

การตัดสินใจหยุดขุดจากสภาพการก่อสร้างจริงของกำแพงทึบน้ำในงานเขื่อน

Decision to Terminate Excavation for Slurry Walls in Dam

กรกฤษณ์ วิเชียรพงษ์^{1,*} วรากร ไม้เรียง² บรรพต กุลสุวรรณ³ และวิภาดา เทพจันทร์⁴

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.นครปฐม

⁴ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

*Corresponding author; E-mail address: konkit.wi@ku.th

บทคัดย่อ

เขื่อนดินที่ใช้เป็นกรณีศึกษา ซึ่งเปิดใช้งานมากกว่า 40 ปี มีฐานรากวางอยู่บนชั้นดินและชั้นหินที่ผุพัง และไม่ได้รับการปรับปรุงให้มีความทึบน้ำอย่างเพียงพอก่อนการก่อสร้าง ปัจจุบันได้มีการแก้ไขด้วยการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำบริเวณแกนเขื่อนโดยการขุดร่องด้วยเครื่องจักร Hydraulic grab กับ Hydromill บทความนี้พัฒนาเกณฑ์การตัดสินใจหยุดขุดอย่างเป็นระบบ โดยใช้ข้อมูลจากหลุมเจาะ สภาพธรณีวิทยาที่ได้จากการขุดจริง ข้อมูลการทำงานของเครื่องจักร และความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญ มาประมวลเป็นดัชนีเชิงปริมาณ แบ่งออกเป็น 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ ข้อมูลจากเครื่องจักร (30%) ข้อมูลเศษหินจากการก่อสร้าง (40%) และข้อมูลการออกแบบ (30%) โดยกำหนดเกณฑ์คะแนนสำหรับหยุดขุดที่ 75/100 สำหรับกำแพงทึบน้ำระดับความลึกปกติ และ 85/100 สำหรับกำแพงระดับความลึกมาก ณ ปัจจุบันผลการทดลองใช้ในแผนก่อสร้าง 50 แผน จาก 65 แผน สามารถยืนยันถึงความเหมาะสมของเกณฑ์การหยุดและได้นำไปใช้เป็นแนวทางหยุดขุดกำแพงทึบน้ำของโครงการอื่นๆ ดัชนีดังกล่าวช่วยให้สามารถควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างได้ดีขึ้น ลดความเสี่ยงจากการขุดลึกเกินความจำเป็น และเพิ่มความมั่นคงของเขื่อนในระยะยาว อีกทั้งยังเป็นแนวทางให้กับเขื่อนดินอื่น ๆ ที่มีสภาพฐานรากคล้ายคลึงกันได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: กำแพงทึบน้ำ, เกณฑ์การตัดสินใจหยุดขุดกำแพงทึบน้ำ, เครื่องจักร Hydromill.

Abstract

The studied earth dam, which has been in operation for over 40 years, was founded on residual soil and weathered rock layers that had not been adequately treated for seepage resistance prior to construction. Currently, a slurry wall is being constructed along the dam core to improve stability, using trench excavation methods with hydraulic grab and hydromill machinery. This article develops a systematic decision-making criterion for determining the stopping depth of excavation, based on borehole data, geological interpretations from actual excavation, machine performance records, and expert opinions. These

factors are integrated into a quantitative index consisting of three main components: machine performance data (30%), excavated material characteristics (40%), and design information (30%). The recommended stopping criteria are set at 75 out of 100 points for normal-depth Slurry walls, and 85 out of 100 for deeper walls. To date, the implementation results from 50 out of 65 construction panels have confirmed the appropriateness of the stopping criteria, which have subsequently been adopted as a guideline for cutoff wall excavation in other related projects. The index helps improve construction quality control, reduces the risk of unnecessary deep excavation, and enhances the long-term stability of the dam. Moreover, it serves as a practical guideline for similar earth dams with comparable foundation conditions.

Keywords: Slurry wall, Decision Excavation Termination, Hydromill machinery.

1. บทนำ

การรั่วซึมภายในเขื่อนดินเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของโครงสร้างและความปลอดภัยในระยะยาว เขื่อนดินที่เปิดใช้งานมาเป็นเวลานานมีแนวโน้มเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในตัวเขื่อนและฐานรากอันเนื่องมาจากปัจจัยต่าง ๆ ที่กระทำกับเขื่อน เช่น การเสื่อมสภาพของวัสดุก่อสร้าง การสะสมของแรงดันน้ำจนเกิดการโพรงช่องว่างภายในที่อาจไม่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ (Foster et al., 2000; Fell et al., 2008) หากไม่มีการวินิจฉัยและปรับปรุงอย่างเหมาะสม ปัญหาดังกล่าวอาจพัฒนาไปสู่กระบวนการกัดเซาะภายใน (internal erosion) ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่นำไปสู่ความเสียหายของเขื่อนอย่างรุนแรง

แนวทางการจัดการปัญหาการรั่วซึมของเขื่อนในปัจจุบันมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งในด้านการตรวจสอบและวินิจฉัย เช่น การติดตั้งระบบเครื่องมือวัด การวิเคราะห์แรงดันน้ำ และการใช้เทคนิคทางธรณีฟิสิกส์ ร่วมกับการปรับปรุงเชิงโครงสร้าง การก่อสร้างกำแพงทึบน้ำ (Cutoff wall) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการลดและปิดกั้นการรั่วซึม โดยเฉพาะการใช้เทคโนโลยี Hydromill ที่สามารถควบคุมความลึกและแนวการขุดได้อย่างแม่นยำผ่านระบบดิจิทัล และสามารถติดตามพารามิเตอร์สำคัญแบบ real -

time เช่น ค่าแรงดัน ค่าการสั่นสะเทือน และค่าความดันของสารละลายต่าง ๆ (ICOLD, 2017; Trevi Spa, 2022) ตัวอย่างโครงการปรับปรุงเขื่อนขนาดใหญ่ในต่างประเทศ เช่น Wolf Creek Dam และ Herbert Hoover Dike ก็ได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวร่วมกับการประเมินทางธรณีวิทยาและข้อมูลเครื่องมือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการซ่อมแซม (Bruce et al., 2013; USACE, 2011) ความท้าทายสำคัญในการออกแบบและก่อสร้างกำแพงกันน้ำ คือ การกำหนดระดับความลึกที่เหมาะสมในการหยุดชุดร่องกำแพงกันน้ำ ซึ่งการที่ขุดไม่ถึงชั้นวัสดุที่มีคุณสมบัติกันน้ำเพียงพอ อาจไม่สามารถแก้ปัญหาการรั่วซึมได้ ในทางกลับกัน การขุดที่ลึกเกินจำเป็น ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายโดยไม่ก่อให้เกิดประโยชน์เชิงวิศวกรรมเพิ่มเติม (Dunnicliff & Green, 1993; Hoover Dike Report, 2012) ดังนั้น การพัฒนาเกณฑ์การหยุดชุดจึงเป็นสิ่งจำเป็นและมีความสำคัญ

บทความนี้ใช้กรณีศึกษาของเขื่อนดินที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 40 ปี ซึ่งมีฐานรากวางอยู่บนชั้นดินผุ และพบปัญหาการรั่วซึม จึงได้มีการออกแบบซ่อมแซมและดำเนินการปรับปรุงโดยการก่อสร้างกำแพงกันน้ำจากระดับสันเขื่อนลงไปถึงชั้นหินฐานราก ด้วยเครื่องจักร Hydromill โดยพิจารณาข้อมูลธรณีวิทยา รายละเอียดวัสดุที่ขุดขึ้นมา พารามิเตอร์จากเครื่อง Hydromill เช่น ค่าแรงดันและแรงสั่นสะเทือน ร่วมกับการคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญนำมาประเมินและเสนอเกณฑ์ในการตัดสินใจหยุดชุดร่องกำแพงกันน้ำอันสามารถเป็นแนวทางและประยุกต์ใช้ในโครงการเขื่อนอื่น ๆ ได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 กำแพงกันน้ำ (Slurry wall)

กำแพงกันน้ำได้ดิน (Slurry wall) เป็นองค์ประกอบทางวิศวกรรมที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการควบคุมและป้องกันการไหลซึมของน้ำผ่านตัวเขื่อนและฐานราก โดยเฉพาะในเขื่อนดินที่ตั้งอยู่บนชั้นดินหรือหินซึ่งมีลักษณะโปร่งน้ำหรือมีแนวรอยแตกที่สามารถนำพาได้ หากไม่ได้รับการแก้ไขอาจนำไปสู่การเกิดปรากฏการณ์ piping หรือการพังทลายของเขื่อนได้ (วรการ, ม.ป.ป.)

ในประเทศไทยมีการใช้เทคนิคการก่อสร้างกำแพงกันน้ำมาตั้งแต่ช่วงปี 2520 เช่น ในโครงการเขื่อนยางชุม, เขื่อนห้วยศาลา, เขื่อนทับเสลา, และเขื่อนแม่กวง โดยเลือกใช้วิธีและวัสดุตามสภาพธรณีวิทยาและความเหมาะสมของแต่ละพื้นที่

Xanthakos (1979) ได้จำแนกประเภทของกำแพงกันน้ำออกเป็น 5 ประเภทหลัก ได้แก่

2.1.1 Earth Cutoffs

ใช้วัสดุดินธรรมชาติผสมเบนโทไนท์ โดยนิยมในพื้นที่กว้างซึ่งสามารถควบคุมคุณภาพได้ง่าย

2.1.2 Cement-Bentonite Cutoffs

ใช้ซีเมนต์ผสมกับน้ำโคลนเบนโทไนท์ในร่องขุดแล้วปล่อยให้แข็งตัว

2.1.3 Injected-Grout Curtain

ใช้เหล็ก H-beam กดลงในดินและอัดวัสดุผ่านปลายเหล็กเพื่อสร้างแนวกันน้ำ

2.1.4 Plastic Concrete Cutoffs

คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเบนโทไนท์ ซีเมนต์ ททรายและกรวด ซึ่งให้คุณสมบัติยืดหยุ่นและกันน้ำ

2.1.5 Concrete Slurry Wall

คอนกรีตเสริมเหล็กที่สามารถรองรับแรงดันดินและน้ำได้ในระดับสูง

International Commission on Large Dams (ICOLD, 1985) ได้กำหนดคุณสมบัติหลักของกำแพงกันน้ำที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานเขื่อนไว้ดังนี้:

- 1) ความกันน้ำ (Permeability) ควรน้อยกว่า 1×10^{-7} ซม./วินาที
- 2) ความยืดหยุ่น วัสดุควรมีโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ประมาณ 4–5 เท่าของดินฐานราก
- 3) ความแข็งแรงพลาสติกคอนกรีต (Plastic concrete) ควรมีกำลังอัดไม่เกิน 1.5 MPa เพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าวจากแรงภายนอก
- 4) ความต่อเนื่องของแนวก่อสร้าง รอยต่อแนวต้องระหว่างแผงต้องมีคุณสมบัติกันน้ำเช่นเดียวกับตัวกำแพง
- 5) ความสามารถในการรับแรงดันน้ำ กำแพงต้องหนาพอเพื่อหลีกเลี่ยงการเจาะทะลุ (Blowout Hydraulic Gradient) ที่เกินค่าความปลอดภัย

2.2 เครื่องจักรไฮโดรมิลล์ (Hydromill)

เครื่องจักรไฮโดรมิลล์ (Hydromill) เป็นอุปกรณ์เฉพาะทางที่ใช้ในการขุดร่องลึกและแคบสำหรับการสร้างกำแพงกันน้ำ (Slurry wall) หรือ ผนังกันดิน (Diaphragm walls) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในงานวิศวกรรมโยธาและงานก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน เช่น กำแพงกันน้ำใต้ดิน สถานีรถไฟใต้ดิน ที่จอดรถใต้ดิน และอุโมงค์ ทำงานโดยใช้ล้อกัดสองล้อที่หมุนเพื่อตัดและบดดินหรือหินในแนวตั้ง วัสดุที่ถูกตัดจะถูกผสมกับสารละลายเบนโทไนต์ช่วยรักษาเสถียรภาพของผนังร่องขณะขุด จากนั้นปั๊มจะดูดส่วนผสมของดินและสารละลายขึ้นมาเพื่อแยกดินออกจากสารละลายที่สถานีบำบัด (Desander) และส่งสารละลายที่ผ่านการกรองกลับไปยังร่องขุดเพื่อใช้ซ้ำ

ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องจักรไฮโดรมิลล์ประกอบด้วย

- 1) หัวกัด (Cutter wheel) ลักษณะเด่น 2 หัว อยู่ที่ปลายล่างสุดของของเครื่องจักร วางตัวในแนวตั้งตัดดินและหิน
- 2) ระบบการดูดตะกอน (Slurry circuit) ดูดเศษดินและหินที่ถูกตัดผ่านปั๊ม (Pump) หรือ Air-lift system
- 3) โครงห้วกัด (Cutter frame) โครงเหล็กยึดส่วนหัวตัดและระบบการควบคุมทิศทาง

4) ระบบควบคุมอัตโนมัติ (System control) ควบคุมการหมุนของหัวกัด, ระดับความลึก และ แนวการตัด สามารถตรวจวัดแสดงผลที่หน้าจอแสดงผลบันทึกดังรูปที่ 3

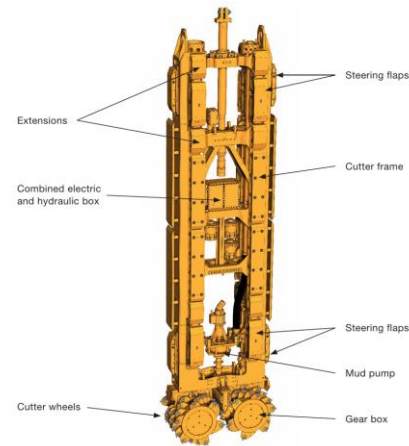
การก่อสร้างกำแพงกั้นน้ำโดยเครื่องจักรไฮโดรมิลล์ ตั้งแต่ปี 1984
ตัวอย่างโครงการก่อสร้างกำแพงกั้นน้ำดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างโครงการก่อสร้างกำแพงกั้นน้ำของบริษัท Bauer

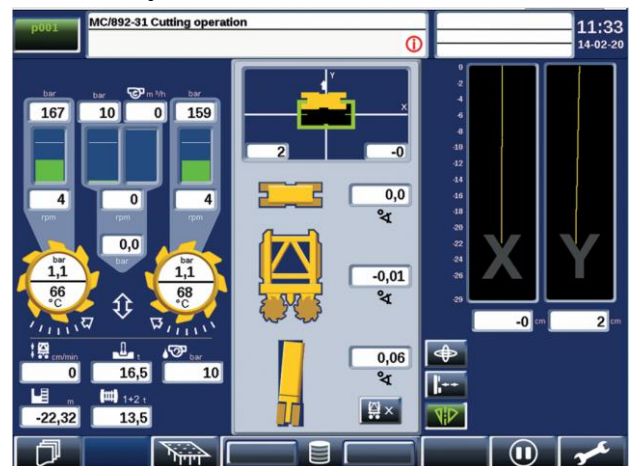
ปีที่ดำเนินการ	ประเทศที่ก่อสร้าง	โครงการ / พื้นที่	ประเภทเครื่องจักร	ข้อมูลเด่นอื่นๆ
1984	เยอรมนี	เขื่อนเก็บน้ำ Brombach	Cut-off Wall (BC 30)	โครงการแรกที่ใช้เครื่องตัดกำแพง BAUER
2008	สหรัฐอเมริกา	Tuttle creek dam	-	กำแพงกั้นน้ำที่ใช้การอัดฉีดน้ำปูน
2008	สหรัฐอเมริกา	Wolf creek dam	Hydromill	โครงการก่อสร้าง Secant pile
2012	สิงคโปร์	ไม่ระบุชื่อโครงการ	CBC 40 (Customized Cutter)	โครงการพิเศษตามคำสั่งลูกค้า
2018	ฝรั่งเศส	ปารีส (Paris)	CBC 30 – Low Headroom	สำหรับพื้นที่จำกัดความสูง
2019	เยอรมนี	Forggensee, Rosshaupten	BC 48 – Cut-off Wall	ใช้เครื่อง BC 48 สำหรับงานปิดกั้นน้ำ
2019	แคนาดา	Saskatoon	BC 50 + HDS 250	ชุดลึกสูง รองรับแรงดันในหินแข็ง



รูปที่ 1 เครื่องจักรไฮโดรมิลล์



รูปที่ 2 Main component of trench cutter



รูปที่ 3 หน้าจอแสดงผลของไฮโดรมิลล์

2.3 การตัดสินใจหยุดชุดกำแพงกั้นน้ำ

การตัดสินใจหยุดชุดกำแพงกั้นน้ำใต้ดิน หัวไปจะมี 2 วิธี ได้แก่
1) ดำเนินการหยุดตามการออกแบบ การออกแบบจะถูกตัดสินใจภายใต้ข้อมูลที่จำกัดในตอนเริ่มต้นประกอบด้วยข้อมูลธรณีวิทยา ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจและวิเคราะห์หาระดับความลึกของกำแพงกั้นน้ำที่เหมาะสมต่อสภาพธรณีวิทยา 2) ตัดสินใจการหยุดโดยผู้เชี่ยวชาญ ภายใต้ข้อมูลธรณีวิทยา คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ข้อมูลการออกแบบ และแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน เพื่อวิเคราะห์ระดับหยุดชุดที่เหมาะสมควรอยู่ต่ำกว่าชั้นดินซึมผ่านอย่างน้อย 1.5-2.0 เมตร เพื่อป้องกันการรั่วซึมที่ฐานของกำแพง จากการทบทวนวรรณกรรมสามารถสรุปเกณฑ์การหยุดในปัจจุบัน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยที่นำมาพิจารณาเป็นเกณฑ์ในการหยุดกำแพงกั้นน้ำ

เกณฑ์ที่นำมาพิจารณา	วิธีการพิจารณา	อ้างอิง
ข้อมูลการเจาะสำรวจ (Boring Log)	หยุดเมื่อถึงชั้นดิน/หินที่มีคุณสมบัติกั้นน้ำเพียงพอ	Geo-Solutions (2017)
วัสดุที่พบจากการขุด	วัสดุที่ขุดขึ้นมาเปลี่ยนเป็นดินเหนียวแข็ง/หิน ไม่มีกรวดหรือทราย	Geosystems Bruce (2013)

พารามิเตอร์จากเครื่องจักร	สังเกตการเพิ่มขึ้นของแรงดัน (Torque) และ Slurry pressure คงที่ โดยการแปลงผลจาก ใช้ Data logging	Trevi Spa (2022)
ความทึบน้ำ	หยุดเมื่อวัดค่า $K < 10^{-7}$ cm/s ด้วยการใช้ทดสอบในสนามและห้องปฏิบัติการ	Karkheh Dam Study (2001)
การตรวจสอบการสูญเสีย Slurry	การลดลงของ Slurry loss แสดงถึงการเข้าสู่ชั้นที่แน่นไม่รั่วซึม โดยใช้การติดตามผลแบบ Real time ในระหว่างขุด	Herbert Hoover Dike Project (2012)

2.4 การตัดสินใจโดยวิธีการให้น้ำหนัก

ขั้นตอนการให้น้ำหนักเกณฑ์หยุดขุดกำแพงตึกน้ำใต้ดิน เริ่มจากการกำหนดเกณฑ์ที่มีผลต่อการตัดสินใจ ประกอบด้วยข้อมูลจากเครื่องจักร, ข้อมูลเศษหินจากการก่อสร้าง และลักษณะธรณีวิทยา รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งก่อนการก่อสร้างและระหว่างการก่อสร้างเพื่อเก็บรวบรวมและคำนวณค่าน้ำหนัก ตรวจสอบและปรับแก้ คำนวณน้ำหนักไปใช้ในกระบวนการตัดสินใจ และการปรับใช้กับเกณฑ์หยุดขุด เนื่องจากหยุดขุดกำแพงตึกน้ำดำเนินการตัดสินใจจากกลุ่มข้อมูลจำนวนมาก แต่ละกลุ่มต้องการเกณฑ์การตัดสินใจที่เหมาะสมเพื่อให้กำแพงตึกน้ำสามารถปิดกั้นการไหลซึมได้จริงและเหมาะสม

Materials	Excavation Machine	Visual Inspection	Depth (m.)	Cutter Data					Cutting Materials		Geology		Final Decision
				Cutter Rotation	Hydraulic Pressure	Cutter Torque	Cutter Pressure	Penetration Rate	Color	Grain Size	Estimated form Design	Actual Interpretation	
Dam Embankment	Grab	Grab chunk	Record	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
	Grab	Grab chunk	Record	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
	Grab	Grab chunk	Record	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
	Grab	Grab chunk	Record	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
	Grab	Grab chunk	Record	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
	Grab	Grab chunk	Record	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
	Grab	Grab chunk	Record	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
	Grab	Grab chunk	Record	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
	Grab	Grab chunk	Record	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
Residual Soil	Grab	Grab chunk	Record	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
	Grab	Grab chunk	Record	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
	Grab	Grab chunk	Record	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
	Grab	Grab chunk	Record	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
	Grab	Grab chunk	Record	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
Phyllite	Cutter	Cutting	Record	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
	Cutter	Cutting	Record	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
	Cutter	Cutting	Record	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
	Cutter	Cutting	Record	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
	Cutter	Cutting	Record	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Not Accepted
Q. Schist	Cutter	Cutting	Record	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Likely
	Cutter	Cutting	Record	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Close to Accepted
	Cutter	Cutting	Record	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	From Design	Yes	Final Accepted
	Cutter	Design Level	Record								From Design		
	Cutter		Record								From Design		

รูปที่ 4 เกณฑ์การตัดสินใจหยุดขุดเบื้องต้น

การสร้างเกณฑ์การตัดสินใจหยุดขุดกำแพงตึกน้ำ มีลักษณะหยุดขุดกรณีใกล้เคียงกับการหยุดที่ปลายของเสาเข็มตอกและเป็นกรณีศึกษาใหม่ไม่มีเอกสารการอ้างอิงที่เกี่ยวข้องโดยตรง

3.2 เกณฑ์หยุดขุดร่องกำแพงตึกน้ำเบื้องต้น

ในระยะแรกของการศึกษา ได้นำข้อมูลจากการก่อสร้างกำแพงตึกน้ำจำนวน 5 แผงแรก มาสร้างเป็นเกณฑ์เบื้องต้นสำหรับการตัดสินใจหยุดขุดร่องกำแพงตึกน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อมีข้อมูลที่ได้จากการขุดจริงใน

3. วิธีการศึกษา

วิธีการสร้างเกณฑ์หยุดขุดกำแพงตึกน้ำมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดวัตถุประสงค์ของกำแพงตึกน้ำ
- 2) รวบรวมข้อมูลระหว่างกระบวนการขุดร่องกำแพงตึกน้ำและ

ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจเบื้องต้น

- 3) สรุปข้อมูลกำแพงตึกน้ำ 5 แผงแรก ให้เป็นเกณฑ์หยุดขุดร่องกำแพงตึกน้ำเบื้องต้น

- 4) ทดสอบเกณฑ์การหยุดขุดกำแพงตึกน้ำเบื้องต้น กับกำแพงตึกน้ำแผงที่ 6 – 10 เพื่อปรับปรุงดัชนีที่มีผลกระทบต่อการหยุดขุดกำแพงตึกน้ำ

- 5) สรุปข้อมูลที่มีผลต่อการตัดสินใจหยุดขุดกำแพงตึกน้ำ แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 แนวคิดการสร้างเกณฑ์หยุดขุดร่องกำแพงตึกน้ำใต้ดิน

แนวคิดการสร้างเกณฑ์การตัดสินใจหยุดขุดร่องกำแพงตึกน้ำ มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นดินและหินในพื้นที่ก่อสร้าง เพื่อให้สามารถกำหนดระดับความลึกที่เหมาะสมในหยุดขุดได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดยอาศัยข้อมูลที่รวบรวมได้ระหว่างกระบวนการขุดร่องและข้อมูลจากหลุมเจาะสำรวจเบื้องต้น

สนามเพิ่มขึ้น อาจมีการปรับปรุงเกณฑ์ดังกล่าวให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นตามสภาพหน้างาน โดยข้อมูลที่นำมาใช้พิจารณาแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มดังต่อไปนี้

3.2.1 ข้อมูลทั่วไป (General data)

เพื่อหาประกอบด้วยประเภทเครื่องจักร, ลักษณะวัสดุหิน/หินจากการก่อสร้าง และระดับความลึก

3.2.2 ข้อมูลเครื่องจักร (Machine data)

จุดมุ่งหมายของข้อมูลเครื่องจักรคือเป็นตัวแทนความแข็งของหิน ประกอบด้วย

- 1) อัตราการหมุนหัวกัด แสดงถึงอัตราการหมุนของหัวกัด (Cutter wheel) ดังรูปที่ 2 เมื่ออัตราการหมุนต่ำหมายถึงหินมีแข็งมาก แต่เมื่ออัตราหมุนสูงหมายถึงหินมีความแข็งต่ำหรือมีลักษณะเปราะแตกง่าย
- 2) ความดันไฮดรอลิก แสดงถึงความดันในร่องชุดที่กระทำต่อ Cutter wheel เมื่อความดันไฮดรอลิกสูงหมายถึงอาจเจอหินที่มีความแข็งมาก แต่เมื่อความดันไฮดรอลิกต่ำหมายถึงหินที่สามารถชุดได้ง่าย มีความแข็งต่ำเปราะแตกง่าย
- 3) น้ำหนักหัวกัด หมายถึงแรงดึงดูดของสลิงในการแขวนส่วนหัวกัดไฮโดรมิลล์ (Main component of cutter wheel) เมื่อน้ำหนักหัวกัดต่ำหมายถึงกำลังกัดหิน หากน้ำหนักหัวกัดสูงหมายถึงหัวกัดลอยตัว อีกทั้งน้ำหนักหัวกัดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของน้ำโคลนเบนโทไนต์ในระหว่างการชุดถึงความหนาแน่นสูงจะทำให้หัวกัดลอยตัว
- 4) ความเร็วการชุด (Penetration rate, m/hr.) หมายถึงอัตราการทำงานของไฮโดรมิลล์ ในหน่วยของ เมตรต่อชั่วโมง เมื่อเจอหินอ่อนความเร็วการชุดจะสูงขึ้น แต่ถ้าความเร็วการชุดต่ำอาจเจอหินแข็ง

3.2.3 ข้อมูลเศษหินจากการก่อสร้าง

ข้อมูลเศษหินจากการก่อสร้างเป็นกลุ่มข้อมูลที่แสดงถึงลักษณะของเศษวัสดุจากการชุดจำแนกชนิดของดิน/หิน ประกอบด้วยสีของวัสดุหินหรือหินและขนาดของวัสดุหินหรือหิน

3.2.4 ข้อมูลลักษณะธรณีวิทยา

ข้อมูลลักษณะธรณีวิทยาประกอบด้วยการประเมินมูลลักษณะธรณีวิทยาจากหลุมเจาะสำรวจ (Estimated from pilot drilling) เพื่อประเมินจากลักษณะธรณีวิทยาที่พบก่อนการก่อสร้างกำแพงทับน้ำ (Actual interpretation)

3.3 การปรับปรุงเกณฑ์การสร้างความหนาแน่น

ข้อมูล 5 แผนแรกได้พบว่าการวิเคราะห์เกณฑ์หยุดชุดร่องกำแพงทับน้ำเบื้องต้น พบว่าข้อมูลธรณีวิทยายังขาดข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ทำให้ต้องเพิ่มเติม ได้แก่ สัดส่วนขนาดหิน, สัดส่วนหินควอร์ตซิกซ์ซิสต์, ความกลมมนของหิน, ความแข็งของหิน, ระดับความผูกพัน และ รอยแตกของหิน เพื่อจำแนกชั้นธรณีวิทยาที่มีความต้องการเนื่องจากการแยกชั้นธรณีวิทยาในหน้าสนามที่เหมาะสม

3.4 การสรุปเกณฑ์หยุดชุดกำแพงทับน้ำใต้ดิน

จากข้อมูลในแผนที่ 6 ถึง 10 ได้ลองปรับเกณฑ์ความหนาแน่นโดยเพิ่มการจำแนกทางธรณีวิทยาที่ละเอียดมากขึ้น หลังจากลองวิเคราะห์หาดัชนีที่เหมาะสมต่อการตัดสินใจ พบว่าบางดัชนีไม่มีผลที่ชัดเจนต่อเกณฑ์หยุดชุดจึงดำเนินการตัดข้อมูลดังต่อไปนี้

3.4.1 ข้อมูลเครื่องจักร

จากผลการวิเคราะห์พบว่าในข้อมูลความเร็วการชุด สามารถแสดงถึงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรไฮโดรมิลล์ในชั้นหินอย่างครอบคลุม ทำให้ตั้งนี้ดังต่อไปนี้ ไม่มีความจำเป็นอีกทั้งยังไม่สามารถแสดงถึงความสามารถของเครื่องจักรต่อชั้นหิน ได้แก่ Hydraulic pressure, Cutter pressure, Displacement, Angle, Cutter rotation, Pump

3.4.2 ข้อมูลเศษหินจากการก่อสร้าง

ตัดข้อมูล สัดส่วนขนาดหิน, ความกลมมนของหิน และ เนื่องจากไม่พบสามารถบอกถึงลักษณะที่แตกต่างระหว่างหินฟิลล์และหินควอร์ตซิกซ์ซิสต์

4. ผลการศึกษา

4.1 การให้น้ำหนักคะแนนของเกณฑ์หยุดชุด

การให้น้ำหนักคะแนนของเกณฑ์หยุดชุดได้รับการวิเคราะห์โดยผู้เชี่ยวชาญ เพื่อกำหนดค่าน้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริงในกระบวนการก่อสร้างโดยพิจารณาแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ข้อมูลเครื่องจักร (Machine data) ร้อยละ 30, ข้อมูลเศษหินจากการก่อสร้าง (Cutting material data) ร้อยละ 40 และ ข้อมูลชั้นธรณีวิทยา (Geology data) ร้อยละ 30

คะแนนในแต่ละส่วนของเกณฑ์หยุดชุดถูกปรับเปลี่ยนโดยใช้การระดมความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญดังตารางที่ 3 เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะธรณีวิทยาที่พบ

ตารางที่ 3 สรุปเกณฑ์หยุดชุดร่องกำแพงทับน้ำใต้ดินที่ใช้จริง

กลุ่ม	น้ำหนักคะแนน (%)	รายการ	น้ำหนักคะแนน (%)
ข้อมูลเครื่องจักร	30	ความเร็วการชุด	30
ข้อมูลเศษหินจากการก่อสร้าง	40	ชนิดของหิน	15
		สี	5
		สัดส่วนหินควอร์ตซิกซ์ซิสต์	5
		ความแข็งของหิน	5
		ระดับความผูกพัน	5
ข้อมูลลักษณะธรณีวิทยา	30	รอยแตกของหิน	5
		ระยะห่างจากเส้นความชันค่าความทับน้ำ	20
		ระยะห่างจากเส้นออกแบบ	10

4.1.1 ข้อมูลเครื่องจักร

ความเร็วการชุด คำนวณจากระดับความลึกของหัวกัดเทียบกับเวลาหน่วยเป็นเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งจากการเก็บข้อมูลและนำมาตรวจสอบพบว่าความเร็วการชุดสามารถบ่งบอกชั้นหินและความแข็งแรงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เกณฑ์การให้คะแนนความเร็วการชุดในแต่ละชั้นดินหรือหิน

ชนิดของดิน	ความเร็วการชุด	Weight (%)
Embankment and residual soil	>3 m/hr..	0
Phyllite	2-3 m/hr.	3

Quartzitic schist	1.5–2 m/hr.	15
	1 –1.5 m/hr.	27
	< 1 m/hr.	30

4.1.2 ข้อมูลเศษหินจากการก่อสร้าง

1) การจำแนกชนิดของดินหรือหินด้วยสายตา (Visual material type) ใช้เกณฑ์การแบ่งคะแนนจากชั้นหินที่บ้น้ำ แบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เกณฑ์การให้คะแนนของชนิดของดินหรือหิน

ชนิดของดิน	Weight (%)
Embankment	0
Residual soil	0
Phyllite	0
Quartzitic schist	15

2) สีของวัสดุหินหรือหินโดยเกณฑ์การให้คะแนนดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เกณฑ์การให้คะแนนสีของดินหรือสีของหิน

ชนิดของดิน	Weight (%)
1. Dark grey	5
2. Grey	5
3. Light grey	5
4. Greyish yellow	3.5
5. Light olive grey	3
6. Yellowish brown	1
7. Brown	0
8. Light brown	0
9. Reddish brown	0

3) สัดส่วนหินฟิลไลต์และหินควอร์ตซิกที่สกัดจากเครื่องกรองโคลน (Desander material classification) โดยเกณฑ์การให้คะแนนจากร้อยละของปริมาณหินควอร์ตซิกที่สกัดเนื่องจากเป็นชั้นหินที่บ้น้ำดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เกณฑ์การให้คะแนนของสัดส่วนหินฟิลไลต์และหินควอร์ตซิกที่สกัด

สัดส่วนหินฟิลไลต์และหินควอร์ตซิกที่สกัด (%)	Weight (%)
มากกว่า 90	5
70–90	3
60–70	1
น้อยกว่า 60	5

4) ระดับความแข็งของหิน (Degree of hardness) Johannesburg (1976) จำแนกตามมาตรฐาน Association of professional geological scientists (APGS) โดยเกณฑ์การให้คะแนนตามลำดับความแข็งของหินดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 เกณฑ์การให้คะแนนของระดับความแข็งของหิน

Degree of Hardness	Weight (%)
1. Very hard rock	5
2. Hard rock	5

3. Moderately hard rock	4
4. Soft rock	0
5. Very soft rock	0

5) ระดับความผุพังของหิน (Degree of weathering) Johannesburg (1976) จำแนกตามมาตรฐาน Association of professional geological scientists (APGS) โดยเกณฑ์การให้คะแนนจากลักษณะความผุพังการแปรสภาพของหินดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 เกณฑ์การให้คะแนนของระดับความผุพังของหิน

Degree of weathering	Weight (%)
1. Fresh rock	5
2. Slightly weathered	4
3. Moderately weathered	3
4. Highly weathered	0
5. Completely weathered	0

6) รอยแตกของหิน (Fracture) Johannesburg (1976) จำแนกตามมาตรฐาน Association of professional geological scientists (APGS) โดยเกณฑ์การให้คะแนนดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 เกณฑ์การให้คะแนนของรอยแตกของหิน

Fracture	Weight (%)
1. ไม่มีรอยแตก (No fracture)	5
2. มีรอยแตกแบบปิด (Close fracture)	3
3. รื้อธาตุแทรก (Filled fracture)	2
4. หินเปื้อน (Stained fracture)	0
5. มีรอยแตกแบบเปิด (Open fracture)	0

4.1.3 ข้อมูลลักษณะธรณีวิทยา

1) ระยะห่างจากเส้นความชันค่าความตื้นน้ำ (Lugeon map) แสดงดังรูปที่ 5 การให้คะแนนจะพิจารณาจากระดับความลึกของกันร่องกำแพงตื้นน้ำที่พิจารณาจากระดับความลึกของเส้นความชันค่าความตื้นน้ำในชั้นหินที่มีค่าความตื้นน้ำน้อยกว่า 5 Lu. ของแต่ละแผง โดยเกณฑ์การให้คะแนนดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 เกณฑ์การให้คะแนนของระดับชั้นหินที่มีค่าความตื้นน้ำน้อยกว่า 5 Lu

Condition	Weight (%)
1. Below 5 Lu. lines.	20
2. Above 5 Lu. line less than 3 meters	8
3. Above 5 Lu. line more than 3 meters	0

2) ระยะห่างจากเส้นออกแบบ (Design line) การให้คะแนนจะพิจารณาจากระดับความลึกของกันร่องกำแพงตื้นน้ำที่พิจารณาจากระดับความลึกที่ออกแบบก่อนเริ่มงานก่อสร้างของแต่ละแผง โดยเกณฑ์การให้คะแนนดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 เกณฑ์การให้คะแนนของระดับที่ออกแบบ

Condition	Weight (%)
1. Above design lines less than 3 meters	10
2. Above design lines less than 6 meters	8

3. Above design lines less than 9 meters	4
4. Above design lines more than 9 meters	0

4.2 เกณฑ์ของคะแนนหยาบชุดร่องกำแพงที่บ้น้ำใต้ดินแต่ละส่วน

การคิดคะแนนหยาบชุด ตรวจสอบทุกคุณลักษณะของวัสดุหินหรือหินทุก 2 เมตร นับเป็น 1 ช่วง เมื่อคะแนนเข้าเกณฑ์ 75 % ในช่วงใดก็ตามนับว่า อยู่ในความลึกที่พิจารณาเป็นช่วงที่ 1 (Stage 1) และจำเป็นต้องชุดร่อง กำแพงที่บ้น้ำใน Stage ต่อไป เพื่อตรวจสอบลักษณะธรณีวิทยาของร่องชุด ว่าไม่พบชั้นหินหรือชั้นหินที่โปร่งน้ำแทรกอยู่ โดยเกณฑ์และ Stage ของหยาบชุดแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

4.2.1 ระดับความลึกปานกลาง

การทดสอบการชุดเริ่มต้นที่ระดับความลึกปานกลาง โดยกำหนดให้มี คะแนนไม่ต่ำกว่า 75/100 เป็นระยะ 3 ช่วงติดต่อกัน จากการประเมินพบว่า ชั้นหินที่บ้น้ำอยู่ในระดับความลึกไม่มาก และมีลักษณะแทรกสลับระหว่างชั้น หินโปร่งน้ำและชั้นหินที่บ้น้ำ การวิเคราะห์โดยผู้เชี่ยวชาญจึงกำหนดระดับ คะแนนนี้ไว้เพื่อเป็นตัวแทนของชั้นหินที่มีความที่บ้น้ำอย่างเหมาะสม

4.2.2 ระดับความลึกตื้น

บริเวณนี้มีอยู่ตามไหล่เขื่อน ซึ่งโดยธรรมชาติมีชั้นไหล่เขาช่วยลด แรงดันน้ำใต้ดิน ส่งผลให้ความต้องการของเกณฑ์หยาบชุดลดลง โดยกำหนด เกณฑ์คะแนนที่ 75/100 และต้องได้คะแนนในระดับดังกล่าวเพียง 2 ช่วง ติดต่อกันเท่านั้น

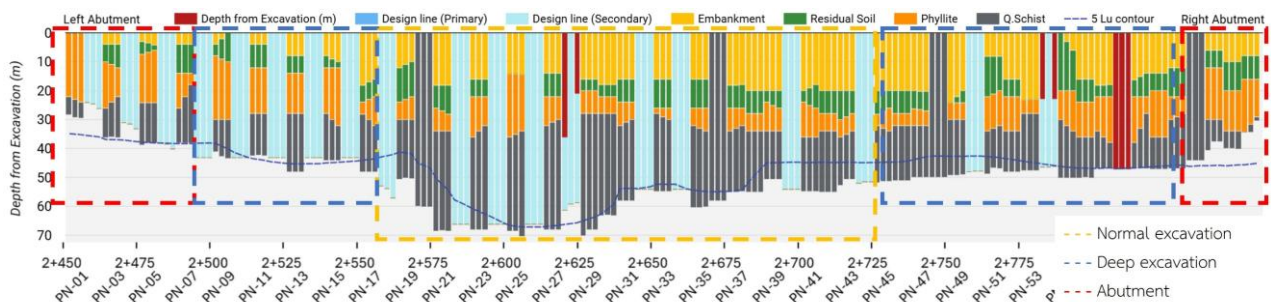
4.2.3 ระดับความลึกสูง

เป็นส่วนที่อยู่บริเวณกลางเขื่อน ซึ่งจากการประเมินลักษณะธรณีวิทยา และค่าความชื้นน้ำของชั้นหิน พบว่าชั้นหินที่บ้น้ำอยู่ในระดับความลึกที่ลึก มาก และเป็นพื้นที่ที่เคยเป็นร่องน้ำเก่า ทำให้มีโอกาสพบชั้นหินผุพังมากกว่า ส่วนอื่นๆ นอกจากนี้ ข้อมูลจากการตรวจวัดพฤติกรรมของเขื่อนยังชี้ว่าชั้น หินฐานรากมีคุณสมบัติในการซึมน้ำสูง ดังนั้นจึงกำหนดเกณฑ์คะแนนที่ สูงขึ้น โดยต้องได้คะแนนไม่ต่ำกว่า 85/100 ต่อเนื่องกัน 3 ช่วง เพื่อให้ สามารถยืนยันถึงการเข้าสู่ชั้นหินที่บ้น้ำที่มั่นคงและปลอดภัย

4.3 ตัวอย่างการตัดสินใจหยาบชุดกำแพงที่บ้น้ำใต้ดิน

4.3.1 กรณีการชุดในระดับความลึกปานกลาง

เกณฑ์หยาบชุดกำแพงที่บ้น้ำกรณีการชุดในระดับความลึกปานกลาง ดัง รูปที่ 6 ที่ความลึก 12 เมตร พบชั้นหินฟิลโลสคานเพิ่มขึ้นเป็น 30 % เนื่องจากความเร็วการชุดน้อยกว่า 1 เมตรต่อชั่วโมง แต่ยังไม่ถึงเกณฑ์ชั้นหิน ดีจึงไม่มีคะแนนจากกลุ่มข้อมูลเศษหินจากการก่อสร้าง ที่ความลึก 34 เมตร พบชั้นหินควอร์ตซิดิกซิสต์ทำให้คะแนนการชุดเพิ่มขึ้นเป็น 70 % จาก คะแนนกลุ่มข้อมูลเศษหินจากการก่อสร้าง และเมื่อใกล้ระดับหยาบชุดที่ความ ลึก 38, 40 และ 42 เมตร คะแนนเพิ่มขึ้นเป็น 75-85 % จากข้อมูล ระยะห่างจากเส้นชั้นค่าความที่บ้น้ำและข้อมูลระยะห่างจากเส้นออกแบบ ติดต่อกันจึงหยาบชุดกำแพงที่บ้น้ำใต้ดิน

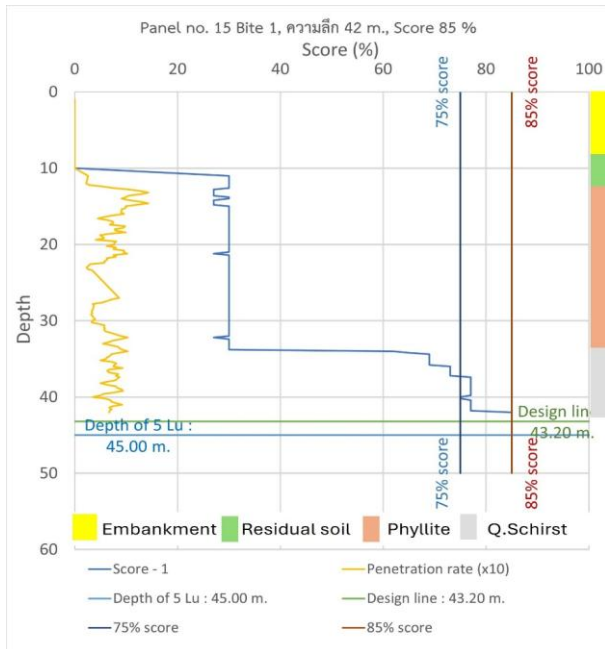


รูปที่ 5 คะแนนหยาบชุดร่องกำแพงที่บ้น้ำใต้ดินแต่ละส่วน

ตารางที่ 13 ตัวอย่างการคำนวณของแมงที่ 15 ที่ระดับความลึก 42 เมตร

กลุ่ม	รายการ	ข้อมูล	คะแนน (%)
ข้อมูลเครื่องจักร	ความเร็วการชุด	0.67 m/hr.	30
ข้อมูลเศษหินจากการก่อสร้าง	ชนิดของหิน	Q. Schist	15
	สี	Light grey	5

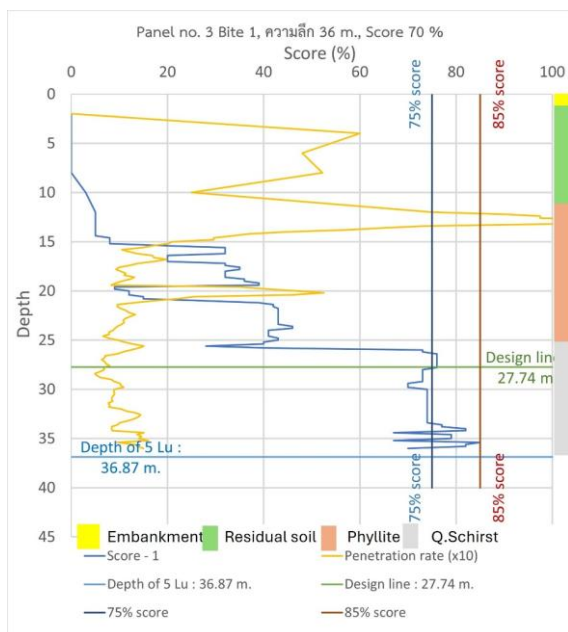
	สัดส่วนหินควอร์ตซิดิกซิสต์	80 %	3
	ความแข็งของหิน	Moderately hard rock	4
	ระดับความผุพัง	Fresh	5
	รอยแตกของหิน	No	5
ข้อมูลลักษณะธรณีวิทยา	ระยะห่างจากเส้นความชื้นค่าความที่บ้น้ำ	3.00 m	8
	ระยะห่างจากเส้นออกแบบ	1.20 m	10
รวม			85



รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์เกณฑ์หยุดขุดกรณีการหยุดในระดับความลึกปานกลาง

4.3.2 กรณีการหยุดในระดับความลึกตื้น

เกณฑ์หยุดขุดกึ่งตื้นน้ำกรณีการหยุดในระดับความลึกตื้น ดังรูปที่ 7 ตัวอย่างกึ่งตื้นน้ำที่ 3 ที่ความลึก 12 เมตร พบชั้นหินฟิลโลส มีความเร็วการขุดของเครื่องจักรไม่สม่ำเสมอทำให้คะแนนอยู่ในช่วง 10 -40 % ที่ความลึก 26 เมตร พบชั้นหินควอร์ตซิดิกซิสต์ทำให้คะแนนการหยุดขุดเพิ่มขึ้นเป็น 74 % จากคะแนนกลุ่มข้อมูลเศษหินจากการก่อสร้าง และเมื่อใกล้ระดับหยุดขุดที่ความลึก 34 และ 36 เมตร คะแนนเพิ่มขึ้นเป็น 80 % จากข้อมูลระยะห่างจากเส้นชั้นค่าความตื้นน้ำและข้อมูลระยะห่างจากเส้นออกแบบจึงหยุดขุดกึ่งตื้นน้ำได้ดิน



รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์เกณฑ์หยุดขุดกรณีการหยุดในระดับความลึกตื้น

4.3.3 กรณีการหยุดในระดับความลึกสูง

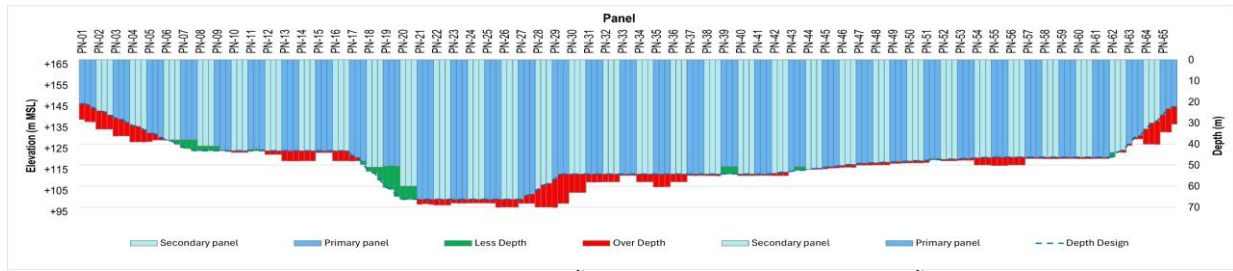
เกณฑ์หยุดขุดกึ่งตื้นน้ำกรณีการหยุดในระดับความลึกสูง ดังรูปที่ 8 ตัวอย่างกึ่งตื้นน้ำที่ 19 ที่ความลึก 22 เมตรพบชั้นหินฟิลโลส คะแนนเพิ่มขึ้นเป็น 30 % เนื่องจากความเร็วการขุดน้อยกว่า 1 เมตรต่อชั่วโมง แต่ยังไม่ถึงเกณฑ์ชั้นหินดีจึงไม่มีคะแนนจากกลุ่มข้อมูลเศษหินจากการก่อสร้าง ที่ความลึก 38 เมตร พบชั้นหินควอร์ตซิดิกซิสต์ที่ระดับความผูกพันและรอยแตกของหินไม่สม่ำเสมอ ทำให้คะแนนการหยุดขุดเพิ่มขึ้นระหว่าง 70 - 85 % และเมื่อใกล้ระดับหยุดขุดคะแนนเพิ่มขึ้นเป็น 85 % ที่ความลึก 46, 48 และ 50 เมตร จากข้อมูลระยะห่างจากเส้นชั้นค่าความตื้นน้ำและข้อมูลระยะห่างจากเส้นออกแบบจึงหยุดขุดกึ่งตื้นน้ำได้ดิน

4.4 ระดับความลึกกึ่งตื้นน้ำจากการใช้เกณฑ์หยุดขุดกึ่งตื้นน้ำ เทียบกับ ระดับกึ่งตื้นน้ำจากขั้นตอนการออกแบบ

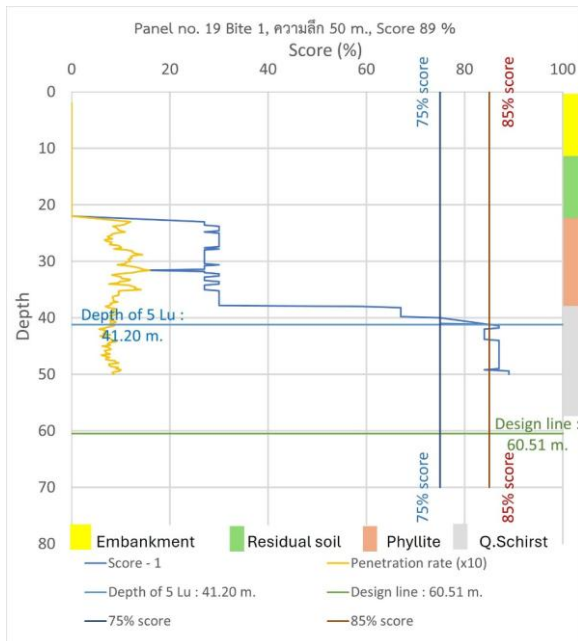
การก่อสร้างกึ่งตื้นน้ำจริง 33 แห่ง เมื่อระดับความลึกของกึ่งตื้นน้ำเปรียบเทียบกับระดับความลึกจากเส้นออกแบบดังตารางที่ 14 พบว่าระดับความลึกของกึ่งตื้นน้ำไม่เท่ากับระดับความลึกจากเส้นออกแบบทุกแห่ง เนื่องจากเมื่อคะแนนเกณฑ์หยุดขุดเกิน 75 คะแนน แต่เกิดคะแนนลดลงในช่วงถัดไปทำให้บางแห่งจำเป็นต้องเพิ่มระดับความลึกของกึ่งตื้นน้ำมากกว่าที่เส้นออกแบบกำหนด

ตารางที่ 14 กึ่งตื้นน้ำในกรณีต่างๆ

กรณีหยุดขุดกึ่งตื้นน้ำ	จำนวนกึ่งตื้นน้ำ	เปอร์เซ็นต์
ระดับกึ่งตื้นน้ำใกล้เคียงเส้นออกแบบ	11	33
ระดับกึ่งตื้นน้ำก่อนเส้นออกแบบ	6	18
ระดับกึ่งตื้นน้ำหลังเส้นออกแบบ	16	48



รูปที่ 9 ความแตกต่างของความลึกกำแพงที่บ้น้ำใต้ดินจากการใช้เกณฑ์หยุดชุดและจากขั้นตอนการออกแบบ



รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์เกณฑ์หยุดชุดกรณีการหยุดในระดับความลึกสูง

เมื่อก่อสร้างกำแพงที่บ้น้ำถึง 33 แผง ทำให้สามารถประเมิน ระดับความลึกของกำแพงที่บ้น้ำแผงที่เหลือได้โดยการใช้คะแนนจากข้อมูลเครื่องจักร, ข้อมูลจากลักษณะธรณีวิทยาที่ได้จากวัสดุชุดของแผงข้างๆและมาคิดคะแนนเกณฑ์หยุดชุด ทำให้คาดการณ์ระดับความลึกกำแพงที่บ้น้ำที่เหลือดังรูปที่ 9

การวิเคราะห์ระดับความลึกกำแพงที่บ้น้ำใต้ดินทั้งหมด 65 แผง ปริมาตรกำแพงที่บ้น้ำ 19720.65 ลูกบาศก์เมตร มี 54 แผงที่มีระดับความลึกจริง (Actual depth) มากกว่าระดับความลึกกำแพงที่บ้น้ำใต้ดินจากขั้นตอนการออกแบบ (Design line depth) ปริมาตรกำแพงที่บ้น้ำที่มากขึ้น 551.76 ลูกบาศก์เมตร หรือ เพิ่มขึ้น 0.028 เปอร์เซ็นต์ แสดงถึงหยุดชุดกำแพงที่บ้น้ำโดยใช้เกณฑ์หยุดชุดกำแพงที่บ้น้ำอาจมีปริมาณการก่อสร้างที่มากกว่าการหยุดโดยผู้เชี่ยวชาญ เพื่อเสริมสร้างความมั่นใจในการปิดกั้นการไหลซึมของกำแพงที่บ้น้ำ

5. สรุปผลการศึกษา

การพัฒนาแบบเกณฑ์หยุดชุดกำแพงที่บ้น้ำใต้ดิน ดำเนินการโดยอาศัยการวิเคราะห์จากข้อมูล 3 กลุ่ม ได้แก่ ข้อมูลเครื่องจักร, ข้อมูลเศษหินจาก

การก่อสร้าง, และข้อมูลชั้นธรณีวิทยา โดยเกณฑ์การให้คะแนนได้รับการปรับปรุงจากความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ ประกอบกับข้อมูลที่รวบรวมได้ระหว่างการก่อสร้าง ทั้งนี้เกณฑ์หยุดชุดแบ่งออกเป็น 3 ส่วนตามลักษณะพื้นที่ ได้แก่

- 1) บริเวณระดับความลึกปานกลาง ใช้เกณฑ์ 75 คะแนน ต่อเนื่อง 3 ช่วง
- 2) บริเวณไหล่เขื่อน ใช้เกณฑ์ 75 คะแนน ต่อเนื่อง 2 ช่วง
- 3) บริเวณระดับความลึกสูง ใช้เกณฑ์ 85 คะแนน ต่อเนื่อง 3 ช่วง

ผลการประยุกต์ใช้ในภาคสนามพบว่า แผงกำแพงที่บ้น้ำมีระดับการขุดที่ใกล้เคียงกับเส้นระดับร้อยละ 33 ขุดตื้นกว่าระดับออกแบบร้อยละ 18 และขุดลึกกว่าระดับออกแบบร้อยละ 48 โดยกรณีที่ขุดลึกเกินกว่าระดับแบบ มีสาเหตุหลักจากความผันผวนของชั้นดินที่ตรวจพบระหว่างการขุดจริง

เมื่อเปรียบเทียบระดับความลึกของกำแพงที่บ้น้ำที่ได้จากการใช้เกณฑ์หยุดชุดกับระดับความลึกตามแบบ พบว่าระดับความลึกจริงมีแนวโน้มสูงกว่าระดับความลึกที่ออกแบบไว้ ส่งผลให้ปริมาตรของกำแพงที่บ้น้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณร้อยละ 0.028 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแนวทางการใช้เกณฑ์หยุดชุดอาจช่วยเพิ่มความมั่นใจในการป้องกันการไหลซึมของน้ำ แม้จะมีผลให้ปริมาณงานก่อสร้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยก็ตาม

6. ข้อเสนอแนะ

หัวข้อศึกษาในอนาคตของเกณฑ์หยุดชุดกำแพงที่บ้น้ำ ภายหลังจากก่อสร้างกำแพงที่บ้น้ำครบทั้ง 65 แผง อาจศึกษาประสิทธิภาพของกำแพงที่บ้น้ำหลังเปิดการใช้งานกำแพงที่บ้น้ำ

เอกสารอ้างอิง

- [1] วรากร ไม่เรียง. (n.d.). *Slurry wall*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [2] Xanthakos, (1979), P.P., *Slurry Walls*. The McGraw-Hill.
- [3] BAUER Maschinen GmbH. 2020. *BAUER Trench Cutter Systems* (905.853.2).
- [4] ICOLD, (1985). *Filling Materials For Watertight Cut Off Walls*, Bull. No. 51.
- [5] ศูนย์วิจัยวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความยั่งยืน (2563), ข้อกำหนดทางด้านวิศวกรรม-งานจ้างที่ปรึกษาศึกษาความเหมาะสมการเสริมความมั่นคง-เขื่อนดินช่องเขาขาด-Dike-4 ของเขื่อนสิริกิติ์.

- [6] ศูนย์วิจัยวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความยั่งยืน (2563), รายงานฉบับสมบูรณ์-งานจ้างที่ปรึกษาศึกษาความเหมาะสมการเสริมความมั่นคง-เขื่อนดินช่องเขาขาด-Dike-4-ของเขื่อนลิริกิตี.
- [7] Geo-Solutions, (2017), Slurry Cutoff Wall Design and Construction, Geo-Solutions Inc.
- [8] Geosystems Bruce, (2013), Quality Control and Quality Assurance in Cutoff Walls.
- [9] Trevi Spa, (2022), Diaphragm Walls - Hydromill Technologies, Trevi Group.
- [10] Karkheh Dam Study, (2001), Cutoff Wall Analysis and Design for Karkheh Storage Dam.
- [11] Herbert Hoover Dike Project, (2012), Self-Hardening Slurry Wall Installation by Hydromill at Herbert Hoover Dike.
- [12] Core Logging Committee of the South Africa Section of The Association of Engineering Geologists. (1976). *A guide to core logging for rock engineering*. In *Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering* (pp. 71–86). Johannesburg.
- [13] Bruce, D.A., et al. (2013). *Seepage Control for Dams*. ASDSO Annual Conference.
- [14] Dunnicliff, J., & Green, G.E. (1993). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. Wiley.
- [15] Fell, R., et al. (2008). Internal erosion of dams and their foundations. *ICOLD Bulletin*.
- [16] Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000). *The statistics of embankment dam failures and accidents*. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1000–1024.
- [17] ICOLD. (2017). *Cut-off walls for dams*. Technical Bulletin No. 153.
- [18] Jang, Y., Lee, S., & Kim, B. (2019). *Hydromill performance analysis for diaphragm wall construction*. *KSCE Journal of Civil Engineering*.
- [19] Trevi Spa. (2022). *Special Foundation Technologies – Diaphragm Walls with Hydromill*. Technical Report.
- [20] USACE. (2011). *Herbert Hoover Dike Rehabilitation*. U.S. Army Corps of Engineers.