

พารามิเตอร์การเคลื่อนที่และ การดูดโลหะหนักติดผิวของดินลูกรังบดอัด*

ธนิต เกลิมยานนท์¹⁾ สุรพล อารีย์กุล²⁾ และ นันทนิตย์ เจริญไธสง³⁾

¹⁾ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 90112

²⁾ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 90112

³⁾ นักศึกษาระดับปริญญาตรี คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 90112

Email : tanit.c@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบหาคุณสมบัติหลายประการของดินลูกรังบดอัดโดยเน้นที่พารามิเตอร์การเคลื่อนที่และการดูดติดผิวของโลหะหนัก ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า ดินลูกรังเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุต่ำ และมีความเป็นกรดเล็กน้อย โดยมีค่า pH เท่ากับ 5.5 ดินลูกรังมีสีน้ำตาลแดงเนื่องจากมีปริมาณเหล็กสูง ค่าความหนาแน่นสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดเท่ากับ 1.7 g/cm^3 และ 18% ตามลำดับ ผลการทดสอบแบบแบทช์สอดคล้องกับสมการไอโซเทอมของ Freundlich ความสามารถดูดติดผิวของดินลูกรังเมื่อทดสอบกับสารละลายโลหะหนักเรียงจากมากได้แก่ Cr^{3+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , and Cd^{2+} ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังบดอัดมีค่าจาก 4.0×10^{-8} ถึง $5.0 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในระยะยาวพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังบดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทดสอบด้วยสารละลายโครเมียมที่มีความเข้มข้นมากกว่า 0.001 M. Breakthrough ของสารละลายโลหะหนักจากการทดลองแบบสดมภ์มีผลสอดคล้องกับค่าความสามารถดูดติดผิวที่ได้จากการทดสอบแบบแบทช์ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และแฟกเตอร์ความหน่วงถูกคำนวณโดยการฟิต Breakthrough curves กับสมการการเคลื่อนที่ของสารละลายในดิน และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบความหนาของชั้นกันซึมในสถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอยได้

คำสำคัญ : โลหะหนัก, สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน, แฟกเตอร์ความหน่วง, สัมประสิทธิ์การแพร่, ดินลูกรัง, การดูดติดผิว, ชั้นกันซึม

* รับต้นฉบับเมื่อวันที่ 5 ตุลาคม 2549 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 8 มกราคม 2550

Transport Parameters and Heavy Metal Adsorption of a Compacted Lateritic Soil^{*}

Tanit Chalermyanont¹⁾ Surapon Arrykul²⁾ and Nantanit Charoenthaisong³⁾

¹⁾ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University 901112

²⁾ Associate Professor, Department of Mining and Materials, Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University 901112

³⁾ Graduate Student, Faculty of Environmental Management, Prince of Songkla University 901112

E-mail: tanit.c@psu.ac.th

ABSTRACT

A series of tests were conducted to assess properties of Kor Hong lateritic soil, particularly transport parameters and heavy metal adsorption. Experimental results indicate that the soil was low plasticity clay with low cation exchange capacity and slightly acidic with pH of 5.5. The soil was reddish brown in color due to high iron content. Maximum dry density and optimum water content of the soil were 1.7 g/cm³ and 18%, respectively. Freundlich isotherm was found to fit well with batch adsorption test results. Heavy metal adsorption capacities of the soil ranked from the highest were Cr³⁺, Pb²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺, and Cd²⁺, respectively. Hydraulic conductivity of the soil ranged from 4.0x10⁻⁸ to 5.0x10⁻⁸ cm/s when permeated with deionized water. Long-term hydraulic conductivity test results show that the hydraulic conductivities increased with time when permeated with chromium solutions having concentrations greater than 0.001 M. Breakthrough points of heavy metal solutions obtained from column tests were consistent with adsorption capacities obtained from batch adsorption tests. Diffusion coefficient and retardation factor of the soil were calculated by fitting breakthrough curves with a transport equation. These parameters can be used for calculating a thickness of landfill liners.

Keywords : heavy metal, hydraulic conductivity, retardation factor, diffusion coefficient, lateritic soil, adsorption, landfill liner

^{*} Original manuscript submitted: October 5, 2005 and Final manuscript received: January 8, 2007

บทนำ

การขยายตัวทางอุตสาหกรรมและการทำเหมืองแร่ทำให้เกิดการนำโลหะหนักเข้าสู่สิ่งแวดล้อมทั้งในอากาศ ในน้ำ และในดิน นอกจากนั้นโลหะหนักเช่น Cd^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} และ Cr^{3+} สามารถพบได้ในน้ำชะมูลฝอยชุมชน (USEPA 1986, Ou 1989) ขยะชุมชน ขยะอุตสาหกรรม หรือขยะอันตรายในสถานที่ฝังกลบมูลฝอยมีน้ำชะมูลฝอยที่อาจรั่วซึมเป็นสารปนเปื้อนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้ (Ernst 1995) ชั้นกันซึมซึ่งก่อสร้างจากวัสดุที่บดน้ำในบ่อฝังกลบมูลฝอยทำหน้าที่ป้องกันการไหลของสารปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำชะมูลฝอยลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน การใช้ดินเหนียวบดอัดซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติและมีราคาถูกเมื่อสามารถหาได้ในท้องถิ่นเป็นวัสดุกันซึมในสถานที่ฝังกลบจะช่วยในการลดการเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนักได้ในน้ำชะมูลฝอยได้ (Li และ Li 2001) ดินเหนียวบดอัดที่เหมาะสมกับการใช้เป็นวัสดุกันซึมต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity, K) ต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s (Gleason และ คณะ 1997) นอกจากนั้น คุณสมบัติทางเคมีบางประการทางเคมีของดิน ทำให้เกิดการหน่วง (Retardation) และการแพร่กระจาย (Diffusion) ของสารปนเปื้อนในน้ำได้ พารามิเตอร์ที่แสดงถึงคุณสมบัติดังกล่าวเรียกว่า พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ (Transport Parameters) อันได้แก่ สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient, D), แฟกเตอร์การหน่วง (Retardation Factor, R)

การเลือกใช้วัสดุกันซึมจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมหลายด้าน ดินเหนียวท้องถิ่นที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติก็สามารถนำมาใช้เป็นชั้นกันซึมตามธรรมชาติได้ (Amatya และ Takemura, 2002) ดินเหนียวที่เหมาะสมที่จะทำเป็นชั้นกันซึมสำหรับสารละลายโลหะหนักได้ต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ต้องสามารถมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านที่คงที่เมื่อสารละลายโลหะหนักไหลผ่าน และต้องมีความสามารถที่จะหน่วงการเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนักได้ (Li และ Li 2001) ในประเทศไทยนิยมใช้ดินลูกรัง (Lateritic soil) เป็นดินถมสำหรับงานก่อสร้างถนนเนื่องจากดินลูกรังหาได้ง่ายในท้องถิ่นและสามารถนำมาบดอัดให้แน่นได้ดี การวิจัยครั้งนี้ ได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดินลูกรัง โดยทำการทดลองแบบแบทช์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก ทำการทดลองแบบสแตมภ์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ และ ทำการทดลองหาผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักต่อค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน เพื่อนำไปประกอบการศึกษาความเหมาะสมของการใช้ดินลูกรังบดอัดเป็นชั้นกันซึมสำหรับสารละลายโลหะหนัก

การเคลื่อนที่ของสารละลายในดิน

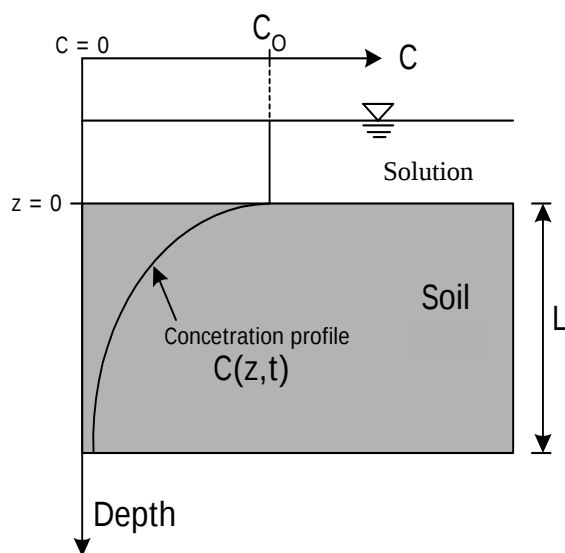
การเคลื่อนที่ของสารละลายอนินทรีย์ในดินขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่แบบการพา (Advective transport) การเคลื่อนที่แบบการแพร่ (Diffusive transport) และปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างดินกับสารละลาย เช่น การดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น โพรไฟล์ของความเข้มข้น (รูปที่ 1) แสดงความเข้มข้นของสารละลาย (C) ที่ความลึก (z) และเวลา (t) ในดิน ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสมการการเคลื่อนที่ของสารละลายในดินได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{v_s}{R} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1)$$

เมื่อ v_s คืออัตราการไหลซึม (Seepage velocity) = Ki/n โดย i คือความชันชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) และ n คือความพรุนของดิน คำตอบของสมการที่ 1 ถูกพัฒนาโดย Ogata และ Banks (1961) แล้วถูกดัดแปลงให้เหมาะสมกับการใช้งานของชั้นกันซึมโดย Shackelford (1990) ในรูปของ อัตราส่วนของความเข้มข้น (C) ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial concentration, C_0) หรือที่เรียกว่า ความเข้มข้นสัมพัทธ์ (Relative concentration) ดังต่อไปนี้

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

โดยที่ T_R คือ เฟคเตอร์ของเวลา (Time Factor) = $\frac{v_s t}{Rz}$, P_L คือ พิกเลย์นัมเบอร์ (Peclet Number) = $\frac{v_s z}{D}$, $R = 1 + \frac{\rho_d K_p}{n}$, ρ_d คือ ความหนาแน่นแห้งของดิน และ K_p คือสัมประสิทธิ์พาร์ทิชัน (Partitioning coefficient)



รูปที่ 1 ความเข้มข้นของสารละลายในดิน

วัสดุและวิธีการศึกษา

ดินลูกรัง

ดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินลูกรังจากเขาคองหงส์ สวนสาธารณะนครหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยดินลูกรังคองหงส์เป็นดินที่เกิดในที่ (Residual soil) ซึ่งเกิดจากการผุพังในที่ของหินเนื่องจากกระบวนการเคมี-ฟิสิกส์ (Osinubi และ Nwaiwu 2006) ดินลูกรังคองหงส์มีสีน้ำตาลแดง ดินลูกรังตัวอย่างได้เก็บจากความลึกประมาณ 0.5 – 1.0 เมตรจากผิวดินเพื่อหลีกเลี่ยงวัสดุอินทรีย์อื่นๆ ที่ผิวดิน และถูกอบแห้ง เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการทดลองต่อไป

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

การหาคุณสมบัติพื้นฐานของดินลูกรังประกอบด้วย การทดสอบหา ค่า Atterberg's limits (ASTM D4318) อันได้แก่ พิกัดความเหลวของดิน (Liquid limit) และ พิกัดพลาสติก (Plastic limit) ค่า pH ค่าปริมาณสารอินทรีย์ ค่าประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable cations) ค่าส่วนประกอบของแร่ธาตุต่างๆโดยวิธี X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัด โดยวิธีบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor, ASTM D698) และ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน โดยวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน (Falling head method, ASTM D2434) หรือ วิธีระดับน้ำคงที่ (Constant head method, ASTM D5084) โดยใช้ที่ใส่ตัวอย่างผนังแข็ง (Rigid wall permeameter) ในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านได้ใช้ตัวอย่างดินลูกรังซึ่งถูกบดอัดโดยวิธีมาตรฐานโดยใช้ปริมาณน้ำมากกว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม 2% ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำที่สุดตามคำแนะนำของ Benson and Daneil (1990).

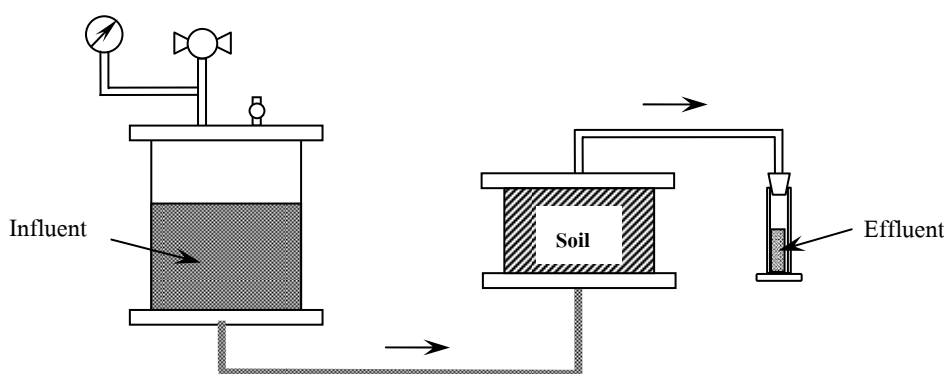
การทดสอบแบบแบทช์

การทดสอบการดูดติดผิวแบบแบทช์ (Batch adsorption test) ถูกนำมาใช้หาคุณสมบัติการดูดติดผิวของดินลูกรังคองหงส์ต่อสารละลายโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ แคดเมียม, ตะกั่ว, สังกะสี, โครเมียม และ นิกเกิล จากเตรียมโดยการละลาย CdCl_2 , PbCl_2 , ZnCl_2 , $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยน้ำ DI (Deionized water) การทดลองเริ่มต้นจากนำดินลูกรังคองหงส์ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 หน้า 1 g มาใส่ในขวด Centrifuge ขนาด 30 mL หลังจากนั้นนำสารละลายโลหะหนักปริมาตร 25 mL ที่เตรียมไว้มาผสม แล้วนำไปเขย่าทันที ด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 300 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้โลหะหนักถูกดูดติดที่ผิวดินลูกรัง หลังจากนั้นจะนำดินผสมสารละลายไปปั่นดินและสารละลายโลหะหนักแยกชั้นกัน ด้วยเครื่อง Centrifuge Sorwall Super T21 ที่ความเร็วรอบประมาณ 4,000-8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20°C แล้วนำสารละลายโลหะหนักที่แยกจากชั้นดินอยู่ด้านบนของหลอดทดลอง ไปเจือจางความเข้มข้นแล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้นสุดท้ายของโลหะหนักด้วยเครื่อง Flame atomic absorption spectrophotometer ยี่ห้อ Varian รุ่น 220A Australia หลังจากนั้นทำการทดลอง

แบบแบทช์ซ้ำโดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก โดยความเข้มข้นที่ใช้จะอยู่ในช่วง 0.0089 ถึง 20.3839 mmol/L หรือ 1 ถึง 4,000 mg/L (Li และ Li, 2001) สำหรับแต่ละชนิดของสารละลายจะใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันประมาณ 12 เท่า ดังนั้นการศึกษาค้างนี้ได้ทำการทดลองแบบแบทช์ทั้งหมดรวม 60 ครั้ง

การทดสอบแบบสดมภ์

การทดสอบแบบสดมภ์ถูกนำมาใช้หาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ โดยเตรียมตัวอย่างดินลูกรังคองกรีต โดยใช้ปริมาณความชื้นที่มากกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม 2% เก็บไว้ในถุงพลาสติก 24 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นกระจายทั่วมวลดิน จากนั้นนำดินไปบดอัดตามมาตรฐาน Standard Proctor compaction (ASTM D698) ใน Mold ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 2 นิ้ว โดยใช้เครื่องบดอัดอัตโนมัติ (ELE Automatic compactor) จากนั้นนำดินที่บดอัดแล้วพร้อม Mold ไปปิดด้วยแผ่นสแตนเลสที่มีวาล์วให้น้ำเข้าออกทั้งด้านบนและด้านล่างแล้วเติมน้ำกลั่นให้ไหลผ่านเข้าไปในดินจากด้านล่างและไหลออกทางด้านบน โดย Mold ที่ใช้ในการบดอัดทำหน้าที่เป็นสดมภ์ ภาพแสดงการทดสอบสดมภ์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 สำหรับการทดสอบสดมภ์ในการศึกษาค้างนี้มีการทดลองด้วยน้ำ DI ก่อนเปลี่ยนเป็นสารละลายโลหะหนัก เนื่องจากการเติมน้ำก่อนเติมสารละลายโลหะหนักจะทำให้ดินตัวอย่างมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำกว่า การทดลองด้วยสารละลายโลหะหนักเพียงอย่างเดียวตามหลักการของ First exposure effect (Fernandez และ Quigley, 1985)



รูปที่ 2 อุปกรณ์การทดสอบแบบสดมภ์

เนื่องจากดินลูกรังคองกรีตมีสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำและมีการหน่วงสารละลายโลหะหนัก จึงมีการใช้ความดันที่สูงพอเพื่อให้สารละลายไหลออกจากตัวอย่างในเวลาที่เหมาะสม โดยใช้ความดันคงที่เท่ากับ 50 kPa หรือเทียบเท่ากับค่าความชันชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) เท่ากับ 88.65 (Cabral 1992) การปรับความดันเริ่มต้นจากเพิ่มความดันครั้งละ 10 kPa รวม 5 ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะรักษาความดันไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อไล่อากาศในดินและเพื่อให้ น้ำไหลเข้าไปในตัวอย่างดินด้วยอัตราเร็วคงที่ ตวงปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านดินตัวอย่างออกมาเทียบกับเวลา แล้วนำไป

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านโดยวิธีความดันคงที่ รอจนให้อัตราการไหลของน้ำที่เข้าไปในตัวอย่างดินเท่ากับอัตราการไหลของน้ำออกดิน และค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านคงที่ แล้วจึงเปลี่ยนสารที่ไหลผ่านดินตัวอย่างจากน้ำเป็นสารละลายโลหะหนัก

สารละลายโลหะหนักที่ใช้เป็นสารละลายผสม ซึ่งเตรียมจากการละลาย CdCl_2 , PbCl_2 , ZnCl_2 และ $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยน้ำ DI แล้วนำมาผสมกัน และโดยในสารละลายผสมนี้มีความเข้มข้นของ แคดเมียม, ตะกั่ว, สังกะสี และ นิกเกิล อย่างละ 0.001 M หรือ 112.42 mg/L, 207.26 mg/L, 65.39 mg/L, และ 58.87 mg/L ตามลำดับ หลังการเติมสารละลายแล้วจึงทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างดินออกมา (Effluent) ตามเวลา โดยเก็บทุกๆ 2-3 วัน ทำการรักษาตัวอย่างน้ำด้วยการเติมกรด HNO_3 โดยให้มี pH ของตัวอย่างน้ำต่ำกว่า 2 แล้วเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง Flame atomic absorption spectrophotometer ยี่ห้อ Varian รุ่น 220A Australia ต่อไป

การทดสอบความต้านทานสารเคมี

การทดลองหาความต้านทานสารเคมีของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรัง มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบว่า ดินลูกรังจะมีความสามารถทนสารละลายโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูงมากเท่าไรก่อนที่จะค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านจะสูงขึ้นจนไม่สามารถจะใช้เป็นชั้นกันซึมได้ การตรวจสอบความต้านทานสารเคมีของดินลูกรังทำได้โดยเตรียมดินตัวอย่างโดยวิธีเดียวกับการเตรียมดินตัวอย่างในการทำการทดสอบสมรรถนะ Mold สูง 4 นิ้ว นำดินที่บดอัดแล้วไปทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน โดยวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน โดย Mold ที่ใช้ในการบดอัดดินทำหน้าที่เป็นที่ใส่ตัวอย่างผนังแข็ง ในการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ทำได้โดยให้น้ำ DI ไหลผ่านดินตัวอย่างก่อนจนกระทั่งค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านที่คำนวณได้มีค่าคงที่ จึงทำการเปลี่ยนสารที่ใช้ทดสอบมาเป็นสารละลาย Cr^{3+} สาเหตุที่เลือกสารละลาย Cr^{3+} ในการทดสอบนี้ก็เพราะว่า โลหะหนักที่มีประจุบวกมากจะทำให้ Diffused double layer ซึ่งเป็นแฟกเตอร์สำคัญที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีขนาดเล็กลง ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะหนักที่มีประจุน้อยกว่า (Mitchell 1976, Mathew และ Rao 1997, Jo และ คณะ 2001) ค่าความชันชลศาสตร์ที่ใช้ในการทดสอบโดยวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยนนี้ไม่เกิน 20 ดินตัวอย่างทั้งหมด 5 ตัวอย่าง ถูกทดลองกับสารละลายโครเมียมที่มีความเข้มข้น 5 ระดับ จาก 0.0001 M, 0.001 M, 0.01 M, 0.1 M และ 1.0 M ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินทั้ง 5 ตัวอย่างถูกบันทึกค่าทุกๆ 2 – 3 วัน ในช่วงเวลาทดสอบรวมประมาณ 500 วัน

ผลการศึกษา

คุณสมบัติของดินลูกรังคองหงส์

ผลการทดสอบหาคุณสมบัติของดินลูกรังคองหงส์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ดินลูกรังคองหงส์มีสีน้ำตาลแดง มีค่าพิกัดความเหลวและดัชนีความเหลวเท่ากับ 43.0% และ 21.8% ตามลำดับ ปริมาณดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 56 % ดังนั้นดินลูกรังคองหงส์สามารถจำแนกได้เป็น ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity clay, CL) ตามการจำแนกแบบ Unified soil classification system ผลการทดสอบการบดอัดพบว่า ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) และค่าความปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum water content) เท่ากับ 1.7 g/cm³ และ 18.0% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำแนกชนิดของดิน เนื่องจากดินเหนียวมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ต่ำและมีค่าความปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สูง

Soil Properties	
USCS Classification	CL
Color	Reddish brown
Liquid limit (L.L.) (%)	43.00
Plasticity index (P.I.) (%)	21.80
Percent passing sieve #200	56.00
Maximum dry density (g/cm ³)	1.70
Optimum water content (%)	18.00
pH	5.52
Organic content (%w/w)	4.92
SO ₄ ²⁻ (mg/kg)	822.82
Cl ⁻ (mg/kg)	100.75
Exchangeable Cations	
Na ⁺ (meq/100g)	0.87
K ⁺ (meq/100g)	0.26
Ca ²⁺ (meq/100g)	3.49
Mg ²⁺ (meq/100g)	1.00
Chemical Compositions	
SiO ₂ (%)	45.37
Al ₂ O ₃ (%)	28.69
Fe ₂ O ₃ (%)	17.32
K ₂ O (%)	6.46
SO ₃ (%)	0.18
CaO (%)	0.36

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินลูกรังคองหงส์

ค่า pH ของดินลูกรังคองหังมีค่าเท่ากับ 5.52 แสดงให้เห็นว่าดินมีลักษณะเป็นกรดเล็กน้อย และมีปริมาณสารอินทรีย์เล็กน้อยที่ประมาณ 4.9% ค่าความสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกค่อนข้างต่ำสังเกตได้จากค่าประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable cation) ของดินลูกรังที่มีค่าน้อย (ตารางที่ 1) ผลการตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบทางเคมี พบว่า ดินลูกรังประกอบด้วย Silica และ Alumina เป็นหลัก และมีปริมาณเหล็กมากเนื่องจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีจากหินจนกลายเป็นดิน

คุณสมบัติการดูดติดผิว

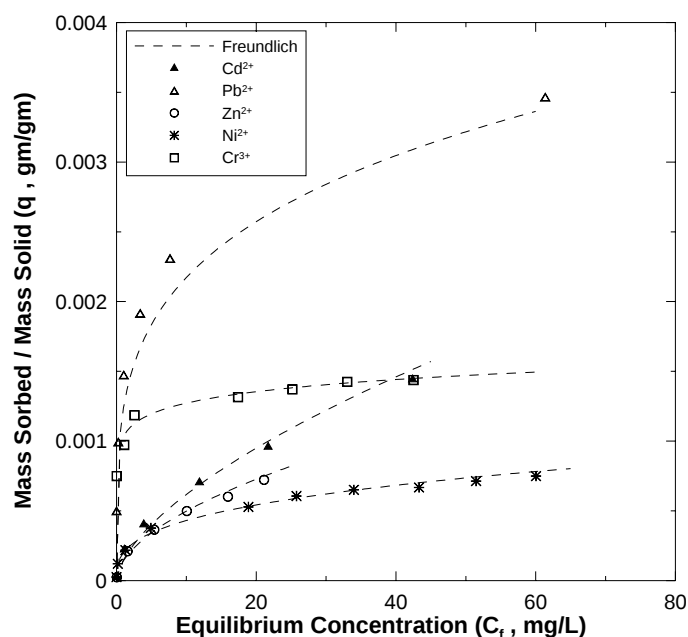
ผลการทดลองจากการทดลองแบบแบทช์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติการดูดติดผิวของดินลูกรัง (รูปที่ 3) ได้แสดงไว้ในรูปของไอโซเทอม ซึ่งแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของมวลโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวต่อมวลของดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบ (q) และความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโลหะหนักเมื่อกระบวนการดูดติดผิวสมดุลแล้ว (C_f) สมการไอโซเทอมของ Freundlich ถูกใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง q และ C_f ของผลการทดลองแบบแบทช์ พารามิเตอร์ของ Freundlich ที่ได้จากการฟิต อันได้แก่ สมประสิทธิ์พาร์ทิชันของ Freundlich (K_F) และ Correction factor ($1/n$) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 ไอโซเทอมของดินลูกรังกับสารละลายโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด สอดคล้องอย่างดีมากกับสมการของ Freundlich โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.966 ถึง 0.997

สำหรับสารละลายโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่ำ ($C_f < 5 \text{ mg/L}$) ไอโซเทอมในส่วนนี้จะประมาณได้ว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรง (Fetter, 1993) เมื่อฟิตไอโซเทอมส่วนนี้ด้วยสมการเส้นตรง ความชันของสมการเส้นตรงที่ได้คือ สมประสิทธิ์พาร์ทิชัน (K_p) และได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ในขณะที่ค่าสามารถในการดูดติดผิวของดินลูกรังได้แสดงไว้ในเทอมของค่า Adsorption capacity ซึ่งประมาณจากค่า q ที่สูงที่สุดในแต่ละการทดสอบ ค่า Adsorption capacity ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ค่า Adsorption capacity แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการดูดโลหะหนักติดผิวของดินลูกรังจากมากที่สุดไปน้อยที่สุดในหน่วย $\text{meq}/100\text{g}$ มีได้แก่ Cr^{3+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , และ Cd^{2+} ตามลำดับ

พารามิเตอร์การเคลื่อนที่

สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังกับเวลาหรือ Pore volume of effluent (PVE) จากการทดสอบแบบสดมภ์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 โดยใช้ค่า DI ในการไหลซึมผ่านดินลูกรังในตอนเริ่มการทดลองแล้วเปลี่ยนเป็นสารละลายผสมผ่านภายหลัง ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังที่ไหลผ่านด้วยน้ำ มีค่าอยู่ในช่วง $4.30 \times 10^{-8} - 5.0 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ เมื่อครบสองสัปดาห์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและออกจากตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน จึงเปลี่ยนเป็นสารละลายผสม ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนคงที่และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $7.58 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ จนจบการทดลองที่ 191 วัน หรือ 58 PVE



รูปที่ 3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวด้วยดินลูกรังคองหงส์

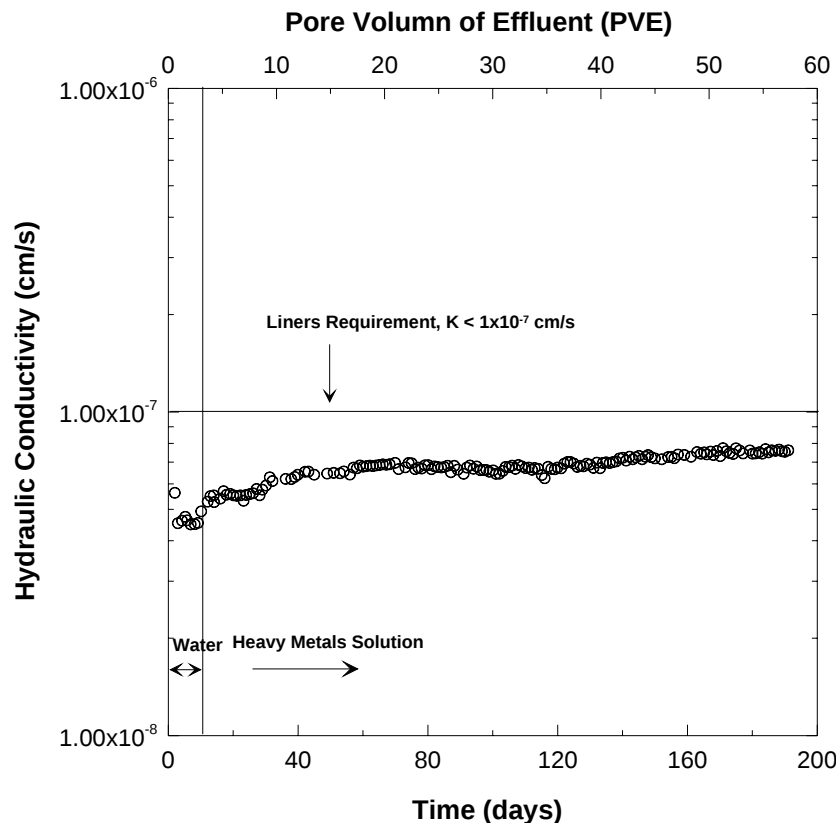
Heavy Metal Solution	Adsorption Isotherm				Adsorption Capacity (meq/100 g)
	Freundlich			Linear	
	K_F (L/kg)	$1/n$	R^2	K_p (L/kg)	
Cr^{3+}	1,033.95	0.09	0.9791	43.14	8.18
Cd^{2+}	147.70	0.62	0.9854	59.27	1.25
Pb^{2+}	1,238.51	0.24	0.9666	19.26	4.20
Zn^{2+}	141.93	0.55	0.9963	49.51	1.52
Ni^{2+}	199.99	0.33	0.9976	19.15	2.11

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของไอโซเทอมของดินลูกรังคองหงส์

สัมประสิทธิ์การแพร่และแฟคเตอร์ความหน่วง

สารละลายที่ไหลผ่านดินลูกรังออกมาจากจะนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านแล้ว สารละลายนี้ยังถูกนำไปหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักเทียบกับเวลา (C_t) ความสัมพันธ์ระหว่าง C_t/C_0 กับเวลาที่เรียกว่า Breakthrough curves ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 ลำดับการ Breakthrough

(เริ่มตรวจสอบได้ว่ามีความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำที่ไหลออกจากดิน) จากเร็วที่สุดไปช้าที่สุดได้แก่ Zn^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} และ Pb^{2+} ตามลำดับ โดยในภาพรวมแล้ว Zn^{2+} , Cd^{2+} , และ Ni^{2+} มี Breakthrough curves ที่คล้ายคลึงกัน ในขณะที่ Pb^{2+} มี Breakthrough ที่ช้าที่สุดและห่างจากกลุ่มแรกมาก

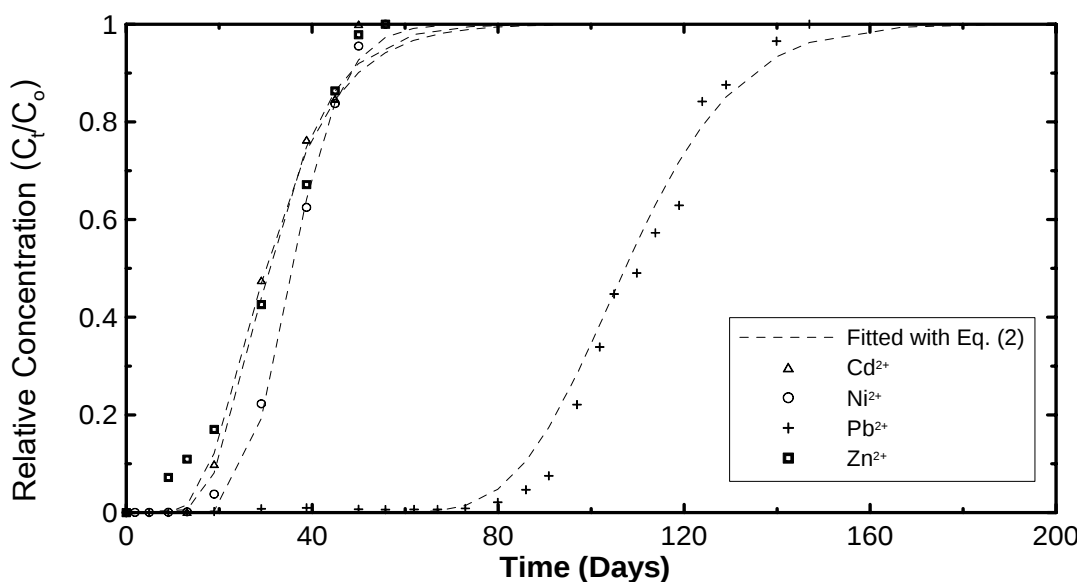


รูปที่ 4 สมบัติการยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังคองหส์

เมื่อฟิต Breakthrough curves โดยการ Trial and error ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ D และ R จน Breakthrough ที่ฟิตโดยแทนค่า D และ R ลงในสมการที่ 2 ให้ผลสอดคล้องกับ Breakthrough curves จากการทดลอง ซึ่งดัชนีที่ใช้บ่งบอกถึงความสอดคล้องนี้คือ ค่า Mean square error (MSE) ที่น้อยที่สุด เส้นประในรูปที่ 5 แสดง Breakthrough curve ที่ได้จากสมการที่ 2 ค่า D , R ที่สอดคล้องกับผลการทดลองแบบสดมภ์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของดินลูกรังคองหส์และสารละลายโลหะหนัก ที่แสดงไว้ในตารางที่ 3 สำหรับค่า R ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการหน่วงโลหะหนักของดินลูกรัง พบว่า ค่า R ของ Pb^{2+} มีค่ามากที่สุด เนื่องจาก Breakthrough ออกมาช้าที่สุด ในขณะที่ค่า R ของ Zn^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} มีค่าใกล้เคียงกันและน้อยกว่าค่า R ของ Pb^{2+} เนื่องจากสารละลายโลหะหนักทั้งสามนี้ Breakthrough ออกมาก่อน ผลของค่า R ที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการทดสอบแบบแบทช์ โดย Pb^{2+} ซึ่งมีค่า Adsorption

capacity มากที่สุดจึงถูกดูดติดผิวได้มากที่สุด ทำให้ Breakthrough ออกจากดินลูกรังตัวอย่างในการทดสอบแบบ Column ช้าที่สุด



รูปที่ 5 Breakthrough curves ของดินลูกรังคองหังส์จากการทดสอบ Column test

Heavy Metal	D (cm ² /s)	R	MSE
Cd ²⁺	5.014 x 10 ⁻⁶	7.0	0.001425
Ni ²⁺	2.160 x 10 ⁻⁶	7.6	0.000396
Pb ²⁺	1.943 x 10 ⁻⁵	36.0	0.001712
Zn ²⁺	6.164 x 10 ⁻⁶	6.5	0.004094

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของดินลูกรังคองหังส์

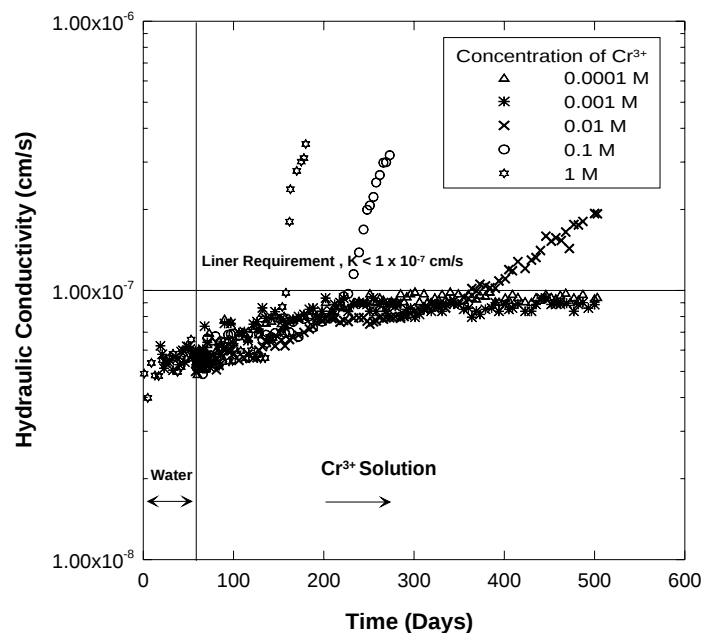
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ซึ่งแสดงการแพร่กระจายในระดับโมเลกุลของสารละลายโลหะหนักในดินลูกรัง พบว่ามีค่าในช่วง 10^{-5} ถึง 10^{-6} cm²/s แสดงให้เห็นถึง การเคลื่อนที่แบบการแพร่ของสารละลายโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ซึ่งสอดคล้องกับรูปร่างของ Breakthrough curves ทั้ง 4 เส้น เมื่อพิจารณาค่า D อย่างละเอียดพบว่า ค่า D ของ Pb²⁺ มีค่ามากที่สุดแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่แบบการแพร่ที่มากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับความชันของ Breakthrough curves ที่น้อยที่สุดในทางตรงกันข้าม ค่า D ของ Ni²⁺ มีค่าน้อยที่สุดแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่แบบการแพร่ที่น้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับความชันของ Breakthrough curves ที่มากที่สุด ส่วนค่า D ของ Cd²⁺ และ Zn²⁺ มีค่าใกล้เคียงกันและมีรูปร่างของ Breakthrough curves ที่คล้ายคลึงกัน

ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการทดสอบแบบสดมภ์ของดินลูกรังอีกตัวอย่างหนึ่งกับสารละลาย Cr³⁺ แต่ไม่มีการตรวจพบ Cr³⁺ ในน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างตลอดช่วงระยะเวลาการทดสอบ 240 วัน จึงไม่

สามารถคำนวณหาค่า D และ R ของ Cr^{3+} ได้ เหตุผลที่ไม่มี Breakthrough ของ Cr^{3+} น่าจะมีสาเหตุจากความจริงที่ว่า Cr^{3+} มีค่า R ที่สูงกว่าโลหะหนักอื่นที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ทำให้มีการหน่วงไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ของ Cr^{3+} ออกมาจากตัวอย่างดินในช่วง 240 วันของการทดสอบ ผลการทดสอบแบบแบทช์สอดคล้องกับสมมุติฐานดังกล่าว โดยค่า Adsorption capacity ของ Cr^{3+} มีค่าสูงสุดในจำนวนสารละลายโลหะหนักที่ใช้ทดลอง (ตารางที่ 2)

ความต้านทานสารเคมี

ดินลูกรังบดอัด 5 ตัวอย่างที่ถูกไหลผ่านโดยสารละลาย Cr^{3+} ที่มีความเข้มข้น ตั้งแต่ 0.0001 M, 0.001 M, 0.01 M, 0.1 M, และ 1 M โดยใช้ระยะเวลาในการทดลองทั้งหมดประมาณ 500 วัน ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังตัวอย่างทั้ง 5 เมื่อทดสอบโดยน้ำ DI มีค่าประมาณ 5×10^{-8} cm/s ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านและ เวลาได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังเมื่อทดลองด้วยน้ำ DI และสารละลายโครเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0.001 M มีค่าคงที่ในช่วง 8×10^{-8} ถึง 9×10^{-8} cm/s เมื่อทดสอบนานประมาณ 500 วัน ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังที่ทดสอบโดยของสารละลายโครเมียมที่ความเข้มข้น 0.01 M, 0.1 M และ 1 M เมื่อมีสารละลาย Cr^{3+} ไหลผ่านนานขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่าค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆจนสูงกว่า 1×10^{-7} cm/s ในช่วงเวลาของการทดสอบที่ 370, 200 และ 180 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมต่อค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรัง

ผลการทดลองในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ดินลูกรังบดอัดเมื่อมีสารเคมีไหลผ่านทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเพิ่มขึ้น โดยอัตราหรือระยะเวลาที่ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเพิ่มขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายที่ไหลผ่าน ถ้าสารละลายที่ไหลผ่านมีความเข้มข้นสูง ไหลผ่านก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเพิ่มขึ้นสูงอย่างรวดเร็ว จนทำให้สูงกว่าค่ามาตรฐานของชั้นกันซึมที่ 1×10^{-7} cm/s ทั้งนี้อาจจะอธิบายได้ว่า สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง จะไปทำลาย Diffused double layer หรือแผ่นฟิล์มบางๆ รอบอนุภาคของส่วนที่เป็นดินเหนียวในดินลูกรัง ทำให้ทางเดินของน้ำกว้างขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านสูงขึ้น ผลจากการทดลองนี้อาจใช้เตือนสำหรับการนำดินลูกรังไปใช้เป็นชั้นกันซึมสำหรับรองรับสารละลายโลหะหนัก ซึ่งอาจมีปัญหาการรั่วซึมในระยะยาว เนื่องจากผลของความเข้มข้นของสารเคมีดังกล่าว

สรุป

การศึกษาคุณสมบัติของดินลูกรังบดอัดเนื่องจากการไหลซึมผ่านของสารละลายโลหะหนัก ในครั้งนี้ ได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดินลูกรัง ทำการทดลองแบบแบทช์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับ การทดลองแบบสแตมภ์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ และทำการทดลองหาความต้านทานสารละลายโลหะหนักของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ความสามารถในการดูดซับสารละลายโลหะหนักมาติดผิวของดินลูกรัง จากมากที่สุดไปน้อยที่สุดได้แก่ Cr^{3+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , และ Cd^{2+} ตามลำดับ โดยไอโซเทอมของดินลูกรังต่อสารละลายโลหะหนักสอดคล้องอย่างดีกับสมการของ Freundlich

2) ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังที่ไหลผ่านด้วยน้ำ DI มีค่าอยู่ในช่วง 4.0×10^{-8} ถึง 5.0×10^{-8} cm/s

3) ผลการทดสอบแบบสแตมภ์พบว่า ลำดับการ Breakthrough จากช้าที่สุดไปเร็วที่สุดได้แก่ สารละลาย Pb^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} และ Zn^{2+} ตามลำดับ โดยสารละลาย Ni^{2+} , Cd^{2+} , และ Zn^{2+} มี Breakthrough curves ที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ Pb^{2+} มี Breakthrough ที่ช้าที่สุด

4) ค่าแฟกเตอร์ความหน่วงของ Pb^{2+} มีค่ามากที่สุด ($R = 36$) เมื่อเทียบกับแฟกเตอร์ความหน่วงของ Ni^{2+} , Cd^{2+} , และ Zn^{2+} ($R = 7.6, 7.0$, และ 6.5 ตามลำดับ) เนื่องจาก Breakthrough ออกมาช้าที่สุด ผลของค่า R ที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการทดสอบแบบแบทช์ โดย Pb^{2+} ซึ่งมีค่า Adsorption capacity มากที่สุด

5) ผลการทดสอบความต้านทานสารเคมี พบว่าดินลูกรังเมื่อถูกไหลผ่านโดยสารเคมีจะมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเพิ่มขึ้น โดยอัตราหรือระยะเวลาที่ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเพิ่มขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายที่ไหลผ่าน ถ้าสารละลายที่ไหลผ่านมีความเข้มข้นสูง ไหลผ่านก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเพิ่มขึ้นสูงอย่างรวดเร็ว การใช้ดินลูกรังในการทำชั้นกันซึมสารละลายโลหะหนัก อาจจะต้องทำด้วยความระมัดระวัง ทั้งนี้เนื่องจาก ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านอาจมีค่าสูงกว่ามาตรฐานเมื่อมีการเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูงในระยะเวลาที่นานพอ

เอกสารอ้างอิง

- Amatya, B.L. and Takemura, J. 2002. "Contaminant Transport through Bangkok Clay as a Liner of Landfill" **Proceeding of the Eight National Convention on Civil Engineering**, Khon Kaen, Thailand.
- Cabral, A.R. 1992. "A Study of Compatibility to Heavy Metal Transport in Permeability Testing," Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal.
- Ernst, W.H.O. 1995."Decontamination or Consolidation of Metal-Contaminated Soils by Biological Means" **Heavy Metals: Problem and Solutions**, W. Salomons, U. Forstner, and P. Mader, Eds. Springer, Berlin, 141-149.
- Fernandez, F., and Quigley, R. 1985. "Hydraulic Conductivity of Clay Liners," **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, 22, 204-214.
- Fetter, C.W. 1993 **Contaminant Hydrogeology**, Prentice Hall, New Jersey.
- Gleason, M.H., Daniel, D.E., and Eykholt, G.R. 1997. "Calcium and Sodium Bentonite for Hydraulic Containment Applications," **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 123(5), 438-445.
- Jo, H. Y., Katsumi, T., Benson, C.H., and Edil, T.B. 2001. "Hydraulic Conductivity and Swelling of Nonprehydrated GCLs Permeated with Single-Species Salt Solutions" **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 127(7), 557-567.
- Li, Loretta Y. and Li, Franky. 2001. "Heavy Metal Sorption and Hydraulic Conductivity Studies Using Three Types of Bentonite Admixec" **Journal of Environmental Engineering**, 127(5) : 420-429
- Mathew, P.K., and Rao, S.N. 1997. "Influence of Cation on Compressibility behavior of a Marine Clay" **Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 123(11), 1071-1073.
- Mitchell, J.K. 1976 **Fundamentals of Soil Behavior**, John Wiley and sons, Inc., New York, N.Y.
- Osinubi, K.J., and Nwaiwu, C.M.O. 2006. "Design of Compacted Lateritic Soil Liners and Covers," **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 132(2), 203-213.
- Ou, W.C. 1989. "Soil Column Process for Landfill Leachate Treatment," Master Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Shackelford, C.D.1990. "Transit-Time Design of Earthen Barriers" **Engineering Geology**, 29 : 79-94.
- Shackelford, C.D.1994. "Critical Concepts for Column Testing" **Journal of Geotechnical Engineering**, 120 : 1804-1828.
- USEPA, 1986. Subtitle D Study, Phase Report, U.S. Environmental Protection Agency, EPA/50-SW-86/054.