

การวินิจฉัยการกัดเซาะภายในเขื่อนดินโดยใช้ตัวชี้วัดจากพิโซมิเตอร์ A Diagnostic for Internal Erosion in Earth Dams Using Piezometric Indicators

วิภาดา เทพจันทร์^{1,*} วรากร ไหมเรียง² และ บรรพต กุลสุวรรณ³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี

^{2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.นครปฐม

*Corresponding author; E-mail address: : wiphada.t@rmutsb.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินพฤติกรรมการไหลซึมและการกัดเซาะภายในเขื่อนดินด้วยดัชนีจากเครื่องมือวัด: Time Lag (T_L) และ Pressure Ratio (P_R) เป็นตัวชี้วัด โดยใช้ข้อมูลแรงดันน้ำ ปี 2003-2024 จากพิโซมิเตอร์ที่ติดตั้งภายในชั้นดิน residual soil ของเขื่อนดินที่เป็นกรณีศึกษา พบว่า T_L มีแนวโน้มลดลงตามเวลา สะท้อนได้จาก OSP 10 ที่ T_L ลดลงจาก 50, 20 และน้อยกว่า 1 วัน จากปี 2003, 2013 และ 2024 แสดงถึงการเปิดกว้างของรอยแตกในชั้นดินและความต่อเนื่องของเส้นทางการไหลซึม ในขณะที่ค่า P_R ประเมินการกัดเซาะภายใน ในระดับ Very likely to Likely ($P_R = 1.0-0.8, 0.8-0.6$) และลดลงเมื่อเข้าสู่ด้านท้ายน้ำที่ off-set จากแกนไปมากกว่า +80 เมตร แสดงถึงความก้าวหน้าของการกัดเซาะภายในจากเหื่อนน้ำสู่ท้ายน้ำ การใช้ T_L และ P_R ร่วมกันสามารถสะท้อนพฤติกรรมการกัดเซาะภายในได้ทั้งในเชิงเวลาและตำแหน่งทางกายภาพของเขื่อน ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าแนวทางนี้สามารถใช้เป็นระบบเฝ้าระวังเพื่อประเมินความมั่นคงของเขื่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการตรวจจับสัญญาณเริ่มต้นของการกัดเซาะภายใน ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวางแผนการซ่อมบำรุง การบริหารความเสี่ยง และเพิ่มความเชื่อมั่นด้านความปลอดภัยของเขื่อนในระยะยาว

คำสำคัญ: ระยะเวลาล่าช้า ,อัตราส่วนแรงดันน้ำ, พิโซมิเตอร์, การกัดเซาะภายใน

Abstract

This study aims to assess seepage behavior and internal erosion in an earth dam using Time Lag (T_L) and Pressure Ratio (P_R) as diagnostic indicators. Piezometric head data from 2003 to 2024 were installed in the residual soil layer of the case study dam. The T_L values showed a decreasing trend over time, notably at OSP 10, where T_L dropped from 50 to 20 and then to less than 1 day in 2003, 2013, and 2024, respectively, indicating progressive crack opening and continuous seepage paths. P_R values suggested internal erosion levels ranging from Very Likely to Likely ($P_R = 1.0-0.8, 0.8-0.6$), with reduced risk beyond +80 m from the dam axis, reflecting downstream progression of erosion. The combined use of T_L and P_R effectively captures internal erosion behavior in both temporal and locations. The approach provides a reliable basis for early warning, maintenance planning, risk management, and long-term dam safety assurance.

Keywords: Time lag, Pore pressure ratio, Piezometer, Internal erosion

1. คำนำ

การรั่วซึม (Seepage) และการกัดเซาะภายใน (Internal Erosion) เป็นกลไกความเสียหายที่สำคัญของเขื่อนดิน ซึ่งอาจนำไปสู่ความเสียหายหรือการพังทลายของโครงสร้างโดยไม่แสดงสัญญาณเตือนล่วงหน้าอย่างชัดเจน จากสถิติการพังทลายของเขื่อนในระดับนานาชาติ พบว่า ความเสียหายส่วนใหญ่มักเกี่ยวข้องกับกระบวนการภายใน เช่น การพังทลายจากแรงดันน้ำ การสูญเสียวัสดุบริเวณฐาน หรือการสะสมของโพรงที่เกิดจากแรงดันและการกัดเซาะภายใน [1-3]

การเข้าใจกลไกและพฤติกรรมการรั่วซึมภายในเขื่อนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเฝ้าระวังและการวินิจฉัยสภาพเสถียรภาพของเขื่อน โดยเฉพาะในยุคที่การจัดการความเสี่ยงและการใช้เทคโนโลยีการตรวจวัดมีความก้าวหน้า การใช้เครื่องมือวัด เช่น พิโซมิเตอร์ (Piezometer) สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับความดันน้ำในดิน ซึ่งมีศักยภาพในการวิเคราะห์แนวโน้มของพฤติกรรมการรั่วซึมและการเปลี่ยนแปลงภายในเขื่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในปัจจุบันการวินิจฉัยพฤติกรรมการไหลซึมในเขื่อนดินอาศัยการวิเคราะห์ค่าแรงดันน้ำจากพิโซมิเตอร์แบบจุดต่อจุดในช่วงเวลาต่าง ๆ ซึ่งสะท้อนสภาพการไหลซึมโดยรวมได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม มีข้อจำกัดในการตรวจจับพฤติกรรมที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือตามสภาวะต่าง ๆ ของการไหล ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลแบบค่าสถิติทั่วไป ยังไม่สามารถแยกแยะสัญญาณเริ่มต้นของกระบวนการกัดเซาะภายในได้อย่างชัดเจน เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว แนวคิดเชิงวินิจฉัย เช่น ดัชนี Time Lag (T_L), Pressure Ratio (P_R) ได้รับการเสนอและพัฒนาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่องมือวัดในเชิงลึกมากขึ้น โดยมีเป้าหมายเพื่อแยกแยะพฤติกรรมที่อยู่ในเกณฑ์ปกติ อาจเสี่ยง หรืออยู่ในระดับวิกฤต ทั้งนี้การประเมินพฤติกรรมจากค่าดัชนีเหล่านี้ยังต้องอาศัยการพิจารณาร่วมกับลักษณะทางธรณีเทคนิคของเขื่อน พฤติกรรมในอดีต และความต่อเนื่องของแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง [4-8]

บทความนี้มุ่งเน้นการทบทวนแนวคิดและเกณฑ์การวินิจฉัยพฤติกรรมการรั่วซึมภายในเขื่อนดิน โดยใช้ข้อมูลจากเครื่องมือวัดเป็นหลัก พร้อมทั้งนำเสนอกรณีศึกษาของเขื่อนดินที่มีพฤติกรรมการไหลซึมเปลี่ยนแปลงจากช่วงปี 2003–2024 ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงประโยชน์และข้อจำกัดของการใช้ดัชนีวิเคราะห์ในการติดตามความเสี่ยงจากการกัดเซาะภายในในระยะยาวของเขื่อนดิน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ประเมินและแสดงพฤติกรรมการไหลซึมที่แปรผลจากข้อมูลพิโซมิเตอร์, นำเสนอและประยุกต์ใช้ตัวชี้วัด ได้แก่ Time Lag (T_L) และ Pressure Ratio (P_R) และ (3) ประเมินศักยภาพของ

ดังนี้เหล่านี้นำมาใช้ในการเสริมประสิทธิภาพการแผ้วถางและการประเมินความเสี่ยงของเขื่อนดินในระยะยาว.

2. องค์ความรู้ในการประเมินการรั่วซึม

2.1 รูปแบบการรั่วซึมในเขื่อนดิน

[9] ระบุถึงการไหลซึมที่นำไปสู่การกัดเซาะภายในว่าเกิดขึ้นได้ 3 รูปแบบ ตามตำแหน่งทางกายภาพที่เกิดขึ้นตามเส้นทางไหลซึม คือ การไหลซึมผ่านตัวเขื่อน การไหลซึมผ่านฐานรากเขื่อน และการไหลซึมผ่านตัวเขื่อนสู่ฐานรากเขื่อน ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งแสดงกลไกเริ่มต้นของกระบวนการไหลซึมที่นำไปสู่การพังทลายได้

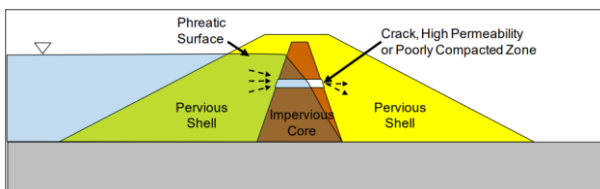
[10] ได้รวบรวมข้อมูลพิบัติระหว่างผิวสัมผัสของดินหรือหินกับโครงสร้างประกอบเขื่อนในอดีตและพบว่า มี 2 รูปแบบที่สำคัญ ที่อาจเป็นเส้นทางให้เกิดการไหลซึมได้ คือ การไหลซึมผ่านบริเวณโครงสร้างคอนกรีต เช่น บริเวณท่อลอด หรือผนังคอนกรีตที่ทางระบายน้ำล้ม และการไหลซึมผ่านบริเวณทางระบายน้ำ เช่น toe drains, stilling basin underdrains เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 5

นอกจาก 4 กระบวนการดังที่กล่าวมาแล้ว [1] รวบรวมข้อมูลการพิบัติจากการกัดเซาะภายในของเขื่อนในหลายกรณีศึกษา และสรุปรูปแบบกลไกเริ่มต้น เรียกว่า Initiation mechanism, IM โดยเสนอทั้งสิ้น 28 รูปแบบ แบ่งตามเส้นทางหลักของการไหลซึม เสนอโดย [9] โดยใช้ตำแหน่งการเกิดจุดบกพร่อง (Flaw) เป็นปัจจัยหนึ่งในการกำหนดรูปแบบย่อย

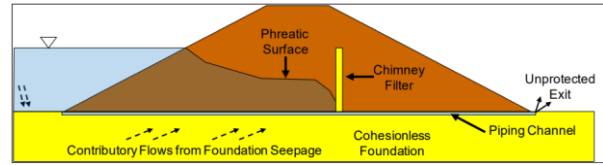
2.2 วิธีประเมินการรั่วซึม

[1-2] เสนอ Flowchart ของความน่าจะเป็นของการพิบัติจากเหตุการณ์ของการกัดเซาะภายในตัวเขื่อน ฐานรากและการกัดเซาะจากตัวเขื่อนสู่ฐานราก แยกตามกลไกเริ่มต้น (Initiation mechanism, IM) ที่นำไปสู่การไหลซึม แต่ละเส้นทางของการพิบัติ (Failure path) จะถูกพิจารณาบนพื้นฐานของการประเมินระดับความเป็นไปได้ (more likely และ less likely) บนพื้นฐานของการประเมินความเสี่ยงโดยใช้ข้อมูลเพื่อประกอบการตัดสินใจในหลายกลุ่ม เช่น ข้อมูลทางกายภาพของตัวเขื่อน ข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรม ข้อมูลการออกแบบเขื่อนหรือการบดอัดในระหว่างก่อสร้างเขื่อน ข้อมูลจากเครื่องมือวัดพฤติกรรม ข้อมูลจากการสำรวจด้วยสายตาในสนาม (Visual inspection) เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการเกิดตำหนิ (รอยแตก) ในตัวเขื่อนหรือเป็นช่องทางให้น้ำไหลผ่านในฐานราก เป็นต้น ตัวอย่างการประเมิน ดังรูปที่ 1

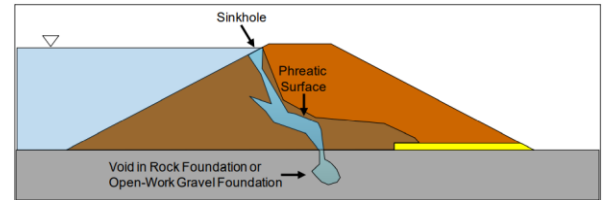
[11-12] ใช้ผลการเดินสำรวจด้วยสายตาในสนาม ข้อมูลจากเครื่องมือวัดพฤติกรรม และข้อมูลจากแบบจำลอง ประกอบการตัดสินใจให้คะแนน โดยสร้างเกณฑ์การให้คะแนนในแต่ละกลุ่มข้อมูล แบ่งคะแนนออกเป็น 0-10 คะแนน (Excellent to Unacceptable) สำหรับใช้ประเมินสภาพภาพของเขื่อนในรูปแบบเมื่อเกิดการกัดเซาะภายใน (ตามเวลา) จากผลการตรวจสอบภาพเขื่อน และ [9] ได้รวบรวมข้อมูลและปรับปรุงแนวคิดของ [1] ซึ่งใช้วิธีประเมินทางวิศวกรรม (Engineering assessment) ในการคัดกรองเพื่อประเมิน Internal Erosion ได้เสนอกรอบการวิเคราะห์และประเด็นที่ต้องพิจารณาที่สอดคล้องกัน



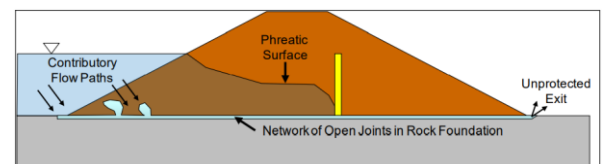
ก) การพิบัติจากการไหลซึมผ่านตัวเขื่อน



ข) การพิบัติจากการไหลซึมผ่านฐานรากเขื่อน



ค) การพิบัติจากการไหลซึมผ่านตัวเขื่อนสู่ฐานรากเขื่อน



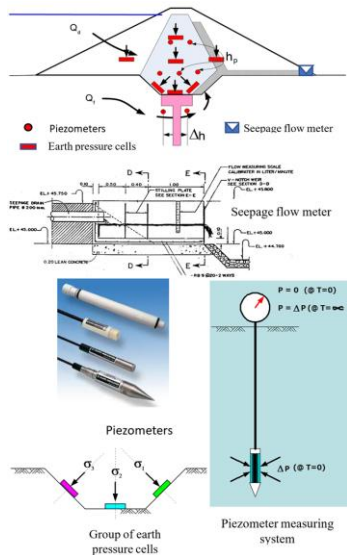
ง) การพิบัติจากการไหลซึมบริเวณรอยต่อผ่านตัวเขื่อนสู่ฐานรากเขื่อน
รูปที่ 1 รูปแบบการไหลซึมในเขื่อนดิน [9-10]

2.3 การประเมินการรั่วซึมโดยเครื่องมือวัด

เครื่องมือที่ใช้ในการติดตามพฤติกรรมเขื่อน

เครื่องมือวัดพฤติกรรมในเขื่อนเป็นอุปกรณ์เฉพาะทางที่มีบทบาทสำคัญในการติดตามความปลอดภัยและประเมินประสิทธิภาพของเขื่อนในระยะยาว โดยเฉพาะการตรวจสอบพฤติกรรมการพังทลายภายใน (Hydraulic Fracturing: HF) ซึ่งมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับความมั่นคงของโครงสร้างเขื่อน เครื่องมือหลักในกลุ่มนี้ ได้แก่ พิโซมิเตอร์ (Piezometer), ท่อวัดระดับน้ำใต้ดิน (Observation well หรือ Standpipe), และเครื่องมือวัดปริมาณน้ำซึม (Seepage Flowmeter) โดยควรติดตั้งในตำแหน่งสำคัญของตัวเขื่อนและฐานราก เช่น บริเวณรอยเลื่อนของชั้นหิน, พื้นฐานรากที่ไม่สม่ำเสมอ, แกนดินเหนียวที่บาง หรือบริเวณรอยต่อของโครงสร้างต่าง ๆ เพื่อให้สามารถติดตามพฤติกรรมการไหลซึมและการเปลี่ยนแปลงภายในได้อย่างแม่นยำ

พิโซมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดระดับน้ำหรือแรงดันน้ำใต้ดิน ซึ่งสามารถติดตั้งได้ทั้งแบบท่อเปิด (Open standpipe) หรือแบบฝังในหลุมวัดระดับน้ำ ค่าที่ได้จากพิโซมิเตอร์สามารถนำเสนอใน 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ 1) ความดันน้ำ (Pressure) ซึ่งแสดงเป็นหน่วย bar, ksc หรือ MPa 2) ศักย์ความดันน้ำ (Pressure Head) ซึ่งวัดเป็นความสูงของน้ำจากระดับหัววัด มีหน่วยเป็นเมตรน้ำ และ 3) ความสูงน้ำ (Piezometric Head) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงระดับน้ำเทียบกับระดับน้ำทะเลปานกลาง (ม.รทก.) ทั้งนี้ ข้อมูลเหล่านี้ล้วนสะท้อนสถานะความดันและการเคลื่อนที่ของน้ำในดินและโครงสร้างเขื่อน ซึ่งมีความสำคัญต่อการประเมินเสถียรภาพของเขื่อนในระยะยาว ตัวอย่างพิโซมิเตอร์และเครื่องมือวัดพฤติกรรมอื่นๆ ดังรูปที่ 2 [13]



รูปที่ 2 การตรวจวัดแรงดันน้ำด้วยพิโซมิเตอร์และเครื่องวัดพฤติกรรมอื่นๆ [13]

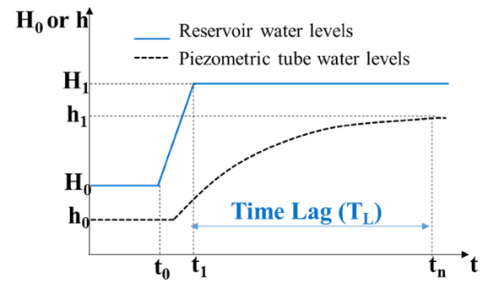
2.4 ดัชนีในการติดตามพฤติกรรมแรงดันน้ำ

ข้อมูลแรงดันน้ำ (pore pressure) ถือเป็นข้อมูลสำคัญที่สุดในการประเมินพฤติกรรมทรานส์เซียน [13-15] โดยการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำเมื่อเทียบกับเวลา เรียกว่า การตอบสนองของพิโซมิเตอร์ (piezometer response) หรือ pore pressure response [16] บทความนี้พิจารณาดัชนีสำหรับการประเมินการรั่วซึมในเขื่อนดิน ตามที่ [17] เสนอไว้ ได้แก่

ระยะเวลาล่าช้า (Time Lag, T_L)

คือ ช่วงเวลาระหว่างการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำจนถึงจุดที่พิโซมิเตอร์เริ่มแสดงค่าการเปลี่ยนแปลง โดยประกอบด้วย: 1) เวลาเดินทาง (Travelling time) เป็นเวลาที่แรงดันจากอ่างเก็บน้ำเคลื่อนที่ไปถึงปลายพิโซมิเตอร์ 2) เวลาเปิดใช้งาน เป็นระยะเวลาที่แรงดันรอบปลายพิโซมิเตอร์เข้าสู่ระบบวัดค่า ช่วงเวลาล่าช้าของเครื่องมือที่จะบันทึกผลแรงดันที่เปลี่ยนแปลง จากเวลาเริ่มต้น ณ จุดกำเนิดความดันที่มีการเปลี่ยนแปลงไปก่อนหน้านี้ เช่น ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำสูงขึ้นแล้วแต่กว่าที่เครื่องมือวัดจะวัดการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำได้จะใช้เวลาระยะหนึ่ง เนื่องจากพิโซมิเตอร์อาจยังไม่สามารถตอบสนองได้อย่างทันทีทันใด แรงดันที่ตรวจวัดได้ขณะนั้นจึงอาจไม่ใช่แรงดันน้ำสูงสุด เนื่องจากต้องอาศัยเวลาชั่วขณะหนึ่ง ให้น้ำเดินทางไหลซึมผ่านดินและผ่านไปยังหัวของพิโซมิเตอร์ จึงจะสามารถตอบสนองและอ่านค่า ณ จุดที่เกิดแรงดันน้ำสูงสุดได้ ดังภาพที่ 3 เรียกเวลาที่เหลื่อมกันนี้ว่า Time lag หรือ T_L

[17] ได้วิเคราะห์ FEM และวิเคราะห์ย้อนกลับ พบว่า ในสภาวะการไหลซึมปกติ เวลาที่พิโซมิเตอร์ตอบสนองหรือระยะเวลาล่าช้า (T_L) มีค่ามากกว่า 60 วันในบริเวณแกนเขื่อน และมากกว่า 100 วันในบริเวณท้ายน้ำ ในส่วนของการไหลซึมที่ผิดปกติ การตอบสนองมีรวดเร็ว T_L ที่อ่านค่าจึงมีค่าสั้นมาก ๆ แสดงถึงว่ามี การเปิดอาของรอยแตกในชั้นดินหรือชั้นหินในบริเวณนั้น ทำให้น้ำไหลซึมผ่านไปได้สะดวก

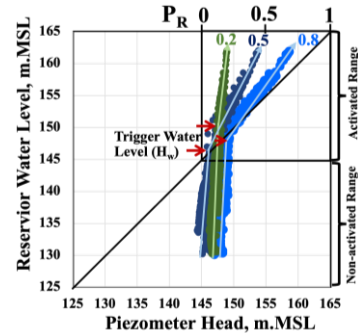


รูปที่ 3 ระยะเวลาล่าช้า (Time Lag, T_L) [16]

อัตราส่วนแรงดันน้ำ (Pressure ratio, P_R)

คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในพิโซมิเตอร์เทียบกับการเพิ่มขึ้นของระดับอ่างเก็บน้ำ ใช้เพื่อประเมินการสูญเสียแรงดันตามเส้นทางน้ำซึม เมื่อค่า $P_R = 1$ หมายถึงน้ำสามารถซึมผ่านช่องว่างหรือรอยร้าวได้โดยไม่สูญเสียแรงดัน

P_R คำนวณจากความสัมพันธ์ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหัวน้ำของพิโซมิเตอร์และระดับน้ำอ่างเก็บน้ำ (ดังรูปที่ 4) หากตำแหน่งเครื่องมือวัดมีการติดตั้งในจุดสำคัญของเขื่อน สามารถนำไปทำแผนที่เส้นระดับ P_R เพื่อช่วยระบุแนวทางของการกัดเซาะภายใน



รูปที่ 4 อัตราส่วนแรงดันน้ำ (Pore Pressure Ratio, P_R) [17]

3. พฤติกรรมทรานส์เซียนที่ถูกประเมินจากเครื่องมือวัด

บทความนี้ใช้ข้อมูลแรงดันน้ำที่เครื่องมือถูกติดตั้งไว้ในตำแหน่งต่าง ๆ ของเขื่อนดิน ที่มีความสูง 30 เมตร โดยฐานรากมีชั้นดินและชั้นหินที่ไม่ได้มีการแก้ไขให้มีความที่บ้น้ำที่เพียงพอ นำมาเป็นการศึกษาในการประเมินการรั่วซึม

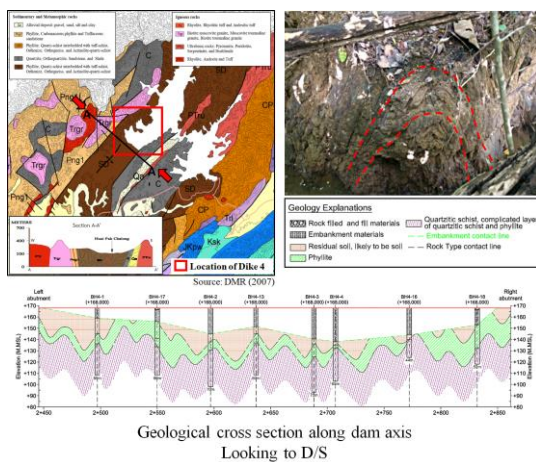
3.1 ธรณีวิทยา หน้าตัดและตำแหน่งของเครื่องมือวัด

เขื่อนที่นำมาศึกษานี้เป็น saddle dam ของโครงการโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งก่อสร้างขึ้นระหว่างปี พ.ศ. 2511 ถึง พ.ศ. 2515 โดยตัวเขื่อนวางบนชั้นที่ไม่ได้มีการปรับปรุงฐานรากให้มีความที่บ้น้ำเพียงพอ ระดับสันเขื่อนและความสูงสูงสุดของตัวเขื่อนอยู่ที่ 168 ม.รทก. และ 30 ม. ตามลำดับ เขื่อนตั้งอยู่ในบริเวณที่มีลักษณะทางธรณีวิทยาค่อนข้างซับซ้อน ประกอบด้วยหินแปร ซึ่งได้รับอิทธิพลจากธรณีแปรสัณฐาน (Tectonic) จากการแทรกตัวของมวลหินอัคนีในบริเวณใกล้เคียง ส่งผลให้เกิดโครงสร้างชั้นหินแปร (foliation) ซึ่งมีแนววางตัวในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ และอยู่ในแนวเกือบตั้งฉากกับแกนเขื่อน ชั้นฐานรากของเขื่อนประกอบด้วย ชั้น Residual soil, ชั้น Hydraulic fracturing (คาดการณ์ว่าเป็นชั้นที่มีการไหลซึม), ชั้นหิน phyllite และชั้นหิน Quartzitic schist [41, 49] รูปตัดตามแนวแกนเขื่อนจากการเจาะสำรวจ และการตรวจสอบภาคสนามแสดงไว้ในรูปที่ 5 และ 6 โดยการศึกษาครั้งนี้ อ้างอิงข้อมูลธรณีวิทยาที่ได้จากการสำรวจในอดีต การตรวจสอบและทำ

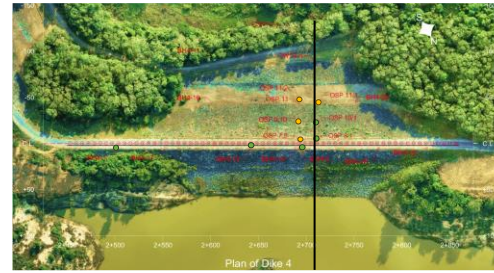
แผนที่ของแหล่งหินในพื้นที่ การวิเคราะห์ธรณีวิทยาในระดับภูมิภาค รวมถึงข้อมูลหลุมเจาะต่าง ๆ โดยเขียนได้ติดตั้งพีโซมิเตอร์บริเวณตำแหน่งสำคัญต่าง ๆ ดังรูปที่ 5 ที่แสดงตำแหน่งและข้อมูลการติดตั้งเครื่องมือวัด โดยการวิเคราะห์และประเมินการรั่วซึมภายใน โดยการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในอ่างเพิ่มขึ้นและความสูงของแรงดันน้ำจะถูกเปรียบเทียบ นำมาคำนวณ T_L ตั้งแต่จุดเริ่มต้น (Activated point) ถึง จุดสูงสุด (Peak of Reservoir water levels) ที่มีการบันทึกข้อมูลตั้งแต่ ปี ค.ศ. 2003-2024

3.2 พฤติกรรมการไหลซึมที่แปลผลจากเครื่องมือวัด

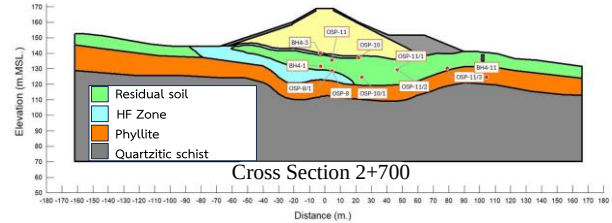
การเปลี่ยนแปลงของ T_L ในพีโซมิเตอร์ที่ติดตั้งในชั้น residual soil ระหว่างปี 2003 ถึง 2024 แสดงไว้ในรูปที่ 7 พบพฤติกรรมการกัดเซาะตามเวลา โดยบริเวณแนวแกนเขื่อน (dam axis) ค่า T_L ที่ตรวจวัดจาก OSP8 และ OSP8/1 แสดงค่าระยะเวลาล่าช้าที่ต่ำมาก (น้อยกว่า 1 วัน) เป็นไปได้ว่า Internal Erosion นั้นเกิดขึ้นแล้วก่อนที่จะมีการติดตั้งพีโซมิเตอร์ ตัวอย่างที่ค่อนข้างชัดเจนในพฤติกรรมการกัดเซาะ ได้แก่ OSP 10 โดย T_L ลดลง จากปี 2003, 2013 และ 2024 คือ 50 วัน ลดลง เป็น 20 และ น้อยกว่า 1 วัน ตามลำดับ เมื่อประเมิน เส้นชั้นความสูงของ T_L ด้วยข้อมูลแรงดันน้ำ ปี 2024 ลงในตามหน้าตัดขวางของชั้น Residual soil พบว่าบริเวณด้านหน้าเขื่อนถึงระยะ off-set จากแกนเขื่อนไป 10 เมตร มีค่าเหลือเวลาที่ต่ำมาก ($T_L < 1$ days) ขณะที่ off-set จากแกนเขื่อนไป 55, 110, และ 150 เมตร มีค่าเหลือเวลาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ยังคงอยู่ในระดับที่ต่ำ ($T_L = 1-10, 10-15$ และ >15 days ตามลำดับ) แสดงถึงว่ารอยแตกในชั้นหินเกิดการขยายตัว เปิดอ้ามากที่สุด วัสดุในรอยแตกเกิดการชะล้างตลอดเวลา จนทำให้น้ำที่ไหลซึมสามารถไหลผ่านไปได้สะดวกในอัตราร้อยละ 100 ต่อระดับน้ำในอ่าง ปริมาณน้ำจำนวนมากไหลผ่านไปยังพีโซมิเตอร์ระยะเวลาล่าช้าหรือค่าเหลือจึงตอบสนองต่อระดับน้ำในอ่างอย่างทันทีทันใด ($T_L=0$ day)



รูปที่ 5 ลักษณะธรณีวิทยาของเขื่อน



ก) Plan View



ข) Cross Section 2+700

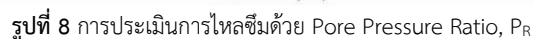
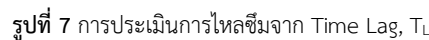
ชื่อของพีโซมิเตอร์	ปีที่ติดตั้ง	ตำแหน่งของพีโซมิเตอร์
OSP8	2003	Dam Axis
OSP10	2003	offset distance 7.5 m from dam axis
OSP8/1, OSP10/1	2007	Dam Axis
BH4-1, BH4-13	2017	Dam Axis
OSP 11/2	2007	offset distance 45 m from dam axis
OW4	2007	offset distance 85 and 90 m from dam axis
BH4-11	2017	offset distance 67.5 m from dam axis

จ) หน้าตัดขวาง Sta. 2+700

รูปที่ 6 ข้อมูลการติดตั้งและของตำแหน่งเครื่องมือวัด

3.3 พฤติกรรมการไหลซึมที่แปลผลจากเครื่องมือวัด

การเปลี่ยนแปลงของ T_L ในพีโซมิเตอร์ที่ติดตั้งในชั้น residual soil ระหว่างปี 2003 ถึง 2024 แสดงไว้ในรูปที่ 7 พบพฤติกรรมการกัดเซาะตามเวลา โดยบริเวณแนวแกนเขื่อน (dam axis) ค่า T_L ที่ตรวจวัดจาก OSP8 และ OSP8/1 แสดงค่าระยะเวลาล่าช้าที่ต่ำมาก (น้อยกว่า 1 วัน) เป็นไปได้ว่า Internal Erosion นั้นเกิดขึ้นแล้วก่อนที่จะมีการติดตั้งพีโซมิเตอร์ ตัวอย่างที่ค่อนข้างชัดเจนในพฤติกรรมการกัดเซาะ ได้แก่ OSP 10 โดย T_L ลดลง จากปี 2003, 2013 และ 2024 คือ 50 วัน ลดลง เป็น 20 และ น้อยกว่า 1 วัน ตามลำดับ เมื่อประเมิน เส้นชั้นความสูงของ T_L ด้วยข้อมูลแรงดันน้ำ ปี 2024 ลงในตามหน้าตัดขวางของชั้น Residual soil พบว่าบริเวณด้านหน้าเขื่อนถึงระยะ off-set จากแกนเขื่อนไป 10 เมตร มีค่าเหลือเวลาที่ต่ำมาก ($T_L < 1$ days) ขณะที่ off-set จากแกนเขื่อนไป 55, 110, และ 150 เมตร มีค่าเหลือเวลาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ยังคงอยู่ในระดับที่ต่ำ ($T_L = 1-10, 10-15$ และ >15 days ตามลำดับ) แสดงถึงว่ารอยแตกในชั้นหินเกิดการขยายตัว เปิดอ้ามากที่สุด วัสดุในรอยแตกเกิดการชะล้างตลอดเวลา จนทำให้น้ำที่ไหลซึมสามารถไหลผ่านไปได้สะดวกในอัตราร้อยละ 100 ต่อระดับน้ำในอ่าง ปริมาณน้ำจำนวนมากไหลผ่านไปยังพีโซมิเตอร์ระยะเวลาล่าช้าหรือค่าเหลือจึงตอบสนองต่อระดับน้ำในอ่างอย่างทันทีทันใด ($T_L=0$ day)



พฤติกรรมการกัดเซาะภายในเป็นกระบวนการที่ค่อยเป็นค่อยไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ ความเค้นจากการโค้งตัว (arching stress) ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ และระยะเวลาการเปิดใช้งาน แผนภาพเส้นชั้นความสูงของ P_R ในมุมมองจากด้านบน สำหรับทั้งสามช่วงเวลา (รูปที่ 9) แสดงถึงการแผ่กระจาย การพัฒนา และความก้าวหน้าตามเวลาของการกัดเซาะภายในจากแรงดันน้ำ โดยเฉพาะบริเวณศูนย์กลางที่ Sta. 2+700 ซึ่งสอดคล้องกับบริเวณที่พบ wet area และผิวการเคลื่อนพังที่เกิดขึ้นเมื่อปี 1995

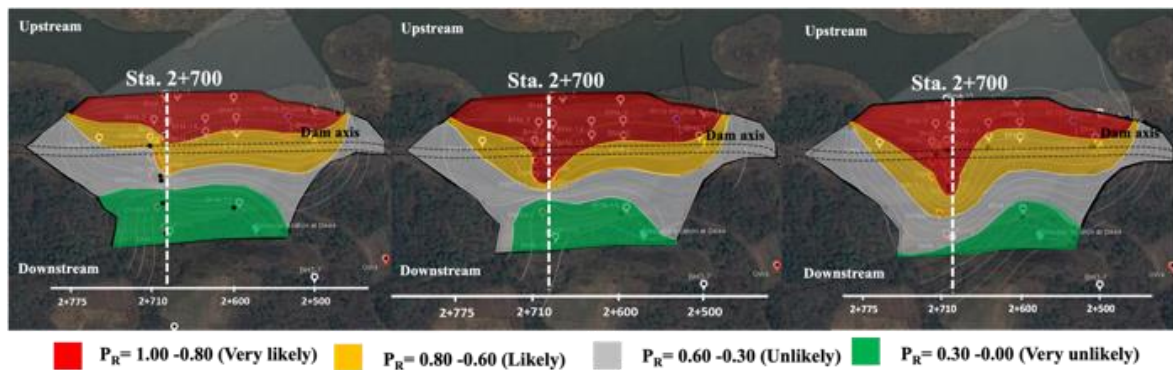
GTE-04-5

ช่วงเวลาปัจจุบัน เนื่องจากสะท้อนระดับแรงดันน้ำเทียบกับระดับน้ำในอ่างแบบ real-time จึงเป็นดัชนีที่ใช้ในการวินิจฉัยความเสี่ยงของการรั่วซึมจากเครื่องมือวัดได้ ที่ประเมินความรุนแรงในเบื้องต้นและตำแหน่งที่มีความเสี่ยงสูงของการกัดเซาะได้ ดังนั้นการใช้ ทั้งสองดัชนีร่วมกัน จะเพิ่มความแม่นยำในการวินิจฉัย โดย T_L ใช้ดูแนวโน้มพฤติกรรมกรรมการรั่วซึม ส่วน P_R ใช้ระบุความรุนแรงและขอบเขตของการกัดเซาะในแต่ละช่วงเวลา

ตารางที่ 1 ข้อดี-ข้อจำกัด ของการวินิจฉัยการรั่วซึมด้วย T_L , P_R

ประเด็น	ข้อดี	ข้อจำกัด
เกณฑ์วินิจฉัยที่เสนอ	ใช้ข้อมูลจริงจากพีโซมิเตอร์และระดับน้ำในอ่างย้อนหลัง ที่สามารถวิเคราะห์แนวโน้มพฤติกรรมกรรมการไหลซึมได้	ต้องการข้อมูลย้อนหลังอย่างน้อย 10 ปีขึ้นไป จำเป็นต้องมีการติดตั้งพีโซมิเตอร์กระจายตัวตามหน้าตัด หรือตำแหน่งสำคัญ ๆ

การประยุกต์ใช้งาน	สามารถใช้วินิจฉัยความเสี่ยงเบื้องต้นในเขื่อนที่มีการใช้งานจริง	ต้องมีข้อมูลธรณีวิทยาและบันทึกเหตุการณ์ของเขื่อนที่ครบถ้วน
ความแม่นยำของเกณฑ์	เป็นตัวชี้วัดหนึ่งที่ใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจที่สร้างจากข้อมูลแรงดันน้ำจริง	อาจต้องตรวจสอบซ้ำด้วยการวิเคราะห์การไหลซึมเชิงตัวเลข (Seepage analysis) หรือการสำรวจอื่น ๆ เช่น Visual inspection, Geophysical methods
การนำไปใช้งานกับเขื่อนอื่น ๆ	สามารถปรับเกณฑ์ให้เหมาะสมตามลักษณะเฉพาะของแต่ละเขื่อนได้ ใช้เป็นแนวทางวางแผนการติดตั้งเครื่องมือและการวิเคราะห์ข้อมูลของเขื่อนใหม่ได้	แต่ละเขื่อนมีพฤติกรรมไหลซึมเฉพาะตัว ต้องตั้งเกณฑ์เฉพาะรายกรณี ใช้ได้จำกัดในเขื่อนที่มีข้อมูลย้อนหลัง และ ข้อมูลธรณีวิทยาที่เพียงพอเท่านั้น



รูปที่ 9 เส้นชั้นความสูงความก้าวหน้าของ P_R จากปี 2003 ถึง 2024



รูปที่ 10 พื้นที่ชุ่มน้ำและการต่อท่อ 4 เมตร เพื่อตรวจวัดแรงดันน้ำ [17]

4. การตรวจสอบพฤติกรรมกรรมการรั่วซึมกับข้อมูลในสนาม

พฤติกรรมของค่า Time Lag (T_L) ร่วมกับแรงดันน้ำ (P_R) ในอ่างเก็บน้ำ เป็นตัวบ่งชี้สำคัญของการเกิด Internal Erosion ภายในเขื่อนดินถม โดยเฉพาะในบริเวณฐานรากที่ไม่ได้รับการปรับปรุงให้มีความทึบน้ำที่เพียงพอ แรงดันน้ำที่สูงกว่าความต้านทานของดินสามารถทำให้เกิดรอยร้าวในวัสดุเขื่อน เมื่อรอยร้าวเหล่านี้เปิดออก น้ำจะไหลซึมผ่านได้มากขึ้น และทำให้วัสดุอุดรอยร้าวค่อย ๆ ถูกชะล้างออก ซึ่งนำไปสู่การกัดเซาะเป็นรูโพรงแบบถาวร

การตรวจวัดพฤติกรรมของเขื่อนในช่วงที่ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำสูงแสดงให้เห็นหลักฐานของการรั่วซึมที่เกิดขึ้นภายในตัวเขื่อนและฐานราก T_L ที่ลดลงจนถึงศูนย์ แสดงถึงการที่รอยร้าวในชั้นหินเปิดเต็มที่ และน้ำสามารถซึมผ่านได้อย่างอิสระ พฤติกรรมนี้สัมพันธ์กับการปรากฏของพื้นที่ชุ่มน้ำบริเวณด้านท้ายเขื่อน (downstream) ที่สามารถสังเกตได้ชัดเมื่อระดับน้ำในอ่างสูงถึง +160 ม.รทก. ตามที่แสดงในภาพถ่ายและ

ผลการตรวจสอบภาคสนาม นอกจากนี้ ยังพบหลักฐานแรงดันน้ำสูงผิดปกติในท่อ standpipe ที่มีการต่อยาวขึ้น 4 เมตร บริเวณใกล้จุดที่ตรวจพบพื้นที่ชุ่มน้ำ ดังรูปที่ 10 ซึ่งสนับสนุนข้อสันนิษฐานว่ามีการรั่วซึมเกิดขึ้นจากภายในฐานรากและทะลุผ่านมายังพื้นที่ท้ายน้ำ สอดคล้องกับแผนที่เส้นชั้นความสูงในรูปที่ 7 ถึง 9 การรวมกันของข้อมูลจากเครื่องมือวัดและสังเกตการณ์ภาคสนามเหล่านี้ ถือเป็นหลักฐานสำคัญที่แสดงถึงเส้นทางการรั่วซึมที่กำลังพัฒนาและอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของเขื่อนในอนาคต

นอกจากนี้ในเชิงการตรวจสอบด้วย FEM [18] ได้สร้างแบบจำลอง FEM เพื่อจำลองการเปิดอาชวชนขึ้นหิน โดยให้ค่าความซึมผ่านของชั้นหินเพิ่มขึ้นตามแรงดันน้ำ และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการทดสอบ Lugeon ที่ตำแหน่งท้ายเขื่อน พบว่า บริเวณ Sta 2+720 แสดงพฤติกรรมแบบ Wash out คือ รอยแตกในชั้นหินสามารถเปิดออกภายใต้แรงดันน้ำสูง สอดคล้องกับค่าความดันน้ำ (P_R) จากเครื่องมือ

วัด บ่งชี้ถึงโอกาสของการไหลซึม [19] ใช้เทคนิค Ground Aeration Sound (GAS) ตรวจวัดเสียงฟองอากาศที่เกิดจากการไหลซึม พบว่า มีค่าการไหลสูง บริเวณใกล้ Sta. 2+700 ซึ่งยืนยันแนวโน้มของการเกิดรั่วซึม จากการวิเคราะห์หลายวิธีที่สอดคล้องกันทั้งจากแบบจำลองภาคสนาม และเสียงการไหลของน้ำใต้ดิน.

5. บทสรุป

การประเมินความเสี่ยงจากการพังทลายภายในเขื่อนดินถม โดยใช้ระยะเวลาล่าช้า (Time Lag, T_L), อัตราส่วนแรงดันน้ำรูพรุน (Pore Pressure Ratio, P_R) เป็นแนวทางใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นจากข้อมูลเชิงประจักษ์ที่ได้จากการติดตามข้อมูลโพซิเตอร์ย้อนหลังกว่า 21 ปีในเขื่อนตัวอย่าง ซึ่งช่วยสะท้อนพฤติกรรมของการไหลซึมและการกัดเซาะภายในได้อย่างมีประสิทธิภาพ แนวทางนี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือประกอบการประเมินความเสี่ยงสำหรับเขื่อนที่มีเงื่อนไขคล้ายคลึงกัน และเป็นแนวทางวางแผนสำหรับการจัดการด้านความปลอดภัยของเขื่อน

อย่างไรก็ตาม เกณฑ์ดังกล่าวยังมีข้อจำกัดที่ควรพิจารณา เช่น จำเป็นต้องมีข้อมูลย้อนหลังที่เพียงพอ รวมถึงข้อมูลธรณีวิทยาและเหตุการณ์ในอดีตของตัวเขื่อนเพื่อช่วยยืนยันผลการประเมิน อีกทั้งแต่ละเขื่อนมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน ทั้งในด้านมิติทางกายภาพ โครงสร้างภายใน และฐานราก ดังนั้นจึงควรปรับใช้เกณฑ์ให้เหมาะสมกับบริบทของเขื่อนแต่ละแห่ง สำหรับเขื่อนที่อยู่ระหว่างการออกแบบ เกณฑ์นี้สามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการวางแผนการติดตั้งเครื่องมือ ตรวจวัดการไหลซึม และการเก็บข้อมูลในระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Fell R, Foster M, Cyganiewicz J, Sills G, Vroman N and Davidson R. (2009, Apr.). Risk Analysis for Dam Safety: A Unified Method for Estimating Probabilities of Failure of Embankment Dams by Internal erosion and Piping. The university of new south wales, Australia. [Online]. Available: <http://www.civeng.unsw.edu.au>
- [2] Foster Mark and Fell Robin. 1999. Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria. *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering*. 127 (5): 398-407.
- [3] Foster Mark, Fell Robin and Spannagle Matt. 2000. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*. 37 (5): 1000-1024.
- [4] Radzicki, K., & Stoliński, M. (2024). Seepage monitoring and leaks detection along an earth dam with a multi-sensor thermal-active system. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(9). doi:10.1007/s10064-024-03826-3.
- [5] Hvorslev, M. J. (1951). Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations (No. 36). U.S. Army Waterways Experiment Station, Mississippi, United States.
- [6] Bonelli, S., & Royet, P. (2001). Delayed response analysis of dam monitoring data. ICOLD European symposium on dams in a European context, 25-27 June, 2001, Geiranger, Norway.
- [7] Razavi, B., Parehkar, M., & Gholami, A. (2011). Investigation on Pore Water Pressure in Core of Karkheh Dam. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 5(11), 539-542.
- [8] Thongthamchart, C., & Brohmsubha, P. (2014). The Safety Criteria for Geotechnical Instruments on the Internal Erosion in Embankment Dams. *International Symposium on DAMS in a Global Environmental Challenges*, 1-6 June, Bali, Indonesia.
- [9] ICOLD. 2017. Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations. Bulletin 164, volume 1: Internal Erosion Processes. ICOLD Paris, France.
- [10] Engemoen, W.O. (2011). Bureau of reclamation experiences with internal erosion incidents. *Proc. Internal Erosion in Embankment Dams and Their Foundations*, European Working Group of ICOLD, Brno, Czech Republic, p. 11-18.
- [11] Curt Corinne, Talon Aurélie and Mauris Gilles. 2011. A dam assessment support system based on physical measurements, sensory evaluations and expert judgements. *Measurement*. 44 (1): 192-201.
- [12] C. CURT, A. TALON, G. MAURIS, "USING PHYSICAL MEASUREMENTS, SENSORY EVALUATIONS AND EXPERT JUDGEMENTS IN A DAM ASSESSMENT SUPPORT SYSTEM," in *2th Imeko Joint Symposium on Man Science & Measurement*, France, Sep. 3 – 5, 2011.
- [13] Warakorn Mairaing, Wiphada Thepjunthra, and Thawatchai Chalernpornchai, . 2023. Hydraulic Fracturing in Earth Dam Monitoring by Dam Instruments. *Proceeding of the 21st Southeast Asian Geotechnical Conference and 4th AGSSEA Conference (SEAGC-AGSSEA 2023)*
- [14] FEMA. (2015). Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion. Interagency Committee on Dam Safety (ICODS), Edited by S. Leffel. Washington, DC: FEMA.
- [15] GERD. (2019). Semi-Quantitative Risk Assessment on Stability of Saddle Dikes of Sirikit Dam. Electricity Generating Authority of Thailand. Final Report. March, 2019. (in Thai).
- [16] Wang, S. W., & Bao, T. F. (2013). Monitoring Model for Dam Seepage Based on Lag Effect. *Applied Mechanics and Materials*, 353–356, 2456–2462. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.353-356.2456.
- [17] Wiphada Thepjunthra, Warakorn Mairaing, Montri Jinakulwipat, Thawatchai Chalernpornchai, Bunpoat Kunsuwan. Piezometer Time-Lag and Pore Pressure Ratio for Identification of Dam Internal Erosion. *Civil Engineering Journal*. <http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-03-01>

[18] Khomjak Klinpakdee, “The study of developing seepage model for weathered foundation rock: A case study of saddle dike No.4,” M.S. thesis, Department of civil engineering, Faculty of engineering, Kasetsart university, 2013 (in Thai).

[19] Apiniti et al. “Preliminary results of Ground Aeration Sound (GAS) survey for SRK dike-4, Electricity Generating Authority of Thailand” (2014).