

พฤติกรรมการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก Flow Characteristics through the Squared-Section Vertical Shaft Spillways

ยุทธนา แก้วคำแจ้ง^{1,*} ณัฐพงษ์ ศรีสุภะ² และ กมลพงศ์ แจ่มกมล³

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร

³ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: yuddhana.k@mail.mutk.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดมุ่งหมายในการนำเสนอผลการศึกษเกี่ยวกับพฤติกรรม การไหลผ่านทางระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มี อัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านยาว (m) ของทางเข้าต่างๆ กัน จำนวน 5 รูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบจะมีความยาวของเส้นรอบรูปของทางเข้าที่ เท่ากันและมีระดับความสูงของทางเข้าเหนือท้องน้ำ (P) จำนวน 3 ระดับ ในการศึกษาได้มีการสร้างแบบจำลองทางกลศาสตร์เพื่อหาอัตราการไหล ผ่านทางระบายน้ำล้นในลักษณะการไหลล้นข้ามแบบอิสระลงสู่ท่อดิ่งไปยัง ท่อในแนวราบที่มีสภาพการไหลออกแบบไม่เต็มหน้าตัด สำหรับสมมติฐาน ที่ใช้ในการศึกษา คือ การไหลเข้าสู่ทางระบายน้ำล้นมีลักษณะเดียวกันกับ การไหลผ่านฝายสูง ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองจะถูกนำไปใช้ในการหาค่า สัมประสิทธิ์ทางระบายน้ำล้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับตัว แปรต่างๆ ที่จะมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการไหล จากผลการศึกษาพบว่า อัตราการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นจะแปรผันโดยตรงกับระดับผิวน้ำเหนือ ทางเข้าทางระบายน้ำล้น (H) โดยที่อัตราการไหลจริงจะมีค่าน้อยกว่าอัตรา การไหลในทางทฤษฎี สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ทางระบายน้ำล้น (C) แต่ละ รูปแบบจะมีค่าอยู่ในช่วง 1.234 – 1.819 โดยที่ C จะแปรผกผันกับค่า H และหากพิจารณาที่ค่า H ใดๆ จะพบว่า C จะแปรผันโดยตรงกับ m และ P สำหรับประสิทธิภาพในการระบายน้ำของทางระบายน้ำล้นพิจารณาจาก ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหล (C_D) และมีค่าเท่ากับ 0.418 – 0.616 ซึ่งถือว่า มีค่าค่อนข้างต่ำ

คำสำคัญ: ทางระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่ง, ทางระบายน้ำล้นแบบดอกผักนึ่ง, ทางระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก, สัมประสิทธิ์ทางระบาย น้ำล้น

Abstract

This article aims to present the study of flow characteristics through the squared-section vertical shaft spillway for 5 patterns of the spillway entrance having different width-to-length ratios (m). Each spillway has the same perimeter length of the entrance and there are 3 different heights of the entrance (P)

through the spillway above the channel bottom. The hydraulic models were constructed for this study to determine the discharge through the spillways with the flow conditions of free overflow downwards to vertical shaft and partly full condition in the outlet horizontal conduit. The assumption for the flow through the spillway was the same as the flow through high weir. The obtained data from the models were used to determine the spillway coefficient which can be used to analyze the relationships to the other variables that affecting on the flow characteristics. From the study it was found that the discharge through the spillway was directly proportional to the water level above the entrance of the spillway (H) by which the actual discharge was less than the theoretical discharge. The obtained values of spillway coefficient (C) from each pattern of spillway were found in the range 1.234 – 1.819 by which C is inversely proportional to H and for the consideration of any values of H it was found that C is directly proportional to m and P . The drainage efficiency of the spillway could be considered from the discharge coefficient (C_D) and were equal to 0.418 – 0.616 which rather low.

Keywords: Vertical Shaft Spillway, Morning Glory Spillway, Squared-Section Shaft Spillway, Spillway Coefficient

1. บทนำ

อาคารระบายน้ำล้น (spillway) หรือบางครั้งมักจะถูกเรียกว่า ทางระบายน้ำล้น เป็นโครงสร้างทางกลศาสตร์ที่สำคัญประเภทหนึ่งซึ่งถูกใช้ในการระบายน้ำส่วนเกินความจุเก็บกักของเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำไปยังพื้นที่ด้านท้ายน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลาที่เกิดน้ำหลาก อาคารระบายน้ำล้นที่มีการใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันมีหลายประเภทซึ่งจะมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ระบายน้ำในสภาพแวดล้อมหรือลักษณะภูมิประเทศที่แตกต่างกัน สำหรับอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่ง (vertical shaft spillway) หรือมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ทางระบายน้ำล้นแบบดอกผักนึ่ง (morning glory

spillway) จัดว่าเป็นทางระบายน้ำล้นอีกประเภทหนึ่งที่มีจะถูกเลือกใช้ในภูมิภาคที่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับพื้นที่ในการก่อสร้าง เช่น ภูมิภาคที่มีลักษณะเป็นหุบเขาแคบๆ หรือ ข้อจำกัดเกี่ยวกับพื้นที่ที่จะใช้ในการก่อสร้างอาคารระบายน้ำล้นประเภทอื่นๆ ที่ใช้กับเขื่อนดินหรือเขื่อนหินที่มีข้อกำหนดให้อาคารระบายน้ำล้นจะต้องอยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากโครงสร้างเขื่อนหรือเพื่อลดความเสี่ยงต่อการที่น้ำจะเอ่อล้นข้ามตัวเขื่อน [1] โดยทั่วไปแล้วอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติ่ง จะประกอบด้วยโครงสร้างหลัก 2 ส่วน คือ โครงสร้างส่วนที่รับน้ำจากอ่างเก็บน้ำเหนือเขื่อน มีลักษณะเป็นทอที่วางตัวอยู่ในแนวต่งและมักจะมีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม และโครงสร้างส่วนระบายน้ำออกปทางด้านท้ายน้ำของเขื่อน ซึ่งจะมีลักษณะเป็นทอที่วางตัวอยู่ในแนวนอน ในการระบายน้ำผ่านอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติ่งนั้น เมื่อระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำเพิ่มสูงถึงระดับปากทอติ่ง น้ำก็จะไหลล้นข้ามปากทอในลักษณะคล้ายกับการไหลข้ามฝาย (weir) หรือถ้าระดับน้ำเพิ่มสูงเหนือปากทอมากขึ้นจนท่วมมีดปากทออย่างสมบูรณ์จะทำให้การไหลเข้าสู่ทอติ่งมีลักษณะเป็นแบบการไหลผ่านรูระบาย (orifice) ผ่านข้อต่อกับทอที่วางตัวอยู่ในแนวนอนเพื่อระบายน้ำออกสู่พื้นที่ด้านท้ายน้ำ สำหรับความสามารถในการระบายน้ำของอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายประการ เช่น ระดับความสูงของมีดน้ำเหนือปากทางเข้า, ระดับความสูงของปากทอติ่งเหนือท้องน้ำ, รูปร่างและขนาดของหน้าตัดของทอติ่งและทอราบ, ลักษณะของข้อต่อที่เชื่อมระหว่างทอติ่งและทอราบ, ลักษณะการไหลลงสู่ทอติ่ง หรือสภาพการไหลด้านท้ายน้ำ เป็นต้น ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการระบายน้ำของอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติ่งที่น่าสนใจได้ดังนี้ โดยปกติแล้วการไหลเข้าสู่ทอติ่งมักจะมีประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากสภาพการไหลแบบหมุนวน (vortex) ที่ปากทอ ทำให้น้ำไม่สามารถไหลลงสู่ทอได้เต็มที่ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติ่งหน้าตัดวงกลมและมีปากทางเข้าแบบปุมเปียโน (circular piano-key spillway) ซึ่งเป็นการประยุกต์หลักการของฝายหยักแบบปุมเปียโน (piano-key weir) เข้ากับอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติ่ง จากการศึกษาโดยใช้แบบจำลองในห้องปฏิบัติการพบว่าสามารถเพิ่มอัตราการระบายน้ำได้ถึง 15.16% เมื่อเปรียบเทียบกับอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติ่งทั่วไป [2] นอกจากนี้ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบของปากทางเข้าของทอติ่งที่จะมีผลต่อการไหลผ่านของน้ำ ดังเช่น Braken และ Gurvey [3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับเปลี่ยนหน้าตัดของปากทางเข้าจากแบบวงกลมเป็นรูป 12 เหลี่ยมด้านเท่า (12-section polygonal) ผ่านแบบจำลองทางชลศาสตร์ ผลการศึกษพบว่าระดับน้ำในช่วงที่เกิดน้ำหลากสูงสุดมีการลดลงถึง 0.68 เมตร รวมทั้งสัมประสิทธิ์อัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 0.52 Djillali, Abderrezak และ Petrovic [4] ได้นำเสนอแนวทางในการออกแบบอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติ่งสำหรับเขื่อน Djedra ในประเทศแอลจีเรีย โดยได้มีการนำเสนอให้มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบของทางเข้าจากหน้าตัดวงกลมไปเป็นรูป 12 เหลี่ยมด้านเท่า ซึ่งมีข้อดีในแง่ของความสะดวกในการทำแบบหล่อ (formwork) ของโครงสร้าง ในการศึกษาได้มีการใช้แบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นในมาตราส่วน 1 : 60 ซึ่งพบว่า สามารถลดระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำลง จะเห็นว่าช่วยให้ประหยัดค่าลงทุนได้อย่างมี

นัยสำคัญ สำหรับปัญหาที่มีมักจะพบของอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติ่งที่มีหน้าตัดวงกลม คือ สภาพการไหลแบบหมุนวน (swirling flow) ที่ปากทางเข้า ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการไหลผ่านของน้ำ ด้วยเหตุดังกล่าว Maedeh K. และ Kabiri-Samani A. [5] จึงได้ทำการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการลดความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนบริเวณปากทางเข้ารวมทั้งการปรับปรุงประสิทธิภาพของการระบายน้ำโดยใช้แบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการไหลเข้าสู่ปากทางเข้าของทอติ่งที่มีหน้าตัดเป็นรูปกลีบดอกไม้มาร์เกริต (marguerite-shaped) โดยจะมีรูระบายน้ำที่บริเวณส่วนล่างของแต่ละกลีบ (lobes) หรือมีชื่อเรียกว่า ทางไหลเข้าสู่รูปกลีบดอกไม้มาร์เกริตสมัยใหม่ (modern marguerite-shaped inlets) ซึ่งพบว่า อัตราการไหลมีค่าสูงกว่าอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติ่งหน้าตัดวงกลมที่มีปากทางเข้าแบบปุมเปียโน และหน้าตัดวงกลมที่มีปากทางเข้าเป็นรูปกลีบดอกไม้อย่างง่าย (simple marguerite-shaped) เท่ากับ 6 เท่า, 3 เท่า และ 2 เท่า ตามลำดับ Intisar A. H. และ Ahmed Y. M. [6] ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลผ่านแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติ่งจำนวน 4 รูปแบบ ได้แก่ หน้าตัดวงกลม, หน้าตัดวงกลมที่มีการเสริมหน้าตัดบริเวณทางเข้าเป็นรูปดาว 4 แฉก, 6 แฉก และ 8 แฉก โดยได้ทำการศึกษารอบคลุมสภาพการไหลสู่ปากทอ 2 รูปแบบ คือ การไหลผ่านฝาย (weir flow) และการไหลผ่านรูระบาย (orifice flow) ในขณะที่สภาพการไหลด้านท้ายน้ำจะมี 3 รูปแบบ คือ การไหลออกแบบอิสระ, การไหลออกแบบจม และการไหลออกแบบกึ่งอิสระและกึ่งจม จากการศึกษาพบว่า เมื่อมีการเสริมหน้าตัดวงกลมเป็นรูปดาวที่บริเวณปากทางเข้าจะทำให้ระดับน้ำทางด้านเหนือน้ำลดลง 40% สำหรับการไหลแบบฝายที่บริเวณทางเข้าและ 13% สำหรับการไหลผ่านรูระบาย นอกจากนี้ยังพบอีกว่าสำหรับการไหลแบบฝายที่ทางเข้า จะมีสัมประสิทธิ์อัตราการไหล (Discharge Coefficient) แปรผกผันกับความยาวของปากทางเข้า (crest length) ของทอติ่ง โดยจะมีค่ามากสำหรับสภาพการไหลด้านท้ายน้ำแบบจม ในขณะที่สภาพการไหลแบบรูระบายทางเข้าจะมีค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลแปรผันตามความยาวของปากทางเข้าของทอติ่ง โดยจะมีค่ามากสำหรับสภาพการไหลด้านท้ายน้ำแบบกึ่งอิสระและกึ่งจม

จากผลการศึกษาที่น่าสนใจในช่วงเวลาที่ผ่านมามีพบว่า ได้มีความพยายามที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพของอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติ่ง ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มความสามารถในการระบายน้ำ การเพิ่มความสามารถในการลดระดับน้ำทางด้านเหนือน้ำที่จะทำการระบาย หรือการลดโอกาสการเกิดการไหลแบบหมุนวนที่บริเวณปากทางเข้า โดยหลายๆ การศึกษาได้มีการนำเสนอรูปแบบของหน้าตัดบริเวณปากทางเข้า (Inlet) ของทอติ่งในรูปแบบต่างๆ ที่มีความแตกต่างไปจากรูปแบบวงกลมซึ่งเป็นรูปแบบทั่วไปที่นิยมใช้กัน ไม่ว่าจะเป็นหน้าตัดวงกลมแบบปุมเปียโน, หน้าตัดรูปหลายเหลี่ยม, หน้าตัดโค้งที่มีลักษณะคล้ายกลีบดอกไม้มาร์เกริต หรือหน้าตัดรูปดาวหลายแฉก โดยแต่ละรูปแบบของหน้าตัดที่ได้มีการศึกษา จะมีวัตถุประสงค์คล้ายๆ กัน คือ การเพิ่มระยะความยาวของปากทางเข้าที่น้ำจะไหลล้นข้ามลงสู่ทอติ่ง นอกจากนี้แล้วจะพบว่ารูปแบบของหน้าตัดบางประเภท เช่น หน้าตัดวงกลมแบบปุมเปียโน, หน้าตัดรูปหลายเหลี่ยม, หรือหน้าตัดรูปดาว

หลายแฉก จะมีข้อได้เปรียบในแง่ของความสะดวกในการก่อสร้างเมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดวงกลม ซึ่งจะมีผลต่อระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ดังนั้นในการศึกษาในครั้งนี้จึงมีจุดมุ่งหมายในการศึกษาพฤติกรรมการไหลผ่านอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งที่มีหน้าตัดทางเข้าเป็นรูปเรขาคณิตอย่างง่าย คือ หน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก เนื่องจากเป็นหน้าตัดที่มีความสะดวกในการก่อสร้างหรือมีความยุ่งยากในการดำเนินการที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดประเภทอื่นๆ โดยหน้าตัดที่ทำการศึกษาในครั้งนี้จะมีสัดส่วนของความกว้างต่อความยาวที่แตกต่างกัน ในขณะที่มีความยาวของเส้นรอบรูปเท่ากัน นอกจากนี้แล้วยังได้มีการศึกษาถึงอิทธิพลของความสูงของปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้นเหนือท้องน้ำที่จะมีผลต่อพฤติกรรมการไหล โดยจะทำการสร้างแบบจำลองทางชลศาสตร์ประกอบการศึกษา เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการระบายน้ำด้วยการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ทางระบายน้ำล้นที่ได้รับ

2. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ขอบเขตการศึกษา

ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลผ่านอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากในครั้งนี้ จะทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลผ่านแบบจำลองทางชลศาสตร์ของอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งที่มีหน้าตัดทางเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (มีความกว้าง L_i และมีความยาว L_j) โดยมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (width-length ratio, m) ต่างๆ กัน จำนวน 5 รูปแบบ ($m \leq 1.00$) โดยแต่ละรูปแบบจะมีความยาวรวมของเส้นรอบรูปของปากทางเข้ารูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (L) ที่เท่ากัน สำหรับความสูงของปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้นเหนือท้องน้ำ (P) ที่ใช้ในการศึกษามี 3 ระดับ ซึ่งในการศึกษาในครั้งนี้จะควบคุมสภาพการไหลเข้าสู่ทางเข้าของท่อดิ่งให้มีลักษณะเป็นการไหลแบบอิสระข้ามฝาย (weir flow) ที่มีความยาวของสันฝาย (crest length) คงที่เท่ากับมีความยาวของเส้นรอบรูปของปากทางเข้ารูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (L) โดยน้ำที่ไหลผ่านท่อดิ่งของอาคารระบายน้ำล้นจะไหลผ่านช่องที่เชื่อมต่อกับท่อระบายน้ำออกที่อยู่ในแนวราบโดยมีสภาพการไหลออกแบบอิสระ (free outlet flow) ที่ไม่ได้รับอิทธิพลของความลึกการไหลด้านท้ายน้ำ

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับการไหลผ่านอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งที่มีปากท่อดิ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากยาว L และมีความสูงของระดับผิวน้ำเหนือปากทางเข้า H จะมีการไหลข้ามปากท่อดิ่งสู่ท่อดิ่งในลักษณะการไหลแบบอิสระข้ามสันฝาย หากพิจารณากรณีที่ความสูงของปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้นเหนือท้องน้ำ (P) มีค่ามากเมื่อเทียบกับค่า H กล่าวคือ $P/H > 1.33$ หรือในทางกลับกัน $H/P \leq 0.75$ ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะของการไหลข้ามฝายสูง โดยจะถือว่าเป็นการไหลเข้าสู่อาคารระบายน้ำล้นด้วยความเร็วที่น้อยมาก ดังนั้นในการวิเคราะห์อัตราการไหล สามารถไม่พิจารณาถึงผลของหัวความเร็ว (velocity head) จากการไหลได้ [7] สามารถคำนวณหาอัตราการไหลในทางทฤษฎี (Q_T) ได้จากสมการที่ (1) ดังนี้ คือ

$$Q_T = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H^{1.5} \quad (1)$$

โดยที่ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งในความเป็นจริงแล้วอัตราการไหลจริงข้ามสันฝาย (Q) จะมีค่าน้อยกว่าอัตราการไหลในทางทฤษฎี ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลจริงและอัตราการไหลในทางทฤษฎีได้ดังสมการที่ (2) และ (3)

$$Q = C_D Q_T \quad (2)$$

$$Q = C_D \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H^{1.5} \quad (3)$$

เมื่อ C_D คือ สัมประสิทธิ์อัตราการไหล (discharge coefficient)

การศึกษาในครั้งนี้ สามารถใช้แนวคิดของหลักการวิเคราะห์มิติเชิงหน่วย (dimensional analysis) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติ (dimensionless parameters) กับสัมประสิทธิ์อัตราการไหลเข้าสู่ทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่ง (C_D) ซึ่งมีลักษณะเป็นการไหลแบบอิสระข้ามสันฝาย โดยตัวแปรที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลสำหรับการศึกษานี้ ได้แก่ ความหนาแน่นของน้ำ (ρ), หน่วยแรงตึงผิวของน้ำ (σ), ความหนืดจลน์ของน้ำ (μ), ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g), ความสูงของปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้นเหนือท้องน้ำ (P), ความสูงของระดับผิวน้ำเหนือปากทางเข้า (H), ความยาวของเส้นรอบรูปของปากทางเข้า (L) และอัตราส่วนของความกว้างต่อความยาวของหน้าตัดทางเข้า (m) โดยที่ $m = L_i/L_j$ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

$$C_D = \phi(\rho, \sigma, \mu, g, P, H, L, m) \quad (4)$$

จากการใช้ทฤษฎี Π ของ Buckingham จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$C_D = f(N_W, R_e, m, \frac{H}{L}, \frac{L}{P}, \frac{H}{P}) \quad (5)$$

โดยที่ N_W คือ ตัวเลขเวเบอร์ (Weber number), R_e คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynold number) โดยจากการพิจารณาสมการที่ (5) จะเห็นได้ว่าตัวเลขเวเบอร์จะเกี่ยวข้องกับแรงตึงผิวซึ่งจะมีความสำคัญสำหรับการวิเคราะห์การไหลที่มีค่า head ต่ำๆ สำหรับในกรณีของการไหลสู่อาคารระบายน้ำล้นในลักษณะการไหลข้ามฝายนั้น ตัวเลขเรย์โนลด์จะมีค่าสูงมาก กล่าวคือ อิทธิพลของความหนืดของน้ำจะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการไหล ดังนั้นตัวแปรที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์อัตราการไหล C_D คือ $m, H/L, L/P$ และ H/P นอกจากนี้แล้วเพื่อความสะดวกสามารถจัดรูปสมการที่ (3) ใหม่ได้เป็น

$$Q = C L H^{1.5} \quad (6)$$

เมื่อ C คือ สัมประสิทธิ์ของทางระบายน้ำล้น (spillway coefficient) โดยที่

$$C = C_D \frac{2}{3} \sqrt{2g} \quad (7)$$

3. วิธีการดำเนินการศึกษา

ในการศึกษาในครั้งนี้ ได้มีการสร้างแบบจำลองทางศาสตร์ของอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งที่มีหน้าตัดทางเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลผ่านอาคารระบายน้ำล้นหรือความสามารถในการระบายน้ำ โดยในการดำเนินการศึกษามีรายละเอียดดังนี้คือ

3.1 การสร้างแบบจำลองทางศาสตร์

สำหรับแบบจำลองทางศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ จะประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนี้

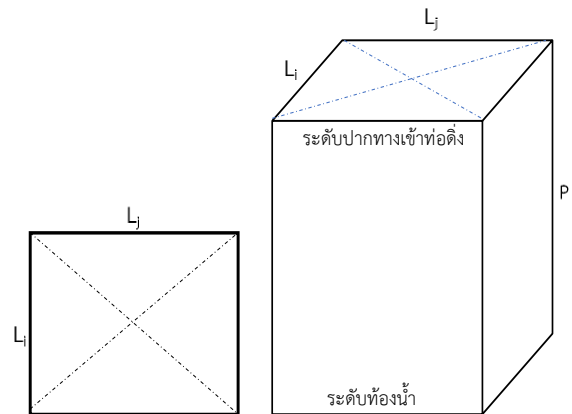
3.1.1 แบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

แบบจำลองอ่างเก็บน้ำจะเป็นส่วนประกอบที่ใช้ในการติดตั้งแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่ง รวมทั้งทำหน้าที่ในการปล่อยน้ำให้มีการไหลเข้าสู่แบบจำลองอาคารระบายน้ำล้น โดยจะมีลักษณะเป็นอ่างรูปทรงสี่เหลี่ยมกว้าง 1.00 เมตร ยาว 1.00 เมตร และสูง 0.60 เมตร ทำจากแผ่นพลาสติกใสที่มีผิวเรียบ ที่บริเวณพื้นอ่าง (ท้องน้ำ) จะถูกเจาะรูไว้เพื่อใช้สำหรับติดตั้งแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่ง โดยบริเวณด้านล่างของรูเจาะดังกล่าวจะมีช่องที่ทำหน้าที่รับน้ำจากท่อดิ่งของอาคารระบายน้ำล้นเพื่อส่งต่อไปยังท่อระบายน้ำออกที่อยู่นอกรอบ สำหรับระดับท้องน้ำของทางระบายน้ำออกจะอยู่ต่ำกว่าพื้นท้องน้ำของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำเป็นระยะ 0.30 m.

3.1.2 แบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่ง

แบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ จะมีหน้าตัดการไหลเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีความกว้าง L_i และความยาว L_j โดยมีความยาวของเส้นรอบรูปของหน้าตัดที่น้ำไหลเข้า คือ L (โดยที่ $L = 2L_i + 2L_j$) ซึ่งการไหลของน้ำจากแบบจำลองอ่างเก็บน้ำเข้าสู่ปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้นจะคล้ายกับการไหลล้นแบบอิสระข้ามฝายสันคม โดยมีความยาวของสันฝาย (crest length) เท่ากับความยาวของเส้นรอบรูปของหน้าตัดที่น้ำไหลเข้า (L) ดังนั้น การไหลของน้ำเข้าสู่อาคารระบายน้ำล้นจึงเป็นการไหลเข้า 4 ทิศทางข้ามขอบทั้ง 4 ด้านของปากทางเข้าแล้วไหลตกอย่างอิสระลงสู่ท่อดิ่งเพื่อระบายน้ำไปสู่ด้านท้ายน้ำต่อไป ดังนั้นในการที่จะกำหนดให้การไหลบริเวณปากทางเข้าของแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นมีลักษณะการไหลคล้ายกับการไหลข้ามฝายสันคม จึงได้มีการเลือกใช้แผ่นพลาสติกใสผิวเรียบที่มีความหนา 1 mm. ในการสร้างแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่ง ซึ่งการเลือกใช้ความหนาของปากทางเข้าน้อยๆ จะทำให้การไหลของน้ำลงสู่ท่อดิ่งไม่ถูกกีดขวางจากอิทธิพลของความหนาของปากทางเข้า สำหรับรูปแบบของปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำจะทั้งหมด 5 รูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบจะมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (width-length ratio, m) ที่แตกต่างกัน ในขณะที่ความยาวของเส้นรอบรูปของปากทางเข้า (L) ของแต่ละรูปแบบจะมีค่าคงที่เท่ากับ 40 cm. ในส่วนของระดับความสูงของปากทางเข้าของแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งเหนือท้องน้ำ (P) ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้จะมี 3 ระดับ คือ 10 cm, 15 cm และ 20 cm. สำหรับรูปแบบทั่วไปของแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่ง ได้แสดง

รายละเอียดไว้ในรูปที่ 1 โดยตารางที่ 1 เป็นรายละเอียดของแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้



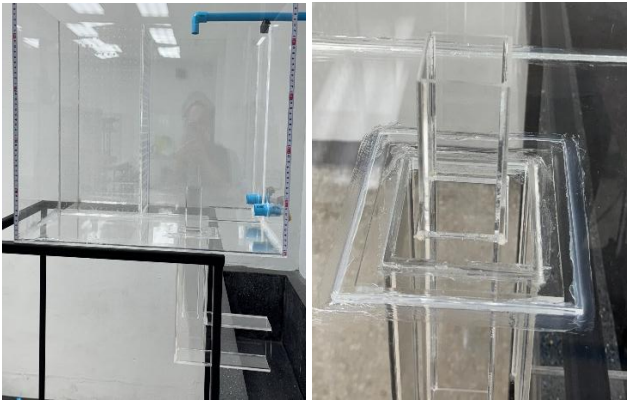
รูปที่ 1 รูปแบบทั่วไปของแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่ง

ตารางที่ 1 รายละเอียดของแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่ง

ลำดับ	P (cm)	L/P	L_i (cm)	L_j (cm)	$m = L_j/L_i$	
1	10	4.00	6	14	0.43	m1
2			7	13	0.54	m2
3			8	12	0.67	m3
4			9	11	0.82	m4
5			10	10	1.00	m5
6	15	2.67	6	14	0.43	m1
7			7	13	0.54	m2
8			8	12	0.67	m3
9			9	11	0.82	m4
10			10	10	1.00	m5
11	20	2.00	6	14	0.43	m1
12			7	13	0.54	m2
13			8	12	0.67	m3
14			9	11	0.82	m4
15			10	10	1.00	m5

3.2 การทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล

ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลผ่านอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก จะดำเนินการโดยการทำการทดลองเพื่อจำลองสภาพการไหลของน้ำจากแบบจำลองอ่างเก็บน้ำเข้าสู่แบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งที่สร้างขึ้น โดยมีการดำเนินการภายในห้องปฏิบัติการศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ซึ่งจากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า แบบจำลองของอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้จะมีจำนวนทั้งหมด 15 รูปแบบ ซึ่งจะเริ่มต้นจากการนำเอาแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งลำดับที่ 1 มาติดตั้งเข้ากับรูที่ได้เจาะเอาไว้บริเวณพื้นท้องน้ำของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ ดังรูปที่ 2

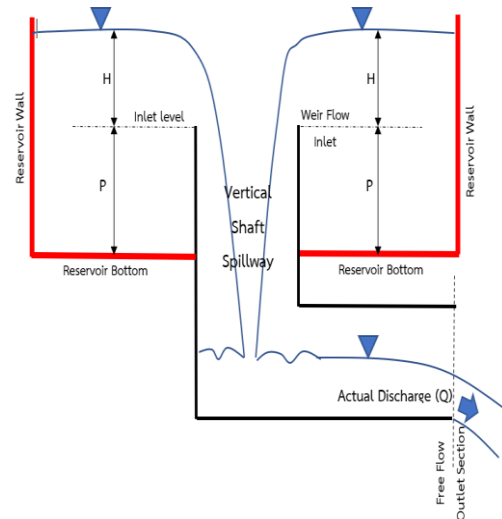


รูปที่ 2 การติดตั้งแบบจำลองทางชลศาสตร์ของอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งเข้ากับพื้นที่รองรับน้ำของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ

เมื่อทำการติดตั้งแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงเริ่มทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลตัวแปรต่างๆ ด้วยการปล่อยน้ำจากแหล่งจ่ายน้ำเข้าสู่ช่องรับน้ำของแบบจำลองอ่างเก็บน้ำที่ได้รับการออกแบบให้สามารถลดความแรงและความปั่นป่วนของการไหลก่อนที่จะไหลเข้าสู่แบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นที่ถูกติดตั้งไว้ ซึ่งในการเริ่มต้นเก็บข้อมูลจะทำการควบคุมการไหลให้มีระดับความสูงของผิวน้ำเหนือปากทางเข้าของท่อดิ่งหรือระยะ H (รายละเอียดในรูปที่ 3) มีค่าเท่ากับ 1.0 cm ซึ่งน้ำจะไหลลงสู่ช่องที่เปลี่ยนทิศทางการไหลจากแนวตั้งเข้าสู่ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉากที่อยู่ในแนวราบเพื่อระบายน้ำออกสู่ด้านท้ายน้ำต่อไป ในส่วนของการไหลออกทางด้านท้ายน้ำสำหรับการศึกษาในครั้งนี้จะมีลักษณะเป็นการไหลออกแบบอิสระโดยระดับน้ำด้านท้ายน้ำจะไม่ท่วมปากทางออกของท่อระบายน้ำ

ในการเก็บข้อมูลแต่ละครั้ง เมื่อสังเกตเห็นวาระดับน้ำเหนือปากทางเข้าของท่อดิ่ง (H) มีค่าคงที่ นั้นแสดงว่าการไหลผ่านอาคารระบายน้ำล้นจะมีสภาพการไหลเป็นแบบ การไหลคงที่ (steady flow) หรือเป็นการไหลที่มีอัตราการไหลคงที่ จากนั้นจึงทำการวัดอัตราการไหลจริง (Q) ผ่านแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้น ซึ่งในการศึกษาในครั้งนี้ได้ดำเนินการโดยการวัดค่าอัตราการไหลจริงผ่านทางระบายน้ำออกของท่อที่อยู่ในแนวราบด้านท้ายน้ำด้วยการใช้ถังวัดปริมาตรน้ำ โดยใช้หลักการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำในถังวัดปริมาตรที่รับน้ำมาจากทางระบายน้ำออกของแบบจำลองเทียบกับเวลา เมื่อบันทึกข้อมูลต่างๆ เป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่แบบจำลองอ่างเก็บน้ำให้มากขึ้นจนกระทั่งระดับน้ำ H มีค่าเพิ่มขึ้นอีก 1 cm จากนั้นจึงดำเนินการในลักษณะเช่นเดิม โดยในการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลอัตราการไหลจริงผ่านแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นสำหรับระดับน้ำ H ตั้งแต่ 1.0 cm เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยที่ $H/P \leq 0.75$ เพื่อให้มีสภาพการไหลเข้าสู่อาคารระบายน้ำล้นมีลักษณะเดียวกันกับการไหลข้ามฝายสูงตามแนวคิดของทฤษฎีที่ใช้เป็นแนวทางในการศึกษาในครั้งนี้ กล่าวคือ ในการคำนวณอัตราการไหลผ่านอาคารระบายน้ำล้นโดยใช้หลักของสมการพลังงาน จะถือว่าน้ำที่ไหลเข้าสู่ปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้นจะมีความเร็วการไหลที่น้อยมากจนมี

ลักษณะคล้ายกับน้ำนิ่ง ดังนั้นจึงสามารถที่จะไม่คำนึงถึงอิทธิพลของ velocity head ของการไหลเข้าสู่อาคารระบายน้ำล้นได้ สำหรับรูปที่ 4 แสดงให้เห็นถึงการดำเนินการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลเพื่อใช้ประกอบการการศึกษา



รูปที่ 3 ภาพจำลองการไหลเข้าสู่แบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่ง



รูปที่ 4 การทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลจากแบบจำลองทางชลศาสตร์ที่สร้างขึ้น

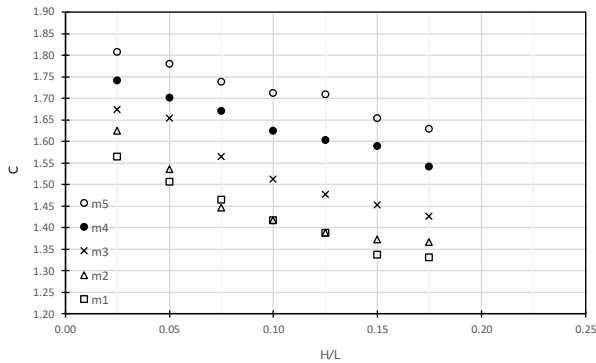
สำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ได้แก่ อัตราการไหลจริงผ่านแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่ง (Q) และค่าระดับความสูงของผิวน้ำเหนือปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้น (H) จะถูกนำไปใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางระบายน้ำล้น (C) จากสมการที่ (6) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ต่อไป

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

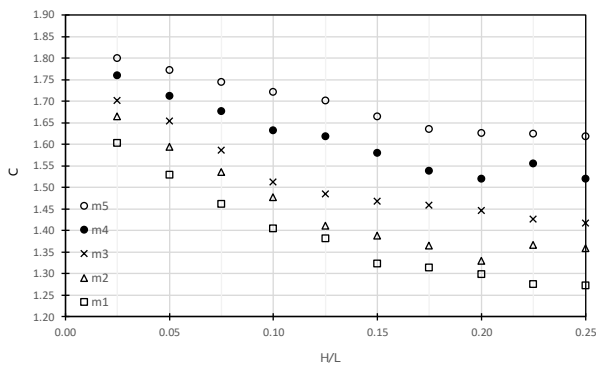
จากสมการที่ (5) และสมการที่ (6) จะเห็นได้ว่า ตัวแปรที่มีผลต่อค่า C ได้แก่ m , H/L , L/P และ H/P ดังนั้นจากข้อมูลที่ได้รับจากแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งทั้ง 15 รูปแบบ ดังรายละเอียดในตารางที่ 1 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/L สำหรับหน้าตัดทางเข้าที่มีค่า m ต่างๆ กัน

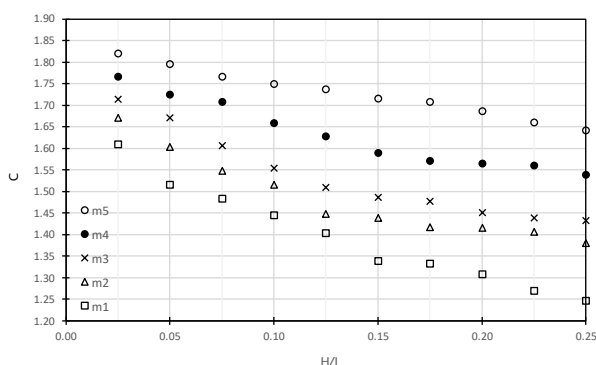
จากการจำลองสภาพการไหลของน้ำเข้าสู่แบบจำลองทางชลศาสตร์ในแต่ละรูปแบบ สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/L สำหรับอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งที่มีหน้าตัดทางเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากในกรณีค่า m ต่างๆ กัน เมื่อ $P = 10$ cm, 15 cm และ 20 cm ได้ดังรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 7 ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/L และ m กรณีที่ $P = 10$ cm



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/L และ m กรณีที่ $P = 15$ cm



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/L และ m กรณีที่ $P = 20$ cm

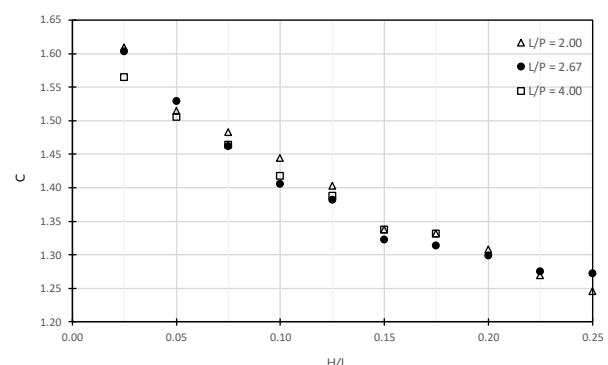
จากความสัมพันธ์ที่ได้จะพบว่า สัมประสิทธิ์ทางระบายน้ำล้น (C) จะแปรผกผันกับ H/L โดยค่า L ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้จะมีค่าคงที่ตามที่ได้นำมาไว้แล้ว ดังนั้นค่า C จึงแปรผกผันกับ H ด้วยเช่นกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้คือ การที่ปากทางเข้าของแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นมี

ลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก จะมีผลทำให้พฤติกรรมการไหลผ่านบริเวณมุมฉากทั้ง 4 มุมของหน้าตัดมีลักษณะคล้ายๆ กับการไหลผ่านฝายสันหยัก (labyrinth weir) ที่จะมีการชนกันของแผ่นน้ำ (nappe interference) ที่ไหลข้ามสันฝายบริเวณมุมของรอยหยัก (apex) ซึ่งจะมีผลทำให้น้ำไหลผ่านสันฝายได้ไม่สะดวกเมื่อเทียบกับการไหลข้ามสันฝายที่อยู่ในแนวตรง อันเป็นเหตุให้อัตราการไหลผ่านฝายสันหยักหรือความสามารถในการระบายน้ำผ่านฝายสันหยักลดลง [8-9] ดังนั้นในกรณีของการศึกษาในครั้งนี้จึงอธิบายได้ว่า น้ำที่ไหลผ่านสันฝายบริเวณมุมฉากทั้ง 4 มุมจึงเกิดการชนกันและเบียดตัวกันก่อนที่จะไหลลงสู่ท่อดิ่ง อันเป็นเหตุให้อัตราการไหลผ่านอาคารระบายน้ำล้นมีค่าน้อยกว่าอัตราการไหลที่ควรจะเป็นตามทฤษฎี นอกจากนี้แล้วหากพิจารณาถึงน้ำที่ไหลข้ามขอบของปากทางเข้าทั้งสี่ด้านจะมีการไหลพุ่งเข้าชนกันและเบียดตัวกันเพื่อไหลลงสู่ท่อดิ่ง ซึ่งหากพิจารณากรณีที่ระดับความสูงของผิวน้ำเหนือปากทางเข้า (H) ที่มีค่าน้อยจะพบว่า น้ำจะไหลข้ามปากทางเข้าด้วยความเร็วที่ไม่สูงมาก ทำให้ความรุนแรงของการชนกันของน้ำบริเวณปากทางเข้าอาคารระบายน้ำล้นก่อนที่จะไหลลงสู่ท่อดิ่งมีค่าลดลง ส่งผลให้น้ำสามารถไหลลงสู่ท่อดิ่งได้สะดวกกว่ากรณีที่ค่า H สูงกว่า ดังนั้นหากเปรียบเทียบค่า C สำหรับการไหลที่มีค่า H ต่างกันจะพบว่า การไหลในกรณีที่ค่า H ต่ำจะมีค่า C สูงกว่าการไหลในกรณีที่ค่า H สูงกว่า

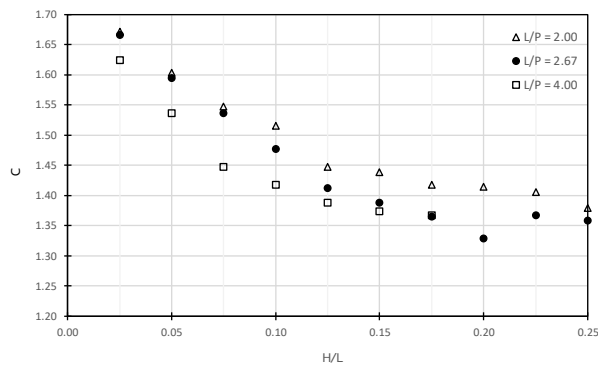
นอกจากนี้ หากพิจารณาค่าระดับน้ำ H ใดๆ จะพบว่าค่า C จะแปรผันโดยตรงกับค่า m กล่าวคือ หากความกว้าง (L_i) และความยาว (L_j) ของปากทางเข้าอาคารระบายน้ำล้นมีค่าเท่ากัน ($m = 1.00$) หรือมีค่าใกล้เคียงกัน (m มีค่าใกล้เคียง 1.00) จะมีผลทำให้น้ำที่ไหลผ่านเข้าปากทางเข้าลงสู่ท่อดิ่งมีโอกาสชนกันได้น้อย ทำให้น้ำสามารถไหลลงสู่ท่อดิ่งได้อย่างสะดวกกว่าหน้าตัดทางเข้าที่มีความกว้างและความยาวที่แตกต่างกันมาก (m มีค่าน้อย) ซึ่งจะมีผลทำให้น้ำที่ไหลข้ามปากทางเข้าลงสู่ท่อดิ่งมีการชนกันและเบียดตัวกันได้มากกว่าซึ่งจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการระบายน้ำลดลง

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/L สำหรับหน้าตัดทางเข้าที่มีค่า L/P ต่างๆ กัน

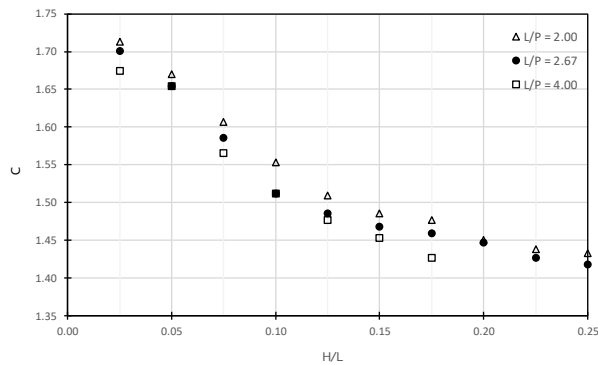
จากการศึกษาการไหลผ่านแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นที่สร้างขึ้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/L สำหรับแบบจำลองที่มีค่า L/P ต่างๆ กัน ในกรณีที่ค่า $m = 0.43, 0.54, 0.67, 0.82$ และ 1.00 ได้ดังรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 12 ตามลำดับดังนี้



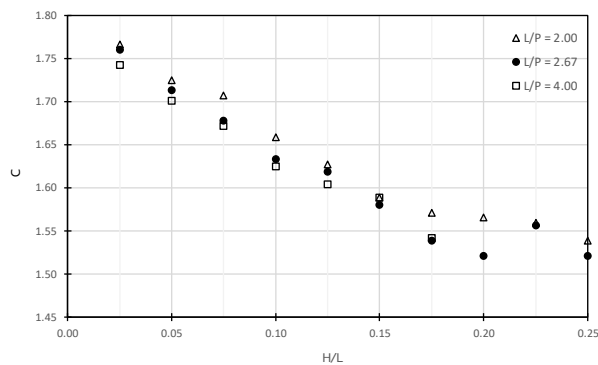
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/L และ L/P กรณีที่ $m = m_1 = 0.43$



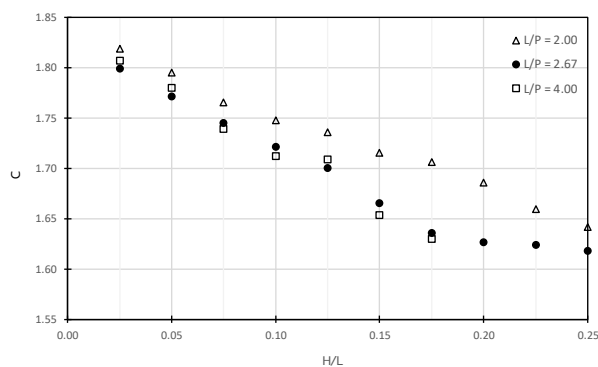
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/L และ L/P กรณีที่ $m = m_2 = 0.54$



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/L และ L/P กรณีที่ $m = m_3 = 0.67$



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/L และ L/P กรณีที่ $m = m_4 = 0.82$



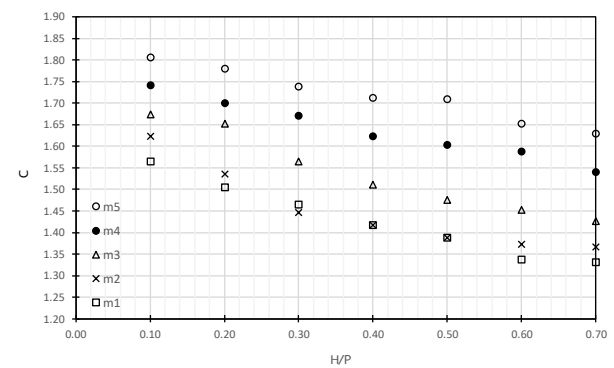
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/L และ L/P กรณีที่ $m = m_5 = 1.00$

จากความสัมพันธ์ที่ได้ในรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 12 จะพบว่าสำหรับการไหล

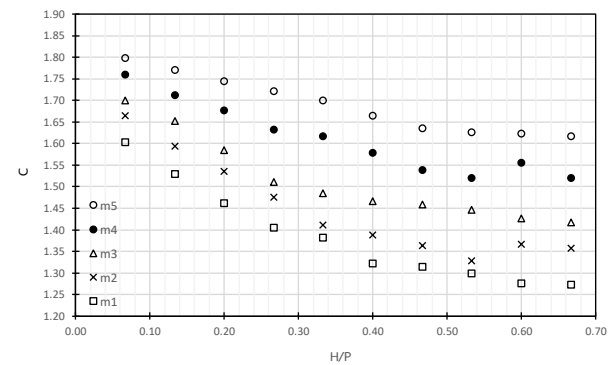
ผ่านแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นที่มีค่า m ต่างๆ กัน จะมีค่า C แปรผันโดยตรงกับค่า P ซึ่งอธิบายได้ว่า ระดับความสูงของปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้นเทียบกับระดับท้องน้ำ (P) จะมีผลต่อความลึกการไหลรวมของน้ำก่อนที่จะไหลเข้าสู่อาคารระบายน้ำล้น ($P + H$) โดยจะมีอิทธิพลต่อของความดันของน้ำด้านต้นน้ำ (back pressure) ซึ่งจะช่วยให้น้ำสามารถไหลผ่านปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้นได้สะดวกมากยิ่งขึ้น [10]

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/P สำหรับหน้าตัดทางเข้าที่มีค่า m ต่างๆ กัน

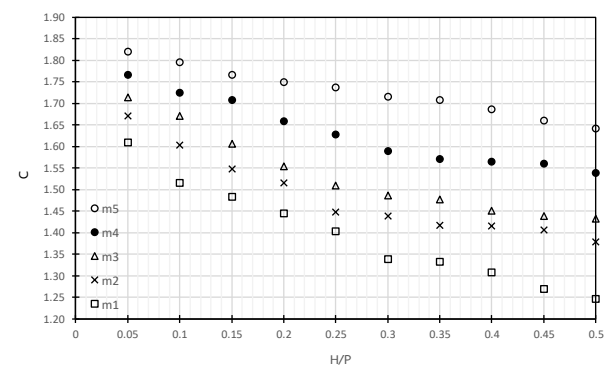
จากผลการศึกษาที่ได้รับ สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/P กรณีที่ m ต่างๆ กัน เมื่อ $P = 10, 15$ และ 20 cm ได้ดังรูปที่ 13 ถึงรูปที่ 15 ตามลำดับ ดังนี้



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/P กรณีที่ $P = 10$ cm



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/P กรณีที่ $P = 15$ cm



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/P กรณีที่ $P = 20$ cm

จากความสัมพันธ์ที่ได้ในรูปที่ 13 ถึงรูปที่ 15 จะพบว่า ในแต่ละระดับความสูงของปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้นเหนือท้องน้ำ (P) จะมีค่า C แปรผกผันกับ H/P ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ระดับผิวน้ำเหนือทางเข้าทางระบายน้ำล้น (H) จะมีผลต่อการชนกันและเบียดตัวกันของน้ำในขณะที่มีการไหลข้ามปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้นลงสู่ท้องน้ำ และหากพิจารณาสภาพการไหลที่มีค่า H/P ใดๆ จะพบว่า C จะแปรผันโดยตรงกับค่า m ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้หลักการเช่นเดียวกันกับที่ได้อธิบายมาแล้วก่อนหน้านี้ในส่วนของการความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ H/L สำหรับปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้นที่มีค่า m ต่างๆ กัน (หัวข้อ 4.1)

จากการพิจารณาผลการศึกษาโดยภาพรวมเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการระบายน้ำของแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติงที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้จะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์ของทางระบายน้ำล้น (C) จะมีค่าอยู่ในช่วง 1.234 - 1.819 โดยสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหล (C_D) จากสมการ (7) จะพบว่า $C_D = 0.418 - 0.616$ ซึ่งหากพิจารณาสัมประสิทธิ์อัตราการไหลผ่านฝายสันคมที่มีสันฝายอยู่ในแนวตรงที่มีค่า 0.62 สำหรับ $H/P = 0.10$ ถึงประมาณ 0.75 สำหรับ $H/P = 2.0$ [7] หรือพิจารณาค่า C_D ที่ได้จากการศึกษาอื่นๆ ที่ผ่านมา [2, 3, 4, 5, 6] จะพบว่าค่า C_D ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้จะมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีสาเหตุจากการที่ลักษณะหน้าตัดการไหลเข้าสู่อาคารระบายน้ำล้นแบบทอติงที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก ดังนั้นเมื่อน้ำไหลข้ามปากทางเข้าลงสู่ท้องน้ำ จะทำให้เกิดทั้งการเบียดตัวของน้ำในบริเวณมุมฉากทั้ง 4 มุม และการไหลชนกันของน้ำในขณะที่มีการไหลข้ามขอบของหน้าตัดด้านที่อยู่ตรงข้ามกัน โดยเฉพาะหน้าตัดที่มีค่า m ต่างๆ ตามที่ได้อธิบายมาแล้วในข้างต้น

5. สรุปผลการศึกษา

อาคารระบายน้ำล้นแบบทอติงเป็นโครงสร้างทางชลศาสตร์ที่มักจะถูกเลือกใช้ในการระบายน้ำส่วนเกินกว่าความสามารถในการกักเก็บของเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำที่จะกักเก็บไว้ได้ โดยมักจะถูกเลือกใช้งานในภูมิประเทศที่ไม่สามารถเลือกใช้อาคารระบายน้ำแบบปกติได้ ปัจจุบันได้มีการศึกษาเพื่อพัฒนารูปแบบหรือลักษณะของอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติงเพื่อให้สามารถระบายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยประเด็นสำคัญที่ได้รับความสนใจ คือ ลักษณะของปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติงที่จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการระบายน้ำ โดยจะพบว่าในหลายๆ การศึกษาได้มีการนำเสนอรูปแบบหน้าตัดของปากทางเข้าในลักษณะ เช่น หน้าตัดรูปวงกลม, หน้าตัดรูปหลายเหลี่ยม, หน้าตัดรูปวงกลมและมีปากทางเข้าแบบปุ่มเปียโน หรือหน้าตัดรูปวงกลมที่มีปากทางเข้าเป็นรูปกลีบดอกไม้ว ซึ่งแต่ละหน้าตัดจะมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการไหลผ่านของน้ำหรือความสามารถในการระบายน้ำที่แตกต่างกัน ในทางปฏิบัติแล้วการพิจารณาเลือกใช้หน้าตัดแบบใด นอกจากจะพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการระบายน้ำหรือประสิทธิภาพเชิงชลศาสตร์แล้ว ยังควรจะต้องพิจารณาถึงความสะดวกในการดำเนินการก่อสร้างอีกด้วย ดังนั้นในการศึกษาในครั้งนี้จึงได้นำเสนออาคารระบายน้ำล้นแบบทอติงที่มีหน้าตัดการไหลเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากและถือว่าเป็นรูปเรขาคณิตอย่างง่าย ซึ่งมีข้อดีในแง่ของความสะดวกใน

การก่อสร้าง โดยในการศึกษาได้มีการสร้างแบบจำลองทางชลศาสตร์ของอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติงที่มีหน้าตัดทางเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยมีสัดส่วนของความกว้างต่อความยาวที่แตกต่างกันแต่มีความยาวของเส้นรอบรูปของปากทางเข้าเท่ากัน ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

ก) จากการวิเคราะห์มิติเชิงหน่วยพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการระบายน้ำของอาคารระบายน้ำล้นแบบทอติงที่มีหน้าตัดของปากทางเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก คือ อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของหน้าตัดปากทางเข้า (m), ความยาวของเส้นรอบรูปของปากทางเข้า (L), ความสูงของระดับผิวน้ำเหนือปากทางเข้า (H) และ ระดับความสูงของปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้นเทียบกับระดับท้องน้ำ (P) โดยในการศึกษาในครั้งนี้ได้กำหนดให้ L ของทุกหน้าตัดมีค่าคงที่เท่ากัน และสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลเข้าสู่อาคารระบายน้ำล้นจะใช้หลักการของการไหลผ่านฝายสันคมประเภทฝายสูงที่มีค่า $P/H > 1.33$ หรือในทางกลับกัน $H/P \leq 0.75$ สำหรับความสามารถในการระบายน้ำของอาคารระบายน้ำล้นจะพิจารณาจากสัมประสิทธิ์ทางระบายน้ำล้น (C) ที่หาได้จากแบบจำลองทางชลศาสตร์ที่สร้างขึ้น กล่าวคือ ความสามารถในการระบายน้ำจะแปรผันโดยตรงกับค่า C ซึ่งพบว่าในทุกรูปแบบของแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นที่ใช้ในการศึกษาจะมีค่า C มากกว่า 1.00 และหากพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหล (C_D) ที่ได้จะพบว่ามีความอยู่ในช่วง 0.418 - 0.616 ซึ่งถือว่ามีความค่อนข้างต่ำและถือว่าเป็นข้อเสียเปรียบของปากทางเข้าที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดรูปทรงอื่นที่มีการใช้งานกัน แต่หากพิจารณาในประเด็นของดำเนินการก่อสร้างจะถือว่าหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะมีความสะดวกในการดำเนินงานมากกว่า ซึ่งในการเลือกใช้งานว่าจะใช้หน้าตัดรูปแบบใด ก็ขึ้นอยู่กับว่าผู้ใช้ให้ความสำคัญกับจุดเด่นในด้านใดเป็นสำคัญ

ข) หากพิจารณาการไหลที่มีค่า H ใดๆ จะพบว่า อัตราการไหลจริงผ่านอาคารระบายน้ำล้นจะมีค่าน้อยกว่าอัตราการไหลในทางทฤษฎี เนื่องจากเกิดการชนกันของน้ำเมื่อไหลข้ามขอบของปากทางเข้าหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉากในด้านที่อยู่ตรงข้ามกันและการชนกันของน้ำบริเวณมุมฉากทั้ง 4 มุม ทำให้เกิดการเบียดตัวกันของน้ำในขณะที่มีการไหลลงสู่ท้องน้ำ อันเป็นเหตุให้การระบายน้ำมีประสิทธิภาพลดลง

ค) ค่า C ของอาคารระบายน้ำล้นจะแปรผกผันกับค่า H เนื่องจากระดับความสูงของผิวน้ำเหนือปากทางเข้าอาคารระบายน้ำล้น (H) จะมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อโอกาสที่น้ำจะมีการชนกันและเบียดตัวกันในขณะที่ไหลเข้าสู่ปากทางเข้าก่อนที่จะไหลลงสู่ท้องน้ำ

ง) ค่า C ของอาคารระบายน้ำล้นจะแปรผันโดยตรงกับค่า m (โดยที่ $m \leq 1.00$) กล่าวคือ หากความกว้าง (L_p) และความยาว (L_j) ของปากทางเข้าสู่อาคารระบายน้ำล้นมีค่าเท่ากัน ($m = 1.00$) หรือมีค่าใกล้เคียงกัน (m มีค่าใกล้เคียง 1.00) จะมีผลทำให้น้ำที่ไหลล้นข้ามปากทางเข้าลงสู่ท้องน้ำมีโอกาสชนกันและเบียดตัวกันได้น้อย ทำให้น้ำสามารถไหลลงสู่ท้องน้ำได้อย่างสะดวกกว่าหน้าตัดทางเข้าที่มีความกว้างและความยาวที่แตกต่างกันมาก (m มีค่าน้อย) ซึ่งจะมีผลทำให้น้ำที่ไหลข้ามปากทางเข้าลงสู่ท้องน้ำมีการชนกันและเบียดตัวกันได้มากกว่า

จ) ค่า C ของอาคารระบายน้ำล้นจะแปรผันโดยตรงกับค่า P เนื่องจากระดับความสูงของปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้นเทียบกับระดับท้องน้ำ (P) จะมีผลต่อความลึกการไหลรวมของน้ำซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความเร็วของน้ำที่ไหลเข้าสู่อาคารระบายน้ำล้น กล่าวคือ หาก P มีค่ามาก (เมื่อเทียบกับค่า H) จะทำให้พฤติกรรมการไหลเข้าสู่อาคารระบายน้ำล้นมีลักษณะเดียวกันกับการไหลผ่านฝายสูงซึ่งความเร็วการไหลเข้าสู่อาคารระบายน้ำล้นจะมีค่าน้อยมาก ทำให้ velocity head แทบจะไม่มีอิทธิพลต่อการคำนวณหาอัตราการไหลผ่านอาคารระบายน้ำล้นและสอดคล้องตามสมมติฐานที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

จากการพิจารณาผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้จะเห็นได้ว่า อาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากถือว่าเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการนำไปใช้ในการระบายน้ำส่วนเกินจากแหล่งกักเก็บน้ำ โดยมีจุดเด่น คือ ความสะดวกในการก่อสร้างที่สามารถดำเนินการได้อย่างไม่ยุ่งยากมากนัก แต่มีข้อควรพิจารณาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของหน้าตัดปากทางเข้า (m) ที่เหมาะสมกับระดับความสูงของผิวน้ำเหนือปากทางเข้าของอาคารระบายน้ำล้น นอกจากนี้จะต้องพิจารณาถึงแนวทางในลดโอกาสของการพุ่งชนกันของน้ำหรือการเบียดตัวของน้ำที่ไหลผ่านบริเวณมุมฉากทั้ง 4 มุมด้วยการปรับแต่งมุมฉากให้มีความโค้งมนมากขึ้น รวมทั้งควรจะต้องหาแนวทางในการควบคุมการไหลผ่านปากทางเข้ามีการไหลแบบหมุนวน (vortex) ที่น้อยลง อันจะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายน้ำผ่านอาคารระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งที่มีหน้าตัดทางเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากให้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาเรื่องพฤติกรรมการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นแบบท่อดิ่งหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉากในครั้งนี้ สามารถดำเนินการได้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีเนื่องจากการได้รับการสนับสนุนเกี่ยวกับอุปกรณ์และเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการเก็บข้อมูลจากแบบจำลองทางศาสตร์ที่สร้างขึ้นภายในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ทางคณะผู้ศึกษาจึงขอขอบคุณในความอนุเคราะห์มา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Khaleel F.I. and Mohammed A.Y. (2021). The Effect of Dual Water Jet on Discharge Coefficient of Vertical Spillway. *Ai-Rafadain Engineering Journal*, 26 (2), pp. 292-299.

[2] Kashkaki Z., Banejad H., Heydari M. and Olyaie E. (2019). Experimental Study of Hydraulic Flow of Circular Piano-Key Inlet in Shaft Spillways. *Journal Rehabil Civil Engineering*, 7 (3), pp. 96-102.

[3] Brakeni A. and Guryev A. P. (2020). An Experimental Study of Shaft Spillway with a Polygon Section. *UPB Scientific Bul Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 82 (2), pp. 255-268.

[4] Kahlerras D., Brakeni A. and Guryev A. P. (2020). Discharge Capacity of Shaft Spillway with a Polygonal Section: A case Study of Djedra Dam (East Algeria). *Water Science & Technology Water Supply*, 21 (3), pp. 1202-1215.

[5] Maedeh K. and Kabiri-Samani A. (2021). Effects of Modern Marguerite-Shaped Inlets on Hydraulic Characteristics of Swirling Flow in Shaft Spillways. *Water Science and Engineering*, 14 (3), pp. 246-256.

[6] Intisar A. H. and Ahmed Y. M. (2024). Flow Characteristics in Vertical Shaft Spillway with Varied Inlet Shapes and Submergence States. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 31 (4), pp. 34-45.

[7] Daugherty, R.L. and Franzini, J.B. (1977). *Fluid Mechanics with Engineering Applications*. The McGraw- Hill Book Company, Inc., pp.400-403.

[8] Crookston B. M. and Tullis B. P. (2018). Labyrinth Weirs: Nappe Interference and Local Submergence. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138 (8), pp. 539-556.

[9] Falvey, H. T. (2003). *Hydraulic Design of Labyrinth Weirs*. American Society of Civil Engineers Press., pp. 65-67.

[10] Ghosh, S. N. (1997). *Flood Control and Drainage Engineering*. Oxford & IBH Publishing, pp. 122-123.