

การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนที่เบากว่าน้ำด้วยการทดสอบด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง Behavior Study of LNAPL Migration by Centrifuge Test

ชูศักดิ์ ศีรีรัตน์^{1*} และ สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์²

¹ นักศึกษาปริญญาเอก, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

² รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

E-mail: ¹ g4985008@ku.ac.th, ² fengsus@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนที่เบากว่าน้ำที่ถูกกักด้วยกำแพงดินซีเมนต์ในชั้นดินทรายโดยการจำลองด้วยการทดสอบด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง การทดสอบกระทำภายใต้เงื่อนไขที่จำลองให้น้ำใต้ดินอยู่ในสภาพไหลและไม่ไหล พาราฟินเหลวถูกนำมาใช้เป็นตัวแทนของสารปนเปื้อนที่เบากว่าน้ำที่รั่วลงสู่ชั้นดินทรายที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ การทดสอบกระทำภายใต้แรงโน้มถ่วง 30 เท่า พฤติกรรมการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนถูกประเมินด้วยข้อมูลจากการวัดค่าแรงดันน้ำและภาพจากกล้องวิดีโอ ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระดับน้ำใต้ดินถูกกดให้มึระดับที่ต่ำลงเนื่องจากน้ำหนักของสารปนเปื้อน และสารปนเปื้อนสามารถเคลื่อนย้ายได้เร็วกว่าและลึกกว่าเมื่ออยู่ภายใต้สภาพที่น้ำใต้ดินมีการไหล นอกจากนี้ยังพบว่าสารปนเปื้อนที่เบากว่าน้ำสามารถเคลื่อนย้ายได้ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน และกำแพงดินซีเมนต์สามารถนำไปใช้เป็นโครงสร้างกักการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนได้

คำสำคัญ: การทดสอบแรงเหวี่ยง, การเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนเบากว่าน้ำ, ชั้นดินทราย, กำแพงดินซีเมนต์

Abstract

This paper presents the results from centrifuge experiments modeling light nonaqueous phase liquid (LNAPL) migration with containment in a sandy soil. These experiments were performed in this study for 2 case scenarios; groundwater flow and no groundwater flow condition. Liquid paraffin oil was used to represent LNAPL and it was infiltrated into the partially saturated sand deposit. In this study, the centrifuge tests were performed at 30 g and pore pressure sensors and camera recording were used to evaluate the model behavior. Results show that the water level was depressed due to the large volume of LNAPL confined between the walls. The LNAPL migrated faster and deeper than when there was no groundwater flow. In addition, it was observed that LNAPL migrate below the ground water level and the soil cement barrier can be used effectively as the containment.

Keywords: centrifuge modeling, LNAPL migration, sandy soil, soil cement barrier

1. คำนำ

การปนเปื้อนในชั้นใต้ดินเป็นปัญหาที่ก่อให้เกิดความเสียหายทางด้านธรณีสิ่งแวดล้อม สำหรับแหล่งที่เป็นสถานที่จัดเก็บสารปนเปื้อนต่างๆมีอยู่มากมาย ได้แก่ บิมน้ำมัน โรงงานผลิตสารเคมี และสถานประกอบการอื่นที่มีถังเก็บกักไว้ใต้ดิน ซึ่งในจำนวนถังเก็บกักสารเคมีรวมถึงน้ำมันเป็นจำนวนมากที่มีการใช้งานมาเนิ่นนานและเสื่อมสภาพทำให้สารไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ใกล้กับถังเกิดการรั่วไหลลงสู่ชั้นดิน โดยเมื่อระดับน้ำใต้ดินมีระดับตื้นก็จะเกิดผลให้เกิดการพัดพาสารไฮโดรคาร์บอนไปสู่ยังแหล่งน้ำต่างๆก่อให้เกิดการปนเปื้อนซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆรวมถึงสภาพแวดล้อมด้วย สารไฮโดรคาร์บอนที่เบากว่าน้ำจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำลงสู่ชั้นใต้ดินด้วยแรงโน้มถ่วง ถ้าปริมาณของสารไฮโดรคาร์บอนที่รั่วลงไปในชั้นดินมีปริมาณน้อยมันจะค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วยแรงคาพิลลารีและอาจเคลื่อนย้ายไปด้านข้างจนกระทั่งหยุดไหล แต่ถ้าปริมาณการปนเปื้อนมีปริมาณที่มากพอไม่เพียงแต่มันจะค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินแต่มันจะไปกดให้ระดับน้ำใต้ดินต่ำลงด้วย เพื่อเป็นลดความเสี่ยงต่อคุณภาพชีวิตของสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม จึงมีวิธีการต่างๆสำหรับควบคุมการรั่วไหลและบำบัดการปนเปื้อน โดยหนึ่งในวิธีการดังกล่าวก็คือการสร้างกำแพงกักการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในชั้นดินซึ่งเป็นหัวข้อศึกษาที่น่าสนใจในบทความนี้

จากงานวิจัยที่ผ่านมา การศึกษาการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนในชั้นดินสามารถกระทำได้ในห้องปฏิบัติการ การจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบจริงในสนาม ซึ่งวิธีการต่างๆที่กล่าวมาก็มีข้อจำกัดที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงเหวี่ยงจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถจะศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนได้ เนื่องจากการทดสอบที่กระทำในแบบจำลองขนาดเล็กซึ่งสามารถจำลองหน่วยแรงดันที่เกิดขึ้นในสนามได้ อีกทั้งยังเป็นการทดสอบที่ใช้เวลาระยะสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับทดสอบจริงในสนามโดยอาศัยกฎสเกล ซึ่งได้มีผู้วิจัยหลายท่านพิสูจน์ทราบแล้วว่าสามารถใช้ได้จริง สำหรับกฎสเกลพื้นฐานที่ใช้กันโดยทั่วไปมีอยู่ 3 ค่าได้แก่ ระยะทาง, เวลา และมวล ซึ่งมีกฎสเกล (Scaling Law) คือ $1/N$, $1/N^2$ และ $1/N^3$ ตามลำดับ โดย N แทนแรงโน้มถ่วงของโลก

บทความนี้จะนำเสนอพฤติกรรมการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนเบากว่าน้ำซึ่งถูกกักภายในกำแพงดินซีเมนต์ในชั้นดินทรายโดยพิจารณาอิทธิพลเนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดินตามฤดูกาลในประเทศด้วย การทดสอบแรกจำลองสภาพที่น้ำไม่ไหลเพื่อแทนฤดูร้อนหรือหนาว และการทดสอบที่สองจำลองสภาวะน้ำไหลเพื่อแทนฤดูฝนซึ่งน้ำมีโอกาสที่จะพัดพาสารปนเปื้อนไปยังแหล่งน้ำต่างๆ การทดสอบมีการติดตั้ง

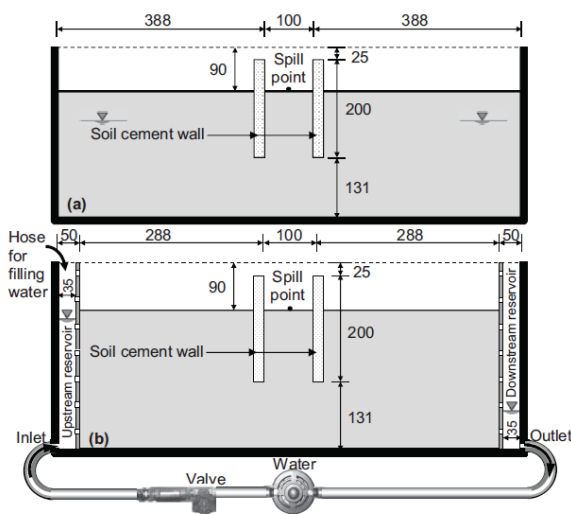
เครื่องมือวัดแรงดันน้ำ และกล้องวิดีโอเพื่อใช้สำหรับศึกษาพฤติกรรม การเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนในชั้นดิน

2. วัสดุและอุปกรณ์

2.1 รูปแบบของแบบจำลอง

การศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาถึงขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้กัน โดยทั่วไปในสนามซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 ม. ซึ่งกำแพงดินซีเมนต์ ถูกสร้างขึ้นที่แรงโน้มถ่วง 1g มีขนาด 0.02 ม. (เนื่องจากเป็นขนาดที่ เล็กที่สุดที่สามารถสร้างได้โดยไม่ทำให้กำแพงแตก) ดังนั้นถ้าต้องการ ให้ขนาดของกำแพงดินซีเมนต์มีขนาดเท่ากับ 0.60 ม. ตามกฎสเกล (1/N) แล้วจึงต้องใช้แรงโน้มถ่วง 30g ($0.02 \times 30 = 0.60$ ม.) โดยใช้ เครื่องทดสอบที่ Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) นิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา สำหรับรายละเอียดของเครื่องทดสอบสามารถตรวจสอบ ได้จาก www.nees.rpi.edu.

กล่องแบบจำลอง (Strongbox) ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดดังนี้ ความกว้าง 0.370 ม. ความยาว 0.876 ม. และความสูง 0.356 ม. ซึ่ง เมื่อใช้กฎสเกลที่แรงโน้มถ่วง 30 เท่าแล้ว สามารถเทียบเท่ากับขนาด จริงคือ 11.10 ม. x 26.28 ม. x 10.68 ม. กล่องแบบจำลอง ประกอบด้วยด้านหน้าใช้แผ่นพลาสติกทึบหนา 0.05 ม. และด้านข้าง และด้านหลังใช้แผ่นอลูมิเนียมหนา 0.025 ม. ดังแสดงในรูปที่ 1 กำแพง ดินซีเมนต์ 2 แผ่น ถูกสร้างในแบบกล่องจำลองเพื่อใช้เป็นโครงสร้างกัก การแพร่กระจายของสารปนเปื้อน ที่ตำแหน่ง 0.05 ม. (1.50 ม. สำหรับ ระยะจริง) นับจากตำแหน่งที่ปล่อยสารปนเปื้อนในทิศทางด้านซ้ายและ ขวา กำแพงแต่ละด้านมีขนาดดังนี้ ความหนา 0.02 ม. ความยาว 0.37 ม. และความลึก 0.20 ม. ซึ่งเมื่อใช้กฎสเกลที่แรงโน้มถ่วง 30 เท่าแล้ว สามารถเทียบเท่ากับขนาดจริงคือ 0.60 ม. x 11.10 ม. x 6.00 ม. โดยกำแพงมีส่วนที่อยู่เหนือระดับดินสูง 0.135 ม. เพื่อเป็นส่วนที่ ป้องกันไม่ให้สารปนเปื้อนไหลข้ามกำแพงไปได้ สำหรับชั้นดินมีความ หนา 0.267 ม. (8.01 ม. สำหรับระยะจริง)



รูปที่ 1 รายละเอียดของกล่องแบบจำลอง (a) กรณีน้ำไม่ไหล (b) กรณีน้ำไหล (หน่วยเป็น มิลลิเมตร)

2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

การศึกษาครั้งนี้ใช้ดินทราย Nevada ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้ ความหนาแน่นของเม็ดดิน 2,650 กก./ลบ.ม., ความหนาแน่นแห้งสูงสุด 1,709.14 กก./ลบ.ม., ความหนาแน่นแห้งต่ำสุด 1,513.74 กก./ลบ.ม. และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำ 4.75-1.99 ม./วัน ขึ้นอยู่กับความ หนาแน่นสัมพัทธ์ ดินทราย Nevada มีขนาดเฉลี่ย (D_{50}) เท่ากับ 1.5×10^{-4} ม. สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (C_u) เท่ากับ 2.056 และ สัมประสิทธิ์ความโค้ง (C_c) เท่ากับ 0.894 การศึกษาครั้งนี้กำหนดค่า ความหนาแน่นของดินเท่ากับ 1,600 กก./ลบ.ม. (ซึ่งสอดคล้องกับค่า ความหนาแน่นสัมพัทธ์ร้อยละ 50) ค่าความพรุนเท่ากับร้อยละ 40 และ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำเท่ากับ 4.838 ม./วัน

กำแพงดินซีเมนต์ได้ออกแบบให้มีความหนาแน่น 1,740 กก./ลบ.ม. โดยกำแพงดินซีเมนต์มีอัตราส่วนผสมระหว่างดินทราย Nevada กับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 2 และปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กก./ลบ.ม. (อ้างตาม [1]) สำหรับกำแพงดินซีเมนต์ในครั้งนี้มีอัตราส่วนผสมที่ใช้ในระหว่าง ดิน ทราย Nevada : ปูนซีเมนต์ : น้ำ คือ 2.651 กก. : 0.367 กก. : 0.735 กก. ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำสมมุติให้เท่ากับ 1.209×10^{-4} ม./วัน (อ้างตาม [2]) หลังจากผสมได้สัดส่วนแล้วนำไปเท ลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ในกล่องแบบจำลองโดยที่ปลายทั้งสองข้างที่ ติดกับผนังกล่องแบบจำลองยึดกับแผ่นยางเพื่อให้กำแพงยึดแน่นกับผนัง กล่องแบบจำลอง

ตัวแทนสารปนเปื้อนที่เบากว่าน้ำที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ คือ พาราฟินเหลว (Sigma-Aldrich, USA) เนื่องจากมีคุณสมบัติในการ ระเหยต่ำ ไม่ละลายในน้ำ และความเสถียรเนื่องจากอันตรายต่อร่างกาย ต่ำ [3] เพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของสีแดงจึงใช้ Sudan IV (Scholar Chemistry, USA) ผสมกับพาราฟินเหลวในปริมาณร้อยละ 0.1 โดย น้ำหนัก [4]

2.3 ระบบการไหลของน้ำ

ระบบการไหลของน้ำถูกออกแบบเพื่อศึกษาอิทธิพลของความ แตกต่างระหว่างระดับความสูงของน้ำต่อพฤติกรรมการไหลของสาร ปนเปื้อนในดิน ดังรูปที่ 1(b) ซึ่งสำหรับการทดสอบกรณีน้ำใต้ดินไหล ผ่านชั้นดิน เพื่อเป็นการรักษาระดับความแตกต่างของระดับความสูง ของน้ำจึงได้สร้างถังเก็บน้ำไว้ที่ปลายด้านข้างของกล่องแบบจำลอง โดย กล่องแบบจำลองถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนโดยมีแผ่นอลูมิเนียมความหนา 0.0127 ม. เจาะรูแล้วหุ้มด้วยแผ่นเส้นใยสังเคราะห์กั้นระหว่างแต่ละ ส่วนเพื่อให้สามารถไหลผ่านชั้นดินได้สะดวก สำหรับส่วนตรงกลางจะ เป็นส่วนที่ใช้ในการเตรียมชั้นดิน และอีกสองส่วนด้านข้างจะใช้เป็นถัง เก็บน้ำ ระบบปั๊มถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมความแตกต่างของระดับน้ำ ภายในถังเก็บน้ำทั้งสองโดยจะให้น้ำถูกสูบด้วยปั๊มจากถังเก็บน้ำด้านที่มี ระดับน้ำต่ำกว่า (Downstream) ผ่านทางท่อน้ำกลับไปยังถังเก็บน้ำที่มี ระดับน้ำสูงกว่า (Upstream) ในลักษณะน้ำหมุนวน อัตราการสูบน้ำจะถูก ทดลองและปรับจนกระทั่งสามารถรักษาระดับความแตกต่างของ ระดับน้ำภายในถังเก็บน้ำทั้งสองให้คงที่ นอกจากนี้ยังสามารถเติมน้ำลง ในถังเก็บน้ำที่มีระดับน้ำสูงกว่าได้โดยผ่านทางข้อต่อแบบหมุนของ เครื่องทดสอบเพื่อชดเชยน้ำที่ระเหยไประหว่างการทดสอบ

2.4 อุปกรณ์สำหรับปล่อยสารปนเปื้อน

อุปกรณ์สำหรับปล่อยสารปนเปื้อน ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ภาชนะบรรจุสารปนเปื้อน และอุปกรณ์ควบคุมการปล่อยสารปนเปื้อน ดังรูปที่ 2



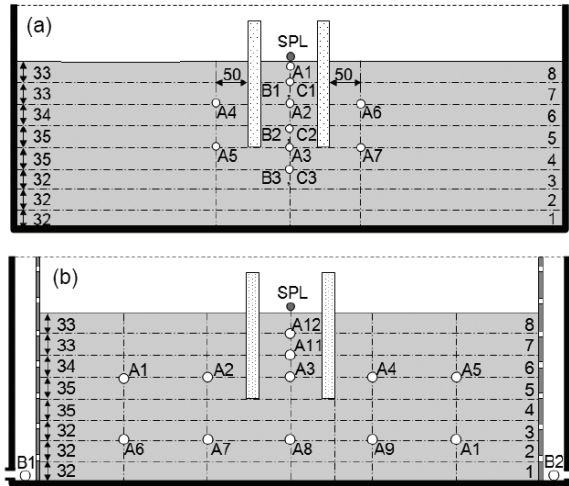
รูปที่ 2 อุปกรณ์สำหรับปล่อยสารปนเปื้อน

โดยภาชนะบรรจุมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.28 ม. และสูง 0.15 ม. ยึดติดกับเหล็กรูปตัวยูสำหรับนำไปยึดติดบนกล่องแบบจำลองด้วยสกรู โดยสารปนเปื้อนจะถูกปล่อยลงบนผิวของชั้นดินในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างกำแพงดินซีเมนต์ในขณะที่กำลังทดสอบเมื่อแรงโน้มถ่วง 30 เท่า โดยการเปิดวาล์วที่ควบคุมด้วยระบบไฟฟ้า (Solenoid Valve) ที่ถูกยึดติดกับภาชนะบรรจุสารปนเปื้อน การทดสอบครั้งนี้ได้ออกแบบให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของภาชนะบรรจุมีขนาดใหญ่เพื่อให้อัตราการไหลของสารปนเปื้อนลงสู่ชั้นดินเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด โดยอัตราการไหลของสารปนเปื้อนถูกบันทึกค่าตลอดการทดสอบเพื่อให้แน่ใจว่าอัตราการไหลคงที่ โดยอ่านค่าจากเซ็นเซอร์วัดแรงดันน้ำที่ถูกติดตั้งไว้ที่ท้องภาชนะบรรจุสารปนเปื้อน

3. ขั้นตอนการดำเนินการ

3.1 การเตรียมตัวอย่างดินและการติดตั้งอุปกรณ์วัด

ดินทรายแห้งถูกโรยลงในกล่องแบบจำลองโดยควบคุมความสูงของอุปกรณ์สำหรับโรยดิน (Pluviation) ให้คงที่ อุปกรณ์ดังกล่าวทำจากแผ่นสังกะสีขึ้นรูปเป็นกรวยสามเหลี่ยมมีความกว้าง 0.153 ม. และความสูง 0.159 ซม. เจาะรูที่ด้านล่างตลอดความกว้างขนาด 0.0016 ม. ดินทรายถูกใส่ลงภายในกรวยแล้วโรยลงในกล่องแบบจำลองด้วยอัตราการเคลื่อนที่สม่ำเสมอที่ละชั้น พร้อมทั้งติดตั้งเซ็นเซอร์วัดแรงดันน้ำตามตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 3 ความหนาแน่นของดินในแต่ละชั้นถูกตรวจสอบเพื่อให้แน่ใจว่าความหนาแน่นของดินทรายมีความสม่ำเสมอตลอดความลึกของชั้นดิน หลังจากเตรียมชั้นดินเสร็จแล้วจะเติมน้ำลงในชั้นดินจนถึงระดับที่ได้ออกแบบไว้ โดยการเติมน้ำจะค่อยๆ หยดลงไปบนชั้นดินที่มุมของกล่องแบบจำลอง ซึ่งระดับน้ำจะถูกบันทึกตลอดการทดสอบโดยอาศัยเซ็นเซอร์วัดแรงดันน้ำ



หมายเหตุ: A,B, C และ SPL คือ เซ็นเซอร์วัดแรงดันน้ำ

รูปที่ 3 ตำแหน่งเซ็นเซอร์วัดแรงดันน้ำ (a) กรณีน้ำไม่ไหล (b) กรณีน้ำไหล (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

3.2 เงื่อนไขเริ่มต้นและขั้นตอนการทดสอบ

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าการทดสอบกระทำภายใต้แรงโน้มถ่วง 30 เท่า โดยการทดสอบแรกทดสอบภายใต้กรณีน้ำใต้ดินไม่ไหล วัดระดับน้ำใต้ดินได้ 1.81 ม. และการทดสอบที่สองทดสอบภายใต้กรณีน้ำใต้ดินไหล วัดความแตกต่างของระดับน้ำในถังเก็บน้ำได้เท่ากับ 3.67 ม. ซึ่งระดับน้ำต่างๆ ได้จากผลการวัดแรงดันน้ำที่ตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์วัดแรงดันน้ำ

เมื่อเงื่อนไขเริ่มต้นของแต่ละการทดสอบเป็นไปตามที่กำหนดไว้แล้ว และแรงดันน้ำอยู่ในสภาวะคงที่แล้ว พาราฟินเหลวที่เตรียมไว้ในปริมาณ 800 มล. (เทียบเท่ากับปริมาณจริง 21,600 ลิตร สำหรับการทดสอบที่ 30 เท่าของแรงโน้มถ่วง) จะถูกปล่อยลงสู่ชั้นดินในอัตราประมาณ 0.45 มล./วินาที และค่าแรงดันน้ำจะถูกบันทึกพร้อมกับการบันทึกวิดีโอเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนเป็นระยะเวลา 128 นาที (เทียบเท่ากับระยะเวลาจริง 80 วัน สำหรับการทดสอบที่ 30 เท่าของแรงโน้มถ่วง)

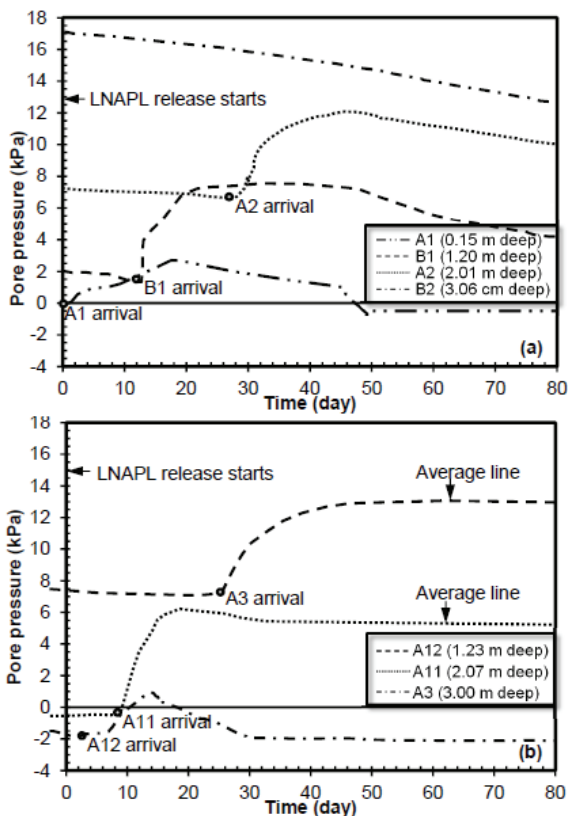
4. ผลการทดสอบและวิจารณ์

4.1 การวัดค่าแรงดันน้ำ

การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำ ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ถูกวัดค่าโดยเซ็นเซอร์วัดแรงดันน้ำ ดังรูปที่ 4 ซึ่งตำแหน่งของเซ็นเซอร์ที่ถูกติดตั้งไว้ในกำแพงดินซีเมนต์เพื่อใช้สำหรับแปลผลพฤติกรรมการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อน ส่วนเซ็นเซอร์ ณ ตำแหน่งอื่นๆ จะถูกนำไปใช้สำหรับหาเส้นระดับน้ำใต้ดินและตรวจสอบการปนเปื้อนของดินที่อยู่ภายนอกกำแพง ระหว่างการทดสอบแรก (กรณีน้ำไม่ไหล) ระดับน้ำใต้ดินจะลดลงเล็กน้อยตามระยะเวลาการทดสอบเนื่องจากเกิดการระเหยของน้ำ แต่สำหรับการทดสอบที่สอง (กรณีน้ำไหล) ระดับน้ำจะถูกรักษาไว้ให้คงที่โดยอาศัยระบบปั๊มที่ได้ติดตั้งไว้ในขั้นตอนการจัดเตรียมระบบการไหลของน้ำ

รูปที่ 4(a) แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำเปรียบเทียบกับระยะเวลาการทดสอบสำหรับการทดสอบแรก (กรณีน้ำไม่ไหล) จากกราฟแสดงให้เห็นว่าสารปนเปื้อนเคลื่อนที่ผ่านเซ็นเซอร์ A1 ตามด้วยเซ็นเซอร์ B1 และหลังจากนั้นสารปนเปื้อนจะมีระดับคงที่อยู่เหนือระดับเซ็นเซอร์ B2 (ประมาณความลึกที่ 3.06 ม.) เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่เซ็นเซอร์ B2 และไม่ปรากฏการปนเปื้อนนอกกำแพงดินซีเมนต์แสดงให้เห็นว่ากำแพงดินซีเมนต์สามารถใช้เป็นโครงสร้างกักการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนได้ อีกทั้งยังแสดงให้เห็นว่าความลึกของกำแพงดินซีเมนต์เพียงพอต่อการกักไม่ให้เกิดสารปนเปื้อนแพร่กระจายเนื่องจากไม่พบว่าสารปนเปื้อนไหลลอดใต้กำแพง

การทดสอบที่สองเป็นการจำลองให้มีการไหลของน้ำใต้ดินโดยความแตกต่างของระดับน้ำในถังเก็บน้ำถูกควบคุมให้คงที่ตลอดการทดสอบ ระดับน้ำ ณ ตำแหน่งใกล้กับกำแพงดินซีเมนต์วัดค่าได้เท่ากับ 1.93 ม. นับจากระดับผิวดินซึ่งมีระดับใกล้เคียงกับระดับน้ำใต้ดินในทดสอบแรก รูปที่ 4(b) แสดงการพล็อตกราฟการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำเปรียบเทียบกับระยะเวลาการทดสอบสำหรับการทดสอบที่สอง (กรณีน้ำไหล) จากกราฟแสดงให้เห็นว่าสารปนเปื้อนเคลื่อนที่ผ่านเซ็นเซอร์ ตามด้วยเซ็นเซอร์ A12 และ A3 นอกจากนี้ยังพบว่าสารปนเปื้อนเคลื่อนที่ลอดใต้กำแพงดินซีเมนต์ที่มีระดับน้ำต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าความลึกของกำแพงดินซีเมนต์ไม่เพียงพอต่อการกักสารปนเปื้อน

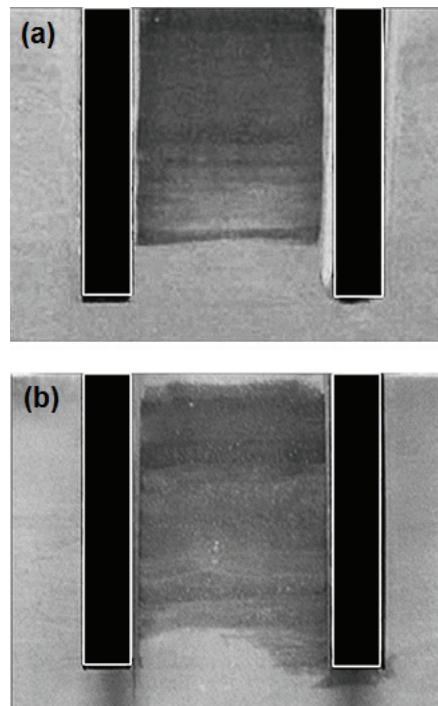


รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำตามระยะเวลาการทดสอบ
(a) กรณีน้ำไม่ไหล (b) กรณีน้ำไหล

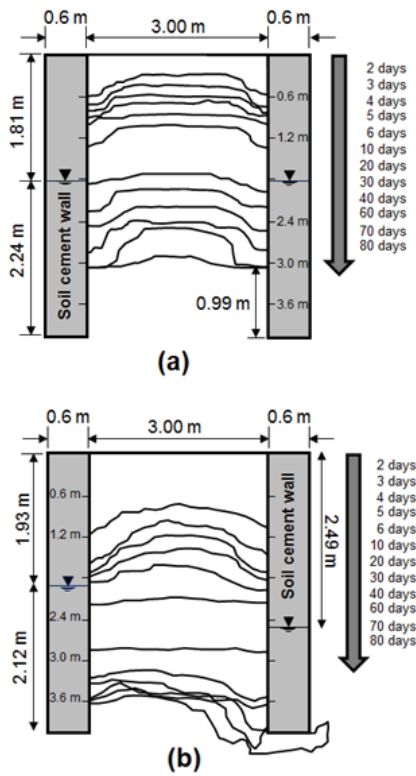
4.2 การเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อน

ภาพการกระจายของสารปนเปื้อนที่ได้จากการบันทึกวิดีโอหลังจากการทดสอบเสร็จสิ้นของทั้งสองการทดสอบ ดังรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาภาพการกระจายของสารปนเปื้อน ณ เวลาต่างๆ และใช้โปรแกรมกราฟฟิก (PhotoShopCS3) หาเส้นขอบเขตการกระจายของสารปนเปื้อน สามารถนำมาสร้างเส้นขอบเขตการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อน ณ ช่วงเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 6 โดยเทคนิคนี้ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางโดยนักวิจัยหลายๆท่าน [5, 6, 7] จากรูปแสดงให้เห็นว่าการทดสอบแรก (กรณีน้ำไม่ไหล) สารปนเปื้อนเคลื่อนที่ไปถึงระดับน้ำใต้ดินที่ระดับ 1.81 ม. นับจากผิวดินภายในเวลา 20 วัน และจะมีระดับคงที่อยู่ที่ระดับ 0.99 ม. นับจากใต้กำแพง สำหรับการทดสอบที่สอง (กรณีน้ำไหล) สารปนเปื้อนเคลื่อนที่ไปถึงระดับน้ำใต้ดินที่ระดับ 1.93 ม. ณ ตำแหน่งใกล้กับกำแพงดินซีเมนต์ภายในเวลา 6 วัน และหลังจาก 16 วัน สารปนเปื้อนจะไหลลอดใต้กำแพง

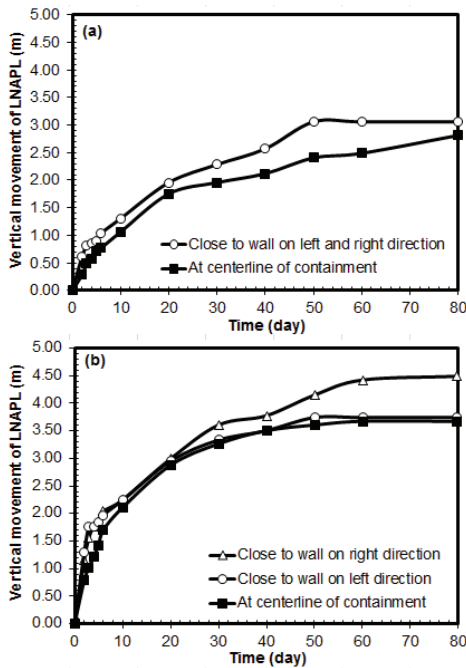
การกระจายของสารปนเปื้อนทั้งสองการทดสอบเมื่อพิจารณาระยะการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในแนวตั้งเปรียบเทียบกับระยะเวลาการทดสอบ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างกำแพงดินซีเมนต์ และตำแหน่งใกล้กำแพงดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 7 จากรูปที่ 7(a) แสดงให้เห็นว่าการกรณีที่ไม่มีการไหลของน้ำใต้ดิน การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจะเป็นแบบสมมาตร โดยเริ่มต้นการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนใกล้กำแพงจะเร็วกว่าตำแหน่งกึ่งกลาง แต่อย่างไรก็ตามหลังจากสิ้นสุดการทดสอบสารปนเปื้อนก็ไหลมาอยู่ในระดับเดียวกันกับตำแหน่งใกล้กำแพง สำหรับกรณีที่มีการไหลของน้ำใต้ดิน ดังรูปที่ 7(b) การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจะไม่สมมาตรและจะเคลื่อนที่เร็วกว่ากรณีที่ไม่มีการไหลของน้ำใต้ดิน นอกจากนี้ยังพบว่าสารปนเปื้อนที่ใกล้กำแพงด้านที่ระดับน้ำต่ำกว่าจะไหลเร็วกว่าด้านที่ระดับน้ำสูงกว่าเนื่องจากอิทธิพลการไหลของน้ำ



รูปที่ 5 การกระจายของสารปนเปื้อนหลังการทดสอบ
(a) กรณีน้ำไม่ไหล (b) กรณีน้ำไหล

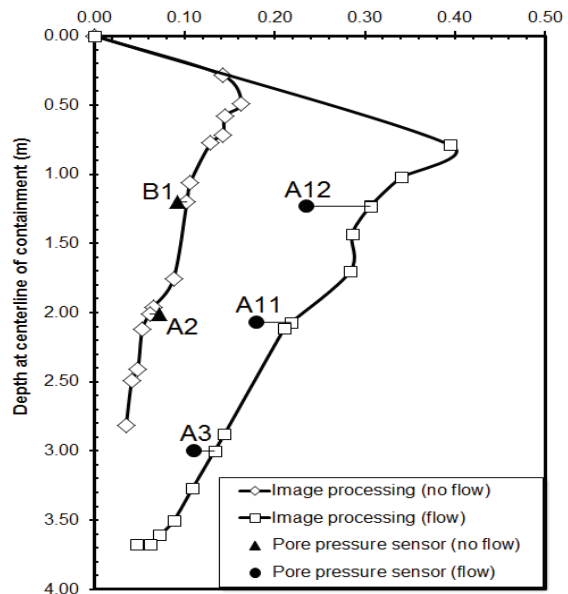


รูปที่ 6 เส้นขอบเขตการไหลของสารปนเปื้อน
(a) กรณีน้ำไม่ไหล (b) กรณีน้ำไหล



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน ณ ตำแหน่งกึ่งกลาง และตำแหน่งใกล้กำแพงด้านซ้ายและขวา (a) กรณีน้ำไม่ไหล (b) กรณีน้ำไหล

ระยะทางการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของสารปนเปื้อน ณ เวลาต่างๆถูกนำมาใช้สำหรับคำนวณความเร็วของการเคลื่อนที่ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8 โดยเปรียบเทียบความเร็วซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยภาพจากวิดีโอกับการวัดจากเซ็นเซอร์วัดแรงดันน้ำ จากรูปพบว่าค่าความเร็วที่ได้จากทั้งสองวิธีให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งโดยรวมแล้วความเร็วของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของสารปนเปื้อนจะลดลงตามความลึก และความเร็วในกรณีนี้ใต้ดินมีการไหลจะมากกว่ากรณีที่มีมิน้ำใต้ดินไหล



รูปที่ 8 ความเร็วของการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน

5. สรุปผลการศึกษา

การทดสอบการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนด้วยเครื่องแรงเหวี่ยงสามารถอธิบายพฤติกรรมของการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนที่ถูกกักภายในกำแพงดินซีเมนต์ได้ การทดสอบครั้งนี้ได้พิจารณาถึงอิทธิพลเนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดินด้วย ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า การไหลของน้ำใต้ดินมีผลต่อพฤติกรรมของการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อน โดยในกรณีที่ไม่มีการไหลของน้ำใต้ดิน การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนที่อยู่ใกล้กำแพงจะไหลได้เร็วกว่าตำแหน่งกึ่งกลาง สำหรับในกรณีที่มีการไหลของน้ำใต้ดิน สารปนเปื้อนสามารถจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าและลึกกว่ากรณีที่ไม่มีการไหลของน้ำใต้ดิน ดังนั้นในการออกแบบความลึกของกำแพงดินซีเมนต์ต้องพิจารณาถึงระดับน้ำใต้ดินและอิทธิพลเนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดินร่วมด้วย นอกจากนี้ผลจากการศึกษา ยังแสดงให้เห็นว่า กำแพงดินซีเมนต์สามารถเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะใช้เป็นการก่อสร้างกักการแพร่กระจายของสารปนเปื้อน การแปลผลจากภาพสามารถใช้เป็นเทคนิคสำหรับศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนได้

6. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับทุนสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ภายใต้โครงการเครือข่ายเชิงกลยุทธ์เพื่อผลิตและพัฒนาอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษาหลักสูตรปริญญาเอกร่วมในประเทศ-ต่างประเทศ ประจำปี 2550

เอกสารอ้างอิง

- [1] P.J. Nicholson, B.H. Jasperse, and M.J. Fisher, M.J. "Economic alternatives for containment barriers." *Int. Containment Tech. Conf. & Exhibit*, St. Petersburg, Florida, 1997.
- [2] C. Kererat and C. Chaikaew. *Suitable of soil cement mixing for containing contaminant migration*, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Nakorn Pathom, 2009.
- [3] M. Kamon, Y. Li, G. Flores, K. Endo, T. Inui. and T. Katsumi. "Experimental and numerical study on migration of LNAPL under the influence of fluctuating water table in subsurface." *Annals of Disas. Prev. Res. Inst.*, Kyoto Univ., 49, pp.383-392, 2006.
- [4] W. Sripongphichit. "Investigation of fossil fuel contamination in unsaturated zone using digital image analysis." M. Eng. thesis, University of Kasetsart, Bangkok, Thailand, 2006.
- [5] H.G.B. Allersma and G.M. Esposito. "Optical analysis of pollution transport in geotechnical centrifuge tests." *Int. Symp. on Physical Modelling and Testing in Env. Geotech.* La Baule, France, 2000.
- [6] G.M. Esposito, H.G.B. Allersma, K. Soga, C. Kechavarzi and H. Coumoulos). "Centrifuge simulation of LNAPL infiltration in partially saturated porous granular medium." *Int. Symp. on Physical Modelling and Testing in Env. Geotech.* La Baule, France, 2000.
- [7] K. Soga, J. Kawabata, C. Kechavarzi, H. Coumoulos. and W.A.P. Waduge (2003). "Centrifuge Modeling of Nonaqueous Phase Liquid Movement and Entrapment in Unsaturated Layered Soils." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129(2), pp. 173-182, 2003.