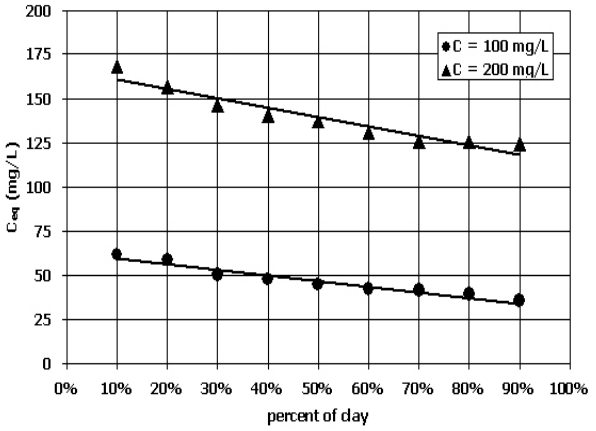
รูปที่ 12 ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของไอโซเทอมแลงเมียร์

Soil sample	α (L/mg)	β (mg/g)	Correlation coefficient (r)
อุดรธานี	0.037	3.786	0.995
หนองบัวลำภู	0.033	3.893	0.996
เลย	0.025	2.468	0.991
หนองคาย	0.031	2.052	0.993
นครพนม	0.026	2.762	0.985
มุกดาหาร	0.032	4.978	0.993
ขอนแก่น	0.022	2.341	0.991

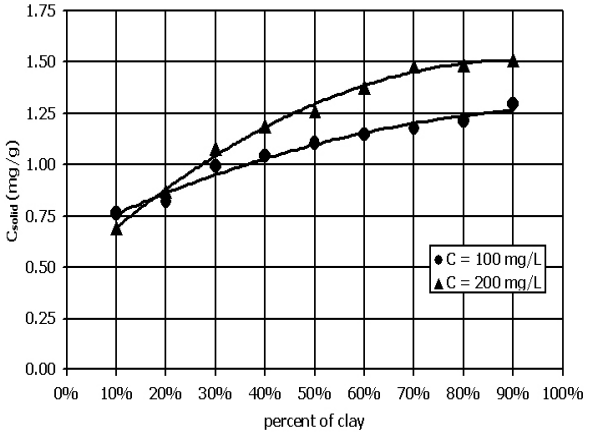
4.2. ผลการทดสอบแบบแบทช์ของดินขอนแก่นเมื่อผสมดินเหนียว

ผลทดสอบการดูดซับสารละลายทองแดงของดินขอนแก่นที่ผสมดินเหนียวที่อัตราส่วนต่างๆ สามารถหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของดินเหนียวกับความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (C_{eq}) พบว่าลักษณะของกราฟแสดงแนวโน้มความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (C_{eq}) จะมีค่าลดลงขึ้นกับปริมาณอัตราส่วนดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณดินเหนียวกับค่า C_{eq} เมื่อผสมสารละลายทองแดง

เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของดินเหนียวกับปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (C_{solid}) จากรูปที่ 14 แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวมีอิทธิพลต่อการดูดซับสารละลายทองแดง โดยที่ปริมาณดินเหนียว 60 เปอร์เซ็นต์ จะมีการดูดซับได้ดี ถ้ามีปริมาณมากกว่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงการดูดซับเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 14 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณดินเหนียวกับค่า C_{solid} เมื่อผสมสารละลายทองแดง

สรุปผลการทดสอบ

การศึกษาคุณสมบัติของดิน 7 ชุด สุ่มเก็บจากแหล่งต่างๆ ในครั้งนี้ ได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดิน ทำการทดสอบแบบแบทช์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสารละลายทองแดง และศึกษาอิทธิพลของดินเหนียวต่อการดูดซับสารละลายทองแดง ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความสามารถในการดูดซับสารละลายทองแดงของดิน 7 ชุด โดยความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการดูดซับ (Time) กับความเข้มข้นของสารละลาย (C) พบว่าความเข้นข้นของสารละลายทองแดงมีลักษณะของกราฟแสดงแนวโน้มที่จะมีค่าลดลงขึ้นกับเวลา การดูดซับสารละลายทองแดงเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 48 ชั่วโมง

2. ผลการทดสอบแบบแบทช์พบว่าปริมาณสูงสุดของสารละลายโลหะที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินที่ใช้ดูดซับ (β) โดยเรียงความสามารถในการดูดซับสารละลายทองแดงของดินทั้ง 7 ชุดจากมากที่สุดไปน้อยที่สุดได้แก่ ดินมุกดาหาร, ดินหนองบัวลำภู, ดินอุดรธานี, ดินนครพนม, ดินเลย, ดินขอนแก่น และดินหนองคาย ตามลำดับ โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์

3. ดินที่มีส่วนประกอบของดินเหนียวมากจะมีค่าปริมาณสูงสุดของสารละลายโลหะที่ถูกดูดซับต่อปริมาณดินที่ใช้ดูดซับ (β) มาก

4. ความสามารถในการดูดซับสารละลายทองแดงจะแปรผันตามปริมาณของดินเหนียว เมื่อผสมดินเหนียวเข้ากับดินขอนแก่น พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายทองแดงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น และปริมาณอัตราส่วนของดินเหนียวที่ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของดินทั้งหมดเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการดูดซับสารละลายทองแดง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น และขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครูบาอาจารย์ ผู้มีพระคุณทุกท่านและคุณณรงค์เดช มหาศิริกุล ที่ได้ช่วยเหลือทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] B. J. Alloway., “Heavy metal in soil”, Blackie academic and professional, 2nd Ed, 1995.

[2] P. B. Bedient, H.S. Rifai, C.J. Newell, “Groundwater Contamination”, Prentice-Hall, 1994.

[3] C. W. Fetter, “Contaminant Hydrogeology”, Prentice-Hall, 1999.

[4] เกรียงศักดิ์ จีนด้วง และศุภเกียรติ ศรีพนมยากร, “การดูดซับและการกระจายตัวของสังกะสี ทองแดง และนิเกิล ในดินจากแถบภาคกลางของประเทศไทย”, การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, ฉบับที่ 5 พ.ศ. 2549 หน้า 1-9.

[5] ณรงค์เดช มหาศิริกุล, “การศึกษาในห้องปฏิบัติการเพื่อวัดปริมาณสารอันตรายปนเปื้อนในดินที่พบในจังหวัดขอนแก่น”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, พ.ศ. 2553.

[6] ธนิต เฉลิมยานนท์ และคณะ, “พารามิเตอร์การเคลื่อนที่และการดูดโลหะหนักติดผิวของดินลูกรังบดอัด”, วิศวกรรมสาร มข., ฉบับที่ 34 พ.ศ. 2550 หน้า 73-87.

[7] นันทนิตย์ เจริญไชสง และคณะ, “สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านและการดูดติดผิวของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวสงขลา”, วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย, ฉบับที่ 20 พ.ศ. 2549 หน้า 139-149.