

อิทธิพลของรูปแบบการจัดวางแนวสันฝายที่มีต่ออัตราการไหลผ่านฝายสันคม รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ยุทธนา แก้วคำแจ้ง^{1*},

นรุตม์ชัย ปกแก้ว¹, ธิติภูมิฐ์ กิริมณัสวิน¹ และพงศธร พิสิฐภาคาภูมิ¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

*yuddhana.k@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาถึงอิทธิพลของรูปแบบการจัดวางแนวของสันฝายที่มีต่ออัตราการไหลผ่านฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในการดำเนินการศึกษาได้มีการสร้างแบบจำลองทางชลศาสตร์เพื่อใช้ในการจำลองสภาพการไหลในทางน้ำเปิดสู่ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ผลการศึกษาที่ได้จะถูกวิเคราะห์เพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างอัตราการไหลจริง (Q_A) และอัตราการไหลในทฤษฎี (Q_T) ผ่านฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ระดับความสูงของผิวน้ำเหนือสันฝาย (h) ต่างๆ กัน สำหรับแบบจำลองฝายสันคมที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ถูกสร้างจากแผ่นพลาสติกแบบบางที่มีผิวเรียบและมีความยาวของสันฝาย (L) คงที่ จำนวน 6 รูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบจะมีค่ามุม θ ที่แตกต่างกัน โดย θ คือ มุมระหว่างสันฝายที่ตำแหน่งกึ่งกลางของหน้าตัดการไหลเมื่อมองจากด้านท้ายน้ำ ได้แก่ 30° , 60° , 90° , 120° , 150° และ 180° จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลในแต่ละค่า h ผ่านฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้ง 6 รูปแบบ พบว่า Q_A จะมีค่าน้อยกว่า Q_T เนื่องจากโดยปกติแล้ว การวิเคราะห์อัตราการไหลในทางทฤษฎีผ่านฝายสันคม ไม่ได้พิจารณาถึงการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการไหลผ่านสันฝาย เพื่อที่จะสามารถหาค่าอัตราการไหลผ่านฝายสันคมได้ใกล้เคียงความเป็นจริง จึงได้มีการหาค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลผ่านฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (C_R) ซึ่งพบว่า C_R แปรผันโดยตรงกับมุม θ โดยที่ $C_R = 0.584, 0.602, 0.665, 0.698, 0.719$, และ 0.757 สำหรับ $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ และ 180° ตามลำดับ

คำสำคัญ: ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า การวางแนวสันฝาย ฝายหยัก สัมประสิทธิ์อัตราการไหลผ่านฝายสันคม

The Influence of Weir Crest Alignment Patterns on the Discharge through Rectangular Sharp-Crested Weirs

Yuddhana Keokhumcheng^{1*},

Narutchai Pokkaew¹, Thitiphum Keeratimanaswin¹ and Pongsaton Pisitpakpoom¹

¹Department of Civil Engineering Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Krungthep

* yuddhana.k@mail.rmutk.ac.th

Abstract

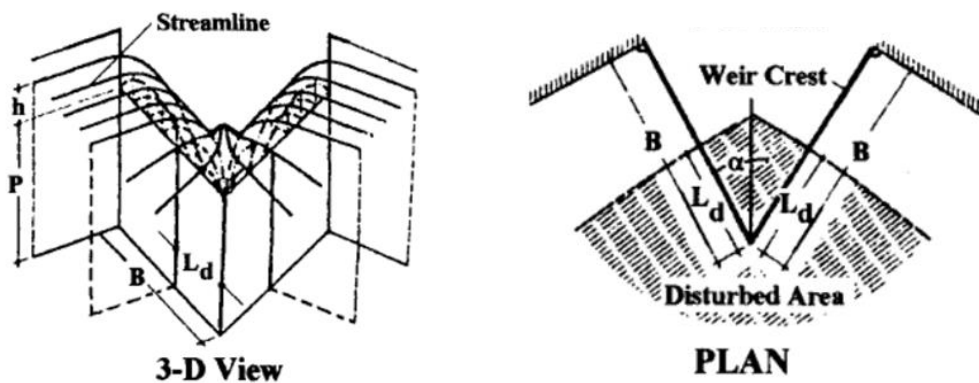
This research aimed to study the influence of weir crest alignment on the discharge through the rectangular sharp-crested weirs by the creating of hydraulic model to simulate the flow in open channel through rectangular sharp-crested weirs. The obtained from the study was analyzed and for the comparison between the actual discharge (Q_A) and the theoretical discharge (Q_T) through the rectangular sharp-crested weirs for different heights of water level above the weir crest (h). The model of sharp-crested weir in this study was constructed from the thin plastic sheets with smooth surface which having constant crest length (L). There are 6 patterns of weir crest in different values of θ which is the angle between the weir crests at the center-line of channel flow section when observing from the downstream side i.e. 30° , 60° , 90° , 120° , 150° and 180° . From the study of the flow behavior through rectangular sharp-crested weirs for different values of h , it was found that the values of Q_A are totally less than the values of Q_T for all 6 patterns of weir crest alignments since the energy loss of flow through the sharp-crested weir is commonly ignored in the analysis of theoretical discharge. To obtain the theoretical discharge through sharp-crested weir which close to the actual value, the determination of discharge coefficients of rectangular sharp-crested weir (C_R) were performed and it was found that C_R is proportional to θ by which $C_R = 0.584, 0.602, 0.665, 0.698, 0.719$ and 0.757 for $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ and 180° , respectively.

Keywords: Rectangular sharp-crested weir, Weir crest alignment, Labyrinth weir, Discharge coefficient of sharp-crested weir

1. บทนำ

จากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกมีแนวโน้มที่จะส่งผลให้บางภูมิภาคอาจต้องประสบกับปัญหาปริมาณฝนที่มากกว่าปกติ อันเป็นเหตุให้เกิดน้ำหลากที่รุนแรงมากขึ้น จากหลายๆ งานวิจัยได้มีการพยากรณ์ถึงโอกาสที่จะเกิดน้ำหลากจากภาวะฝนตกหนักในบางภูมิภาคที่มีปริมาณมากขึ้นหรือเกิดเหตุการณ์ในลักษณะดังกล่าวบ่อยขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาแนวทางในการเพิ่มความปลอดภัยเกี่ยวกับการจัดการน้ำอย่างเหมาะสม ในปัจจุบันจะพบว่ามีเขื่อนหลายๆ แห่งที่มีความจำเป็นจะต้องได้รับการปรับปรุงประสิทธิภาพทางชลศาสตร์เกี่ยวกับความสามารถในการระบายน้ำที่ไม่สามารถจะกักเก็บไว้ได้ให้ไหลผ่านอาคารระบายน้ำล้น (Spillway) ได้อย่างปลอดภัย และหากอัตราการระบายน้ำที่ต้องการมีค่าสูงกว่าความสามารถในการระบายน้ำของอาคารระบายน้ำล้นที่ได้ออกแบบเอาไว้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาแนวทางในการเพิ่ม

ศักยภาพในการระบายน้ำให้สูงขึ้นโดยแนวทางหนึ่งที่มีจะถูกเลือกใช้ คือ การใช้ฝายหยัก (Labyrinth weir) เนื่องจากมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริงกล่าวคือ สามารถนำไปใช้ได้เป็นอย่างดีกับโครงการที่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับพื้นที่ในการดำเนินการ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องขยายความกว้างของอาคารระบายน้ำล้นที่มีอยู่เดิมตลอดจนไม่จำเป็นต้องเพิ่มความสูงของระดับน้ำเหนือสันฝายเพื่อให้มี Head ของน้ำเพียงพอที่จะสามารถระบายน้ำได้ในอัตราการไหลที่มากขึ้น [1-2] โดยฝายหยักถือว่าเป็นฝายชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ในการกักเก็บน้ำและระบายน้ำส่วนเกินออกจากพื้นที่กักเก็บ มักจะถูกใช้ในการช่วยเพิ่มอัตราการระบายน้ำให้กับอาคารระบายน้ำล้น โดยฝายหยักจะมีความยาวของสันฝาย (Crest length) มากกว่าทางน้ำเดิมหรืออาคารระบายน้ำล้นเดิมอันเป็นผลมาจากการจัดวางแนวสันฝายให้มีรูปแบบในลักษณะคดไปคดมา (Zigzag crest plan) จากผลการศึกษาโดยนักวิจัยหลายๆ ท่านพบว่า หลักการในทางทฤษฎีหรือสมการทั่วไปที่ใช้ในการคำนวณเพื่อวิเคราะห์หรือออกแบบฝายหยักไม่ได้พิจารณาถึงตัวแปรเกี่ยวกับลักษณะทางเรขาคณิตของรูปแบบตัวฝาย หรือตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสภาพการไหลของน้ำเข้าสู่ตัวฝาย [3] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาที่น่าสนใจดังนี้ จากผลการศึกษาของ Falvey, H. T. [4] แสดงให้เห็นว่าฝายหยักที่มีรูปแบบของสันฝายเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูหรือรูปสามเหลี่ยมจะมีประสิทธิภาพในการให้น้ำไหลผ่านได้สูงกว่าฝายหยักที่มีรูปแบบตามแนวรอยหยักเป็นแบบมุมฉาก Paxon et al. [5] ได้ศึกษาการไหลผ่านอาคารระบายน้ำล้นที่มีฝายหยักเป็นองค์ประกอบ พบว่าที่ระดับความสูงของน้ำเหนือสันฝายเท่ากัน ฝายหยักจะสามารถระบายน้ำด้วยอัตราการไหลสูงๆ ได้ดีกว่าฝายสันตรง Gupta et al. [6] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลผ่านฝายหยักสันคดมที่มีรูปแบบของสันฝายเป็นรูปสามเหลี่ยม พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลสูงกว่าฝายสันคดมที่มีสันฝายอยู่ในแนวตรง Gupta et al. [7-8] ได้ทำการศึกษาการไหลผ่านแบบจำลองฝายหยักที่มีรูปแบบของสันฝายเป็นตัวอักษร W และรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากพบว่าจะมีประสิทธิภาพของอัตราการไหลผ่านสูงกว่าฝายสันคดมที่มีแนวสันฝายเป็นเส้นตรง Bahrebar et al. [9] ได้ศึกษาสมรรถนะทางชลศาสตร์ของฝายหยักที่มีรูปแบบเป็นรูปสามเหลี่ยมจากแบบจำลองทางชลศาสตร์ พบว่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลจะมีค่าสูงกว่าฝายหยักที่มีแนวสันฝายเป็นเส้นตรง จากหลายๆ ผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า แม้ฝายหยักจะมีจุดเด่นในด้านการเพิ่มความสามารถในการระบายน้ำแต่ก็ยังมีจุดอ่อนอยู่เช่นกันกล่าวคือ ปัญหาเกี่ยวกับการไหลชนกันของแผ่นน้ำ (Nappe interference) ที่ไหลข้ามสันฝายในบริเวณมุมของสันฝาย (Apex) [2, 4] โดยเฉพาะอย่างยิ่งฝายหยักที่มีรูปแบบเป็นรูปสามเหลี่ยมดังภาพที่ 1 ซึ่งจะส่งผลให้การไหลผ่านสันฝายเป็นไปอย่างไม่สะดวกอันเป็นเหตุให้ประสิทธิภาพในการระบายน้ำลดลง ในการเลือกใช้ฝายหยักเพื่อเพิ่มความสามารถในการระบายน้ำ จะต้องคำนึงถึงจำนวนรอบ (Cycle) ของรอยหยักหรือจำนวนรอยหยักให้เหมาะสม เนื่องจากระยะความยาวของสันฝายที่เพิ่มขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับจำนวนรอยหยัก และหากมีจำนวนรอบของรอยหยักที่มากเกินไปจะมีผลทำให้มุมระหว่างสันฝายตามแนวรอยหยักมีค่าน้อยลงตามไปด้วยโดยเฉพาะอย่างยิ่งฝายหยักที่มีรูปแบบเป็นรูปสามเหลี่ยม



ภาพที่ 1 การพุ่งชนกันของแผ่นน้ำ (Nappe interference) ที่ไหลข้ามสันฝายในบริเวณมุมของฝายหยัก
ที่มา: [4]

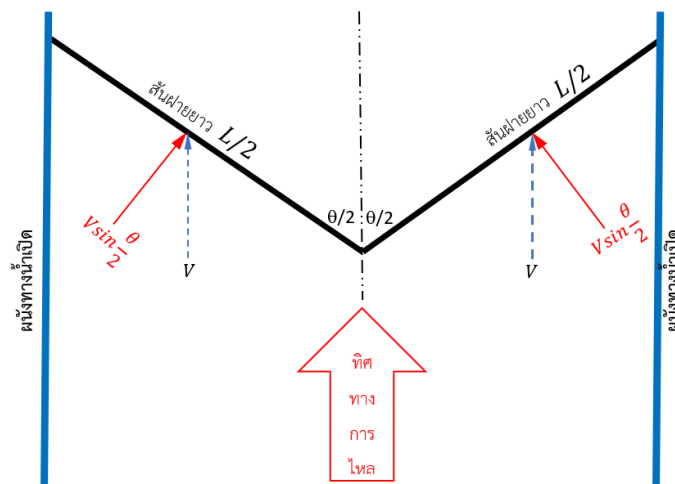
จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่าฝายหยักสามารถเพิ่มความสามารถในการระบายน้ำได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งฝายหยักที่มีรูปแปลนของสันฝายเป็นรูปสามเหลี่ยมจะมีประสิทธิภาพสูงในการให้น้ำไหลผ่านได้ ดังนั้นในการศึกษาในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบอิทธิพลของรูปแบบการจัดวางแนวสันฝายในลักษณะของฝายหยักที่จะผลต่อพฤติกรรมการไหลโดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราการไหลผ่านฝาย โดยจะทำการสร้างแบบจำลองทางชลศาสตร์ของฝายสันคมที่มีรูปแปลนของสันฝายเป็นรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วอย่างง่าย กล่าวคือ เป็นฝายหยักที่มี 1 วนรอบ (Cycle) ของรอยหยัก ซึ่งในแต่ละรูปแบบของฝายจะมีมุมภายในของส่วนยอด (Apex) ของรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่แตกต่างกันแต่มีความยาวของสันฝายเท่ากัน แบบจำลองฝายแต่ละรูปแบบจะถูกติดตั้งในทางน้ำเปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดการไหลผ่านสันฝายเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเช่นเดียวกัน ผลการศึกษาที่ได้จากแบบจำลองทางชลศาสตร์จะถูกนำไปวิเคราะห์ร่วมกับการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ รวมทั้งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบฝายหยักต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยเพื่อใช้ประกอบการศึกษาในครั้งนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ การพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหลผ่านฝายหยักจากทฤษฎีหรือสมการที่มีอยู่ก่อนแล้ว และการสร้างแบบจำลองทางชลศาสตร์ของฝายหยักเพื่อจำลองสภาพการไหลผ่านของน้ำ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาการไหลผ่านฝายสันคมที่มีการจัดวางแนวสันฝายเพื่อให้มีลักษณะเป็นฝายหยักอย่างง่ายกล่าวคือ มี 1 วนรอบของรอยหยัก ซึ่งจะทำให้รูปแปลนของสันฝายมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่มีทิศทางของยอด (Apex) สวนทางการไหลของน้ำ โดยที่มุมภายในของส่วนยอดของรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วจะมีค่าเท่ากับ θ ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 รูปแปลนของฝายหยัก (Labyrinth weir) ที่มีจำนวน 1 รอบ (Cycle) ของการหยักที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

โดยทั่วไปแล้วในการหาอัตราการไหลผ่านฝายสันคมสำหรับการไหลที่มีระดับความสูงของผิวน้ำเหนือสันฝาย h สามารถวิเคราะห์หาได้โดยใช้แนวคิดของสมการของการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuity equation) ร่วมกับสมการพลังงานของ Bernoulli [4] ซึ่งหากเป็นการไหลผ่านฝายสันคมที่มีแนวของสันฝายเป็นเส้นตรงจะมีความยาวตามแนวสันฝายตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสจะพบว่าเส้นกระแสการไหล (Streamlines) จะตั้งฉากกับแนวสันฝาย ดังนั้นสามารถหาอัตราการไหลในทางทฤษฎีผ่านฝายสันคมในกรณีที่แนวสันฝายตั้งฉากกับทิศทางการไหล (Q_T) ได้จาก

$$Q'_T = \frac{2}{3} L \sqrt{2gh}^{1.5} \quad (1)$$

สำหรับกรณีของฝายหยักจะมีทิศทางการไหลของน้ำไม่ตั้งฉากกับสันฝายซึ่งจะส่งผลให้เส้นกระแสการไหลบริเวณด้านใต้ของแผ่นน้ำ (Lower Nappe) ที่ไหลล้นข้ามสันฝายจะมีทิศทางการไหลจะตั้งฉากกับแนวสันฝายในขณะที่เส้นกระแสการไหลบริเวณด้านบนของแผ่นน้ำ (Upper Nappe) ไม่ตั้งฉากกับแนวสันฝาย กล่าวคือ จะมีทิศทางการพุ่งตรงไปทางท้ายน้ำของฝาย [4] ซึ่งหากพิจารณาในภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่าทิศทางการไหลของน้ำ (V) ของการไหลเข้าสู่ตัวฝายจะไม่ตั้งฉากกับสันฝาย ดังนั้นในการวิเคราะห์อัตราการไหลผ่านฝาย จะต้องมีการปรับแก้ความเร็วดังกล่าวให้เป็นความเร็วที่มีทิศทางตั้งฉากกับแนวสันฝาย ดังนั้นสามารถหาค่าอัตราการไหลในทางทฤษฎี (Q_T) ในกรณีดังกล่าวนี้ได้จาก

$$Q_T = \frac{2}{3} L \sin \frac{\theta}{2} \sqrt{2gh}^{1.5} \quad (2)$$

2.2 แบบจำลองทางชลศาสตร์ของฝายหยัก

เนื่องจากสมการทั่วไปที่ใช้ในการคำนวณเพื่อวิเคราะห์การไหลผ่านฝายหยักซึ่งทิศทางการไหลของน้ำไม่ตั้งฉากกับแนวสันฝาย กล่าวคือ มีลักษณะการไหลแบบ 3 มิติ [4] รวมทั้งแนวคิดของสมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการไหลผ่านฝายไม่ได้พิจารณาถึงตัวแปรเกี่ยวกับลักษณะทางเรขาคณิตของรูปแบบตัวฝาย หรือตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสภาพการไหลของน้ำเข้าสู่ตัวฝาย [3] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างแบบจำลองทางชลศาสตร์เพื่อใช้ศึกษาสภาพการไหลที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งสามารถนำผลการศึกษามาได้ไปเปรียบเทียบกับกรณีวิเคราะห์ในทางทฤษฎีต่อไป

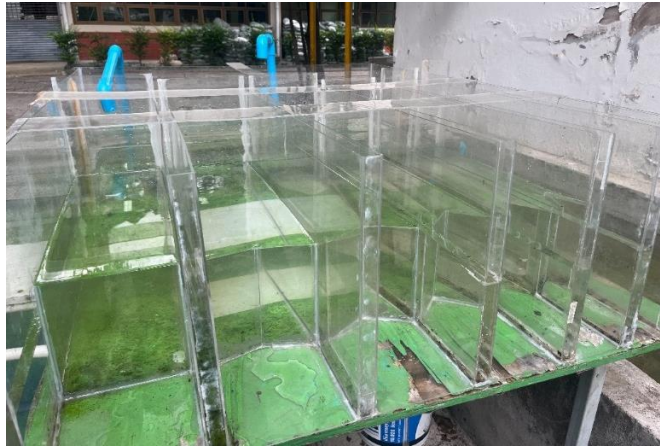
สำหรับแบบจำลองทางชลศาสตร์ของฝายหยักที่จะใช้ในการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นแบบจำลองฝายสันคมที่มีรูปแปลนของแนวสันฝายในลักษณะของฝายหยักที่มี 1 วงรอบของรอยหยัก กล่าวคือ จะมีรูปแปลนเป็นรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่มีส่วนยอดหันไปทางด้านเหนือน้ำ ดังภาพที่ 2 โครงสร้างตัวฝายจะถูกติดตั้งให้ตั้งฉากกับท้องน้ำของทางน้ำเปิดหน้าตดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่อยู่ในแนวราบ สำหรับวัสดุที่ใช้สร้างเป็นแบบจำลองทางชลศาสตร์จะเป็นพลาสติกใสที่มีผิวเรียบเพื่อหลีกเลี่ยงอิทธิพลของลักษณะพื้นผิวของทางน้ำเปิดและตัวฝายสันคมที่จะมีผลต่อพฤติกรรมการไหล

ในส่วนรายละเอียดของวัสดุที่ใช้ทำตัวฝายสันคมได้เลือกใช้แผ่นพลาสติกใสที่มีความหนา (B) เท่ากับ 1 mm. ดังนั้นเพื่อให้สภาพการไหลผ่านฝายมีคุณลักษณะเป็นไปตามคุณสมบัติของฝายสันคม ค่าอัตราส่วน h/B จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 15 เมื่อ h คือ ระดับความสูงของผิวน้ำเหนือสันฝาย [10] ดังนั้นในการศึกษาในครั้งนี้จะต้องกำหนดให้ระดับความสูงของผิวน้ำเหนือสันฝาย (h) ให้มีค่าไม่น้อยกว่า 15 mm. ด้วยเช่นกัน

เนื่องจากรูปแปลนของสันฝายที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว โดยมุมภายในของส่วนยอดรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วได้กำหนดไว้ 6 ค่า ได้แก่ $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ และ 180° สำหรับกรณีที่ $\theta = 180^\circ$ จะหมายถึง ฝายที่มีแนวสันฝายเป็นเส้นตรงและตั้งฉากกับทิศทางการไหล ในส่วนของความสูงจากท้องน้ำถึงสันฝาย (P) และความยาวประสิทธิผลของสันฝาย (Effective crest length, L) จะมีค่าเท่ากับ 20 cm. เท่ากันสำหรับฝายทั้ง 6 รูปแบบ

ที่บริเวณด้านเหนือน้ำของทางน้ำเปิดที่ได้มีการติดตั้งฝายหยักทั้ง 6 รูปแบบ ได้รับการออกแบบให้เป็นช่องรับน้ำจากเครื่องสูบน้ำที่สามารถปรับอัตราการไหลได้ โดยช่องรับน้ำจะช่วยลดความปั่นป่วนและการกระเพื่อมของผิวน้ำที่จะไหลเข้าสู่ตัวฝาย ก่อนที่น้ำจะไหลล้นแบบอิสระ (Free Overflow) ข้ามสันฝายไปยังท้ายน้ำต่อไป สำหรับแบบจำลองทางชลศาสตร์ของฝายหยักที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ได้แสดงรายละเอียดไว้ในภาพที่ 3

ในการเก็บข้อมูลจากแบบจำลองทางชลศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถดำเนินการได้โดยการปล่อยให้น้ำไหลเข้าสู่แบบจำลองฝายหยักแต่ละรูปแบบด้วยอัตราการไหลที่คงที่โดยให้มีสภาพการไหลแบบใต้วิกฤต (Subcritical Flow) จากนั้นทำการวัดระดับความสูงของผิวน้ำเหนือสันฝาย (h) แล้วจึงทำการวัดค่าอัตราการไหลผ่านฝายในแต่ละรูปแบบด้วยการตวงน้ำแล้วทำการจับเวลา จากนั้นนำปริมาณน้ำที่ตวงได้ไปชั่งน้ำหนักแล้วจึงทำการแปลงน้ำหนักเป็นปริมาตรของน้ำก็จะสามารถหาค่าอัตราการไหลจริง (Q_A) ผ่านฝายหยักแต่ละรูปแบบได้ ส่วนค่า h ที่วัดค่าได้ จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณอัตราการไหลในทางทฤษฎี (Q_T) โดยใช้สมการที่ (2) ต่อไป ภาพที่ 4 แสดงลักษณะการไหลของน้ำข้ามแบบจำลองฝายหยักที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้



ภาพที่ 3 แบบจำลองทางชลศาสตร์ของฝายหยักทั้ง 6 รูปแบบที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้



(ก) ภาพด้านข้างของการไหลของน้ำข้ามสันฝาย



(ข) การไหลกลับของน้ำข้ามสันฝายเมื่อสังเกตจากทางด้านท้ายน้ำ

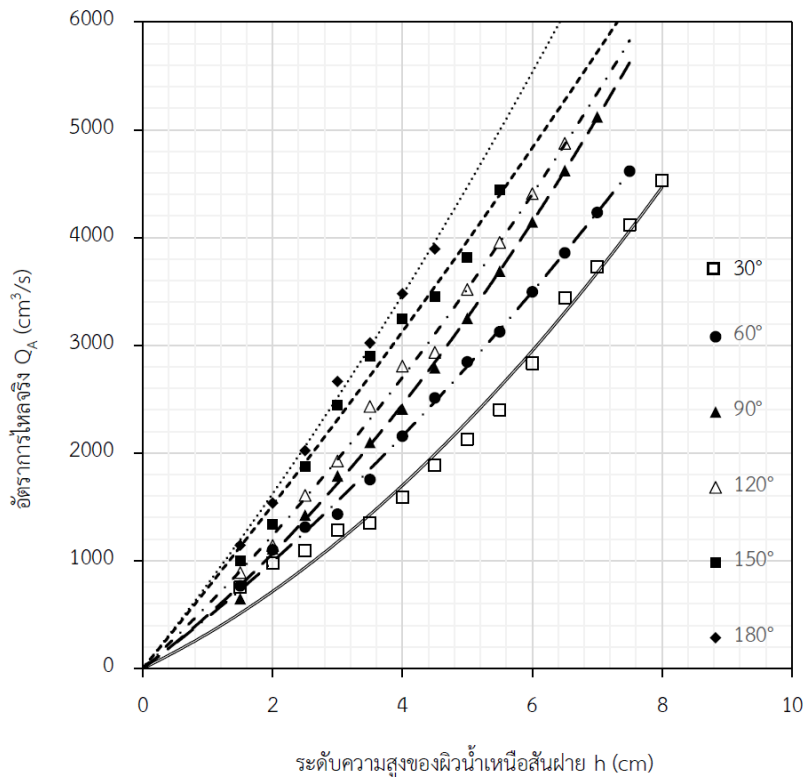
ภาพที่ 4 การไหลของน้ำผ่านแบบจำลองฝายสันคมที่มีลักษณะเป็นฝายหยักรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว

3. ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

ในการจำลองการไหลของน้ำที่แบบได้วิกฤต ให้ไหลเข้าสู่แบบจำลองฝายหยักที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ สามารถนำข้อมูลที่ได้ มาแสดงความสัมพันธ์กันเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมการไหลผ่านฝายหยักในแต่ละรูปแบบได้ ดังนี้

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลจริง (Q_A) ผ่านฝายและระดับความสูงของผิวน้ำเหนือสันฝาย (h)

จากการวัดค่าอัตราการไหลจริง (Q_A) ผ่านแบบจำลองฝายหยักทั้ง 6 รูปแบบที่ระดับความสูงของผิวน้ำเหนือสันฝาย (h) ในช่วง 1.5-8.0 cm สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลจริง (Q_A) ผ่านฝายหยักแต่ละรูปแบบและระดับความสูงของน้ำเหนือสันฝาย (h)

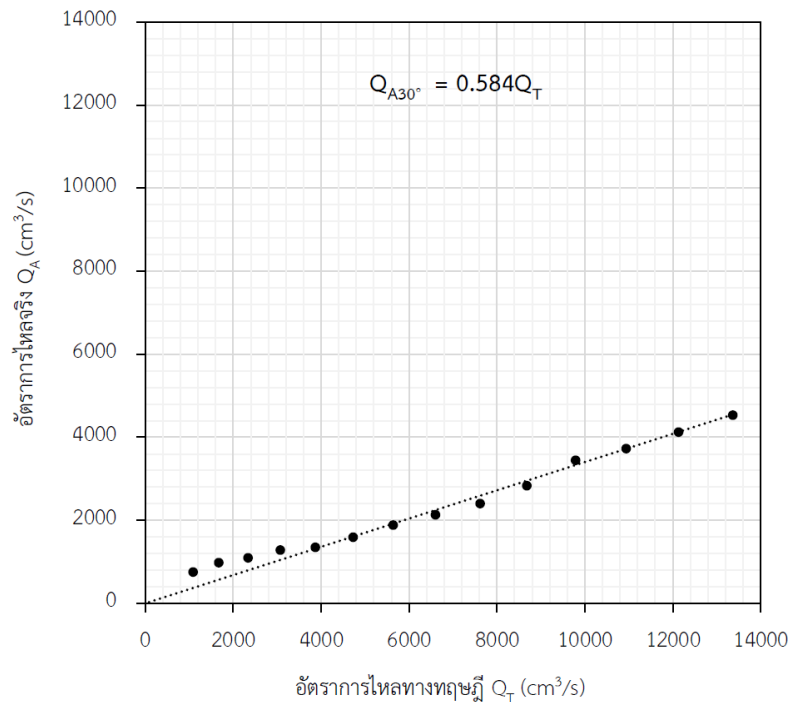
จากภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลจริง (Q_A) ผ่านฝายหยักแต่ละรูปแบบจะแปรผันโดยตรงกับระดับความสูงของผิวน้ำเหนือสันฝาย (h) ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการไหลผ่านฝายดังสมการที่ (2) กล่าวคือ สำหรับฝายหยักรูปแบบใดๆ ที่มี L และ θ คงที่ ค่า Q_A จะแปรผันโดยตรงกับ h

หากพิจารณาที่ระดับความสูงของผิวน้ำเหนือสันฝาย (h) ใดๆ จะพบว่า อัตราการไหลจริง (Q_A) ผ่านฝายจะแปรผันโดยตรงกับมุมที่สันฝายกระทำต่อกัน (θ) เนื่องจากความสามารถในการไหลของน้ำผ่านฝายหยักที่มีมุมระหว่างสันฝายมีขนาดเล็กจะมีค่าต่ำกว่าความสามารถในการไหลของน้ำผ่านฝายหยักที่มีมุมระหว่างสันฝายที่มีขนาดใหญ่กว่า

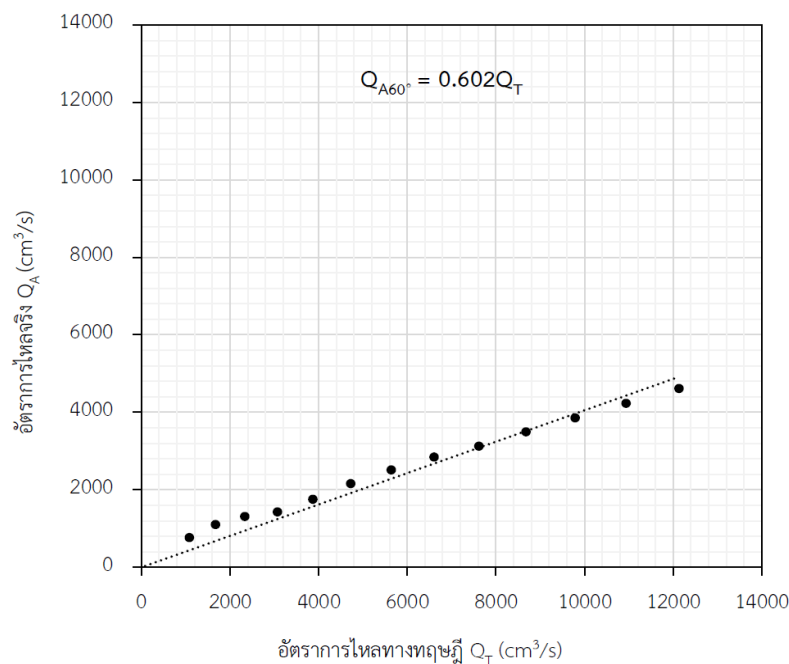
นอกจากนี้แล้วหากพิจารณาที่อัตราการไหลจริง (Q_A) ใดๆ ผ่านฝายจะพบว่าระดับความสูงของผิวน้ำเหนือสันฝาย (h) จะแปรผกผันกับมุมที่สันฝายกระทำต่อกัน (θ) เนื่องจากในการให้น้ำไหลผ่านฝายหยักที่มีมุมระหว่างสันฝายที่แคบย่อมจะมีผลทำให้พื้นที่ที่น้ำจะไหลเข้าชนกัน (Nappe Interference) ในบริเวณด้านท้ายน้ำของสันฝายมีขนาดมากกว่าฝายหยักที่มีมุมระหว่างสันฝายที่กว้างกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาโดย Crookston, B. M. et al. [2] และ Falvey, H. T. [4] ที่ได้ อธิบายไว้ว่า หากมุมระหว่างสันฝายมีค่าน้อยๆ จะทำให้เกิดการเบียดตัวและชนกันของแผ่นน้ำ (Nappe) ที่ไหลข้ามสันฝายในบริเวณมุมดังกล่าว ส่งผลให้การไหลของน้ำผ่านฝายเป็นไปอย่างยากลำบาก รวมทั้งเกิดการยกตัวของผิวน้ำด้านเหนือของฝายในระดับที่สูงกว่าฝายหยักที่มีมุมระหว่างสันฝายที่มีขนาดใหญ่กว่า

3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลผ่านฝายหยัก (C_R)

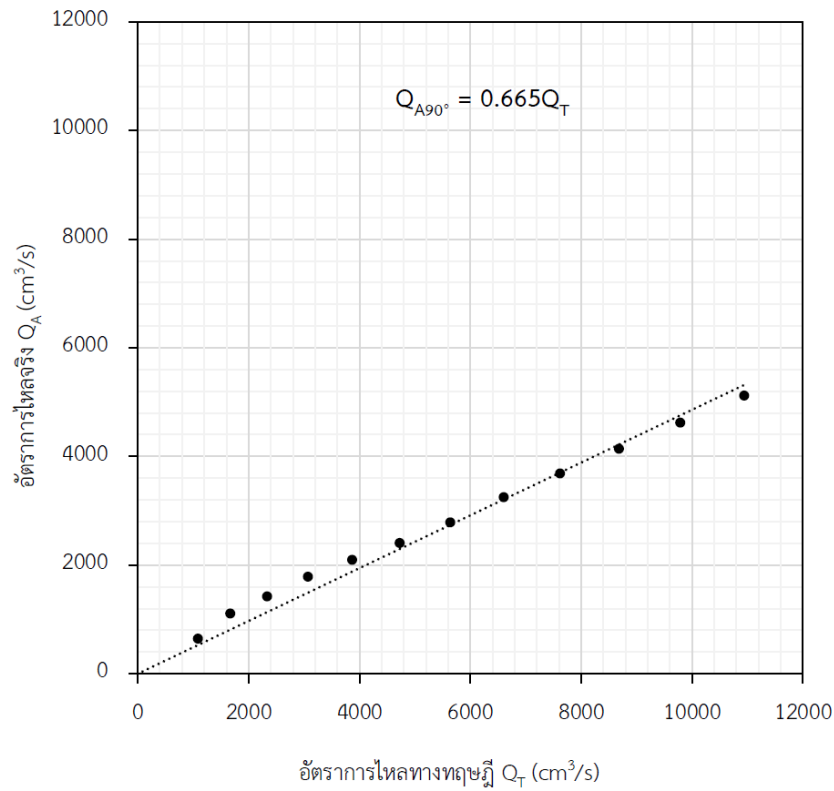
จากการเปรียบเทียบอัตราการไหลจริง (Q_A) ผ่านฝายหยักที่วัดค่าได้จากแบบจำลองทางชลศาสตร์และอัตราการไหลในทางทฤษฎี (Q_T) ผ่านฝายหยักแต่ละรูปแบบที่คำนวณได้จากสมการที่ (2) จะพบว่าอัตราการไหลจริงจะมีค่าน้อยกว่าอัตราการไหลในทางทฤษฎี ซึ่งหากนำค่าอัตราการไหลทั้งสองประเภทสำหรับฝายหยักแต่ละรูปแบบมาแสดงความสัมพันธ์กัน จะได้ผลดังภาพที่ 6 ถึงภาพที่ 11 ดังนี้



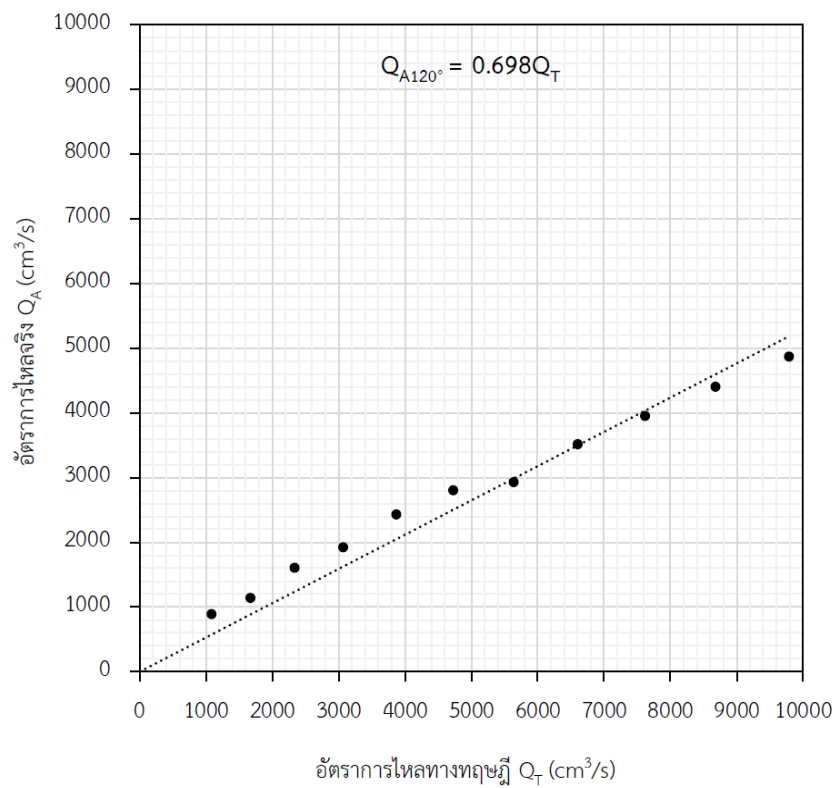
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลจริง (Q_A) และอัตราการไหลในทางทฤษฎี (Q_T) ผ่านฝายหยักที่มีมุม $\theta = 30^\circ$



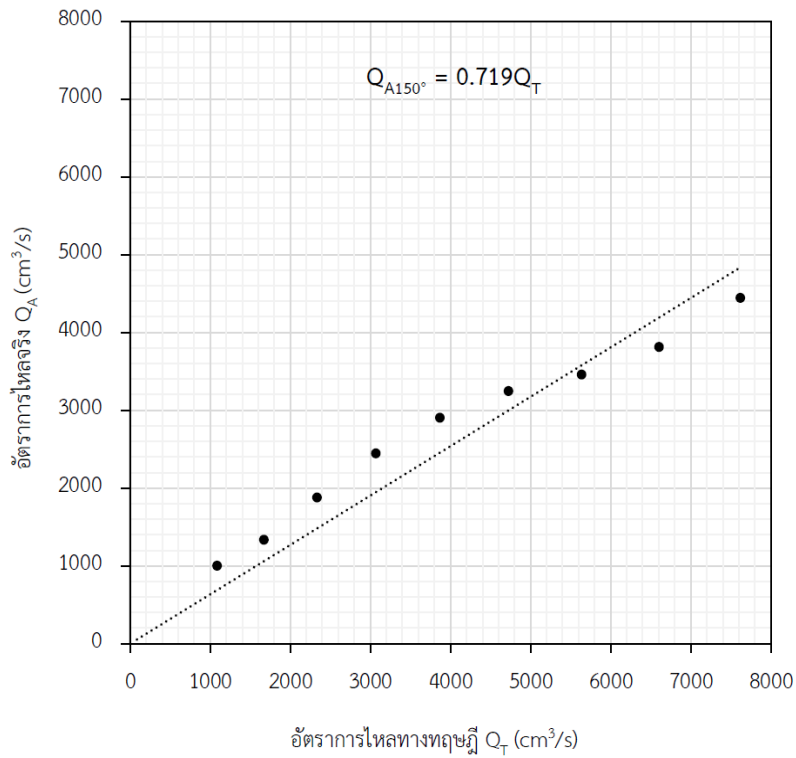
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลจริง (Q_A) และอัตราการไหลในทางทฤษฎี (Q_T) ผ่านฝายหยักที่มีมุม $\theta = 60^\circ$



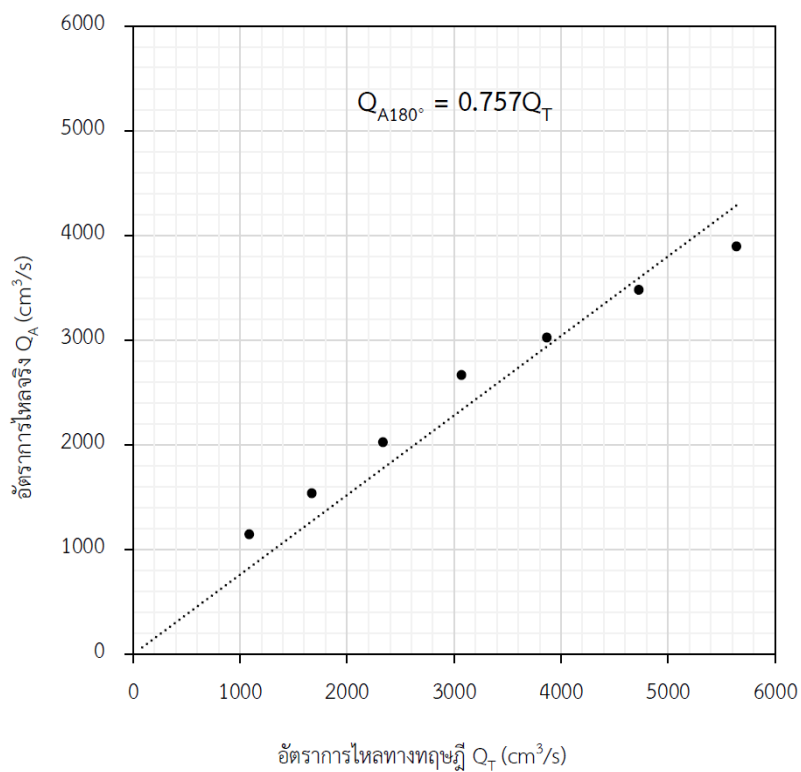
ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตจริง (Q_A) และอัตราการผลิตในทางทฤษฎี (Q_T) ผ่านฝ่ายหยักที่มีมุม $\theta = 90^\circ$



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตจริง (Q_A) และอัตราการผลิตในทางทฤษฎี (Q_T) ผ่านฝ่ายหยักที่มีมุม $\theta = 120^\circ$



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลจริง (Q_A) และอัตราการไหลในทางทฤษฎี (Q_T) ผ่านฝายหยักที่มีมุม $\theta = 150^\circ$



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลจริง (Q_A) และอัตราการไหลในทางทฤษฎี (Q_T) ผ่านฝายหยักที่มีมุม $\theta = 180^\circ$

จากภาพที่ 6 ถึงภาพที่ 11 จะพบว่าอัตราการไหลจริง (Q_A) และอัตราการไหลในทางทฤษฎี (Q_T) ผ่านฝายหยักจะมีแนวโน้มเป็นแบบเส้นตรงที่มีค่าความชัน (slope) น้อยกว่า 1.00 กล่าวคือ อัตราการไหลจริงผ่านฝายหยักจะมีค่าน้อยกว่าอัตราการไหลที่คำนวณได้ในทางทฤษฎี ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าแนวคิดในการหาอัตราการไหลในทางทฤษฎีผ่านฝายสันคมซึ่งใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาอัตราการไหลผ่านฝายหยัก ไม่ได้พิจารณาถึงการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นขณะที่มีการไหลผ่านสันฝาย นอกจากนี้จากผลการศึกษาของ Idress, A. K. และ Al-Ameri, R. [3] ซึ่งได้ทำการศึกษาทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะเชิงกลศาสตร์ของฝายหยัก โดยได้ข้อสรุปว่าสมการทั่วไปที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลผ่านฝายหยักไม่ได้พิจารณาถึงตัวแปรทั้งหมดที่จะมีผลต่อสมรรถนะของฝายหยัก ไม่ว่าจะเป็นลักษณะทางเรขาคณิตของรูปร่างฝาย สภาพการไหลของน้ำเข้าสู่ฝาย สภาพที่ตั้งของฝาย รวมทั้งอิทธิพลของขนาด (scale effect) ของฝาย ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอัตราการไหลทั้งสองแบบผ่านฝายหยัก จากความแตกต่างดังกล่าว จึงควรที่จะต้องหาค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลผ่านฝายหยัก (C_R) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอัตราการไหลจริงต่ออัตราการไหลในทางทฤษฎี โดยจะมีค่าสูงสุดไม่เกิน 1.00 สำหรับขนาดของค่า C_R ที่จะแปรผันโดยตรงกับระดับความใกล้เคียงระหว่างอัตราการไหลจริงกับอัตราการไหลในทางทฤษฎี นอกจากนี้แล้วยังสามารถนำค่า C_R ไปใช้ในการปรับแก้อัตราการไหลที่คำนวณได้ในทางทฤษฎีให้มีค่าใกล้เคียงกับอัตราการไหลจริง โดยสามารถหาค่าได้จากความชันของเส้นตรงในภาพที่ 6 ถึงภาพที่ 11 ซึ่งจะพบว่า $C_R = 0.584, 0.602, 0.665, 0.698, 0.719$ และ 0.757 สำหรับฝายหยักที่มีค่า $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ และ 180° ตามลำดับ

จากผลการศึกษาจะสังเกตเห็นได้ว่า C_R ของฝายหยักจะแปรผันโดยตรงกับมุม θ กล่าวคือ หากพิจารณาที่ระดับความสูงของผิวน้ำเหนือสันฝาย (h) เท่ากันจะพบว่า ฝายหยักที่มีมุมระหว่างสันฝายน้อยๆ จะมีความใกล้เคียงระหว่างอัตราการไหลจริงกับอัตราการไหลในทางทฤษฎีน้อยกว่าฝายหยักที่มีมุมระหว่างสันฝายที่กว้างกว่า ซึ่งเป็นผลกระทบจากการไหลเบียดกันและชนกันของแผ่นน้ำในขณะที่มีการไหลข้ามสันฝายและจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการไหลของน้ำผ่านฝาย โดยฝายหยักที่มีมุมระหว่างสันฝายน้อยๆ ย่อมจะมีผลทำให้เกิดการไหลเบียดกันและชนกันของแผ่นน้ำได้มากกว่าฝายหยักที่มีมุมระหว่างสันฝายที่มากกว่า ดังเช่นที่ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อ (3.1)

4. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในเปรียบเทียบอิทธิพลของรูปแบบการจัดวางแนวของฝายสันคมในทางน้ำเปิดหน้าตดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่จะผลต่ออัตราการไหลผ่านฝาย ซึ่งได้มีการสร้างแบบจำลองทางกลศาสตร์ประกอบการศึกษาโดยมีจัดวางแนวสันฝายให้มีรูปแปลนเป็นฝายหยักที่มี 1 วงรอบ (Cycle) ของรอยหยัก กล่าวคือ แปลนของสันฝายเป็นรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่มีส่วนยอด (Apex) หันไปทางด้านเหนือ น้ำ รูปแบบของฝายหยักขึ้นอยู่กับมุมภายในที่ส่วนยอดของสามเหลี่ยมหน้าจั่วซึ่งเป็นมุมระหว่างสันฝายที่กระทำต่อกัน ได้แก่ $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ และ 180° ในขณะที่ความสูงจากท้องน้ำถึงสันฝายและความยาวประสิทธิผลของสันฝายทุกรูปแบบจะมีค่าเท่ากัน คือ 20 cm. นอกจากนี้แล้วยังได้มีการพัฒนาสมการที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหลในทางทฤษฎีผ่านฝายหยักเพื่อใช้เปรียบเทียบกับอัตราการไหลที่วัดค่าได้จริงจากแบบจำลองทางกลศาสตร์ที่ จากการจำลองสภาพการไหลแบบไดนามิกเข้าสู่แบบจำลองฝายหยักสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้ คือ

อัตราการไหลจริงผ่านฝายหยักจะแปรผันโดยตรงกับระดับความสูงของผิวน้ำเหนือสันฝาย กล่าวคือ หากความยาวของสันฝายมีค่าคงที่ ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออัตราการไหลผ่านฝาย คือ ระดับความสูงของน้ำเหนือสันฝาย สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลจริงผ่านฝายหยักและมุมระหว่างสันฝายสามารถสรุปได้ว่า หากพิจารณาระดับความสูงของผิวน้ำเหนือสันฝายที่ระดับใดๆ อัตราการไหลจริงผ่านฝายหยักจะแปรผันโดยตรงกับมุมระหว่างสันฝาย เนื่องจากความสามารถในการไหลของน้ำผ่านฝายหยักจะแปรผันโดยตรงกับขนาดของมุมระหว่างสันฝาย ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงของผิวน้ำเหนือสันฝายกับมุมระหว่างสันฝายสามารถสรุปได้ว่า หากพิจารณาที่อัตราการไหลใดๆ ผ่านฝายหยักจะพบว่าระดับความสูงของผิวน้ำเหนือสันฝายจะแปรผันกับขนาดของมุมระหว่างสันฝาย กล่าวคือจากข้อสรุปก่อนหน้านี้นี้ที่กล่าวว่า

ความสามารถในการไหลของน้ำผ่านฝายหยักจะแปรผันโดยตรงกับขนาดของมุมระหว่างสันฝาย ดังนั้นเพื่อให้ให้น้ำสามารถไหลผ่านฝายหยักได้ด้วยอัตราการไหลที่เท่ากัน ฝายหยักที่มีมุมระหว่างสันฝายน้อยจะต้องการพลังงานการไหลทางด้านเหนือ น้ำสูงกว่าฝายหยักที่มีมุมระหว่างสันฝายมากกว่า นอกจากนี้ในการเปรียบเทียบอัตราการไหลจริงและอัตราการไหลในทางทฤษฎีผ่านฝายหยักแต่ละรูปแบบสามารถสรุปได้ว่า อัตราการไหลจริงจะมีค่าน้อยกว่าอัตราการไหลที่คำนวณได้ในทางทฤษฎี เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหลในทางทฤษฎีไม่ได้พิจารณาถึงการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นขณะที่มีการไหลผ่านสันฝายรวมทั้งตัวแปรต่าง ๆ ที่จะมีผลต่อสมรรถนะในการไหลของน้ำผ่านฝาย สำหรับค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลผ่านฝายหยักที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้จะแปรผันโดยตรงกับมุมระหว่างสันฝาย โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 0.8

จากผลการศึกษาทั้งหมดจะพบว่า สามารถนำหลักการของฝายหยักไปใช้ในการเพิ่มความสามารถในการระบายน้ำของอาคารระบายน้ำล้น โดยฝายหยักที่มีรูปแปลนของสันฝายเป็นรูปสามเหลี่ยมก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในเพิ่มความสามารถในการระบายน้ำ แต่ควรจะต้องให้ความสำคัญกับการความยาวประสิทธิผลของสันฝายที่ต้องการ เนื่องจากความยาวประสิทธิผลของฝายหยักจะแปรผันกับจำนวนรอบของรอยหยัก กล่าวคือ หากฝายหยักมีจำนวนรอบของรอยหยักที่มากเกินไปจะทำให้มุมระหว่างสันฝายมีค่าน้อยลงตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการไหลของน้ำผ่านฝายหรืออัตราการไหลผ่านฝาย และจากการนำผลการศึกษาในครั้งนี้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยเกี่ยวกับฝายหยักหลายๆ งานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลผ่านฝายหยักที่เหมาะสมควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.6 และมุมระหว่างสันฝายไม่ควรจะน้อยกว่า 45°

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Karaeren, D. (2014). *Comparison of Linear, Labyrinth and Piano Key Weirs to Increase the Discharge Capacity of Existing Spillways for a Given Head*. Middle East Technical University.
- [2] Crookston, B. M. & Tullis, B. P. (2018) *Labyrinth Weirs: Nappe Interference and Local Submergence*. J. Irrig.
- [3] Idress, A. K. & Al-Ameri, R. (2022). *A Review of Hydraulic Performance and Design Methods of Labyrinth Weirs*. Water Supp.
- [4] Falvey, H. T. (2003). *Hydraulic Design of Labyrinth Weirs*. ASCE Press (American Society of Civil Engineers)
- [5] Paxson, G., Campbell, D. & Monroe, J. (2011). *Evolving Design Approaches and Considerations for Labyrinth Spillways*. U.S. Society on Dams.
- [6] Gupta, K. K., Kumar, S. & Kumar, K. (2013). *Flow Characteristics of Sharp-Crested Triangular Planform Contracted Weirs*. International Journal of Engineering Research & Technology.
- [7] Gupta, K. K., Kumar, S. & Ahmad, Z. (2014). *Flow Characteristics of Sharp-Crested W-Planform Weirs*. International Journal of Engineering Research & Technology.
- [8] Gupta, K. K., Kumar, S. & Ahmad, Z. (2014). *Effect of Weir height on Flow Performance of Sharp-Crested Rectangular Planform Weir*. World Applied Sciences Journal.
- [9] Bahrebar, A. Azarpayvand, H., Asl, Momni Asl. M. & Barati, F. (2016). *Laboratory Investigation of the Effect of a New Labyrinth with Different Length and Width in the Wing Length of Triangular-Shaped Labyrinth Weir*. International Journal of Advanced Biotechnology and Research.
- [10] Pramote Ponpananavi. (2011). *Principles of Water Volume Calculation of Flowing Through the Irrigation Structures*. Regional Irrigation Office 8. (In Thai).