

## การศึกษาและวิเคราะห์ประตูระบายน้ำบ้านโปรงตาเพชร จ.เพชรบุรี

### Study and Analysis of Baanprongtapetch Regulator in Phetchaburi Province, Thailand

ธนพล แสงอินทร์<sup>1,\*</sup> นกตล พักขาว<sup>2</sup> ปพิชญา หนูนารถ<sup>3</sup> ธวัชชัย เปาทัย<sup>4</sup> รส สุสัทธการ<sup>5</sup> และ วัชราน रणนง<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> วิทยาลัยการชลประทาน สถาบันสมทบมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.นนทบุรี

<sup>6</sup> วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ กรมชลประทาน

\*Corresponding author; E-mail address: [poom2604@gmail.com](mailto:poom2604@gmail.com)

#### บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์มิติรูปร่างของประตูระบายน้ำทางด้านชลศาสตร์ โดยนำพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณหรือ Computational Fluid Dynamics (CFD) มาใช้ทำแบบจำลองเชิงคำนวณ (Numerical model) ของประตูระบายน้ำที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบขึ้นในรูปแบบสามมิติ รวมถึงศึกษาและเปรียบเทียบการวิเคราะห์การไหลซึมผ่านได้ฐานราก (Seepage) และแรงดันน้ำยกขึ้นใต้พื้นอาคาร (Uplift pressure) ซึ่งประกอบไปด้วย ทฤษฎี Weighted creep ของ Lane และทฤษฎีตาข่ายการไหลของน้ำในดิน (Flow nets) พร้อมเปรียบเทียบผลวิเคราะห์กับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยในการออกแบบมิติรูปร่างหัวงานประตูระบายน้ำในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบตามข้อมูล Boring log ที่มีการทำ Permeability test ด้วย และข้อมูล Topography survey ของพื้นที่บริเวณบ้านโปรงตาเพชร จ.เพชรบุรี

งานวิจัยนี้ได้ผลการศึกษาด้านชลศาสตร์ที่สำคัญคือ ผลแบบจำลองน้ำกระโดด (Hydraulic jump) ให้ค่าความลึกก่อนเกิดน้ำกระโดด ( $y_2$ ) และค่าความลึกหลังเกิดน้ำกระโดด ( $y_3$ ) มีความใกล้เคียงกับผลคำนวณจากสมการพลังงานและสมการวิเคราะห์ Hydraulic jump

ประสิทธิภาพในการสลายพลังงานการไหลของอาคารสลายพลังงาน (Stilling basin) แบบ USBR Stilling Basin Type III ที่ผู้วิจัยได้เลือกใช้ออกแบบและนำมาใช้กับประตูระบายน้ำ จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อระยะเปิดบานระบายน้อย และประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อระยะเปิดบานระบายมากขึ้น และการปรับระยะการวาง Baffle pier ให้ห่างจาก Chute block มากขึ้นจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานที่มากขึ้น โดยระยะห่างระหว่าง Baffle pier และ Chute block ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 3 เท่าของระยะห่างตามข้อเสนอแนะของ USBR

สำหรับการศึกษาด้านวิศวกรรมปฐพีได้ผลการศึกษาที่สำคัญคือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความซึมได้ของดิน (Coefficient of Permeability) มีค่าสูง จะส่งผลให้ Seepage มีทิศทางการไหลซึมข้ามกำแพงที่น้ำ (Cutoff wall) ต่างจากทฤษฎี Weighted creep ของ Lane ที่กำหนดให้ Seepage มีการไหลซึมตามแนวเส้นสัมผัสใต้พื้นอาคารเท่านั้น

ค่า Uplift pressure จากทฤษฎี Flow nets และจากผลวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มีความใกล้เคียงกัน แต่มีค่า Uplift pressure ที่

สูงกว่าจากทฤษฎี Weighted creep ของ Lane ซึ่งส่งผลต่อการออกแบบความหนาของพื้นอาคาร โดยทั่วไปตามมาตรฐานกรมชลประทานจะใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในการออกแบบอยู่ที่ 1.30 แต่สำหรับผลสำรวจดินจาก Boring log ในพื้นที่หัวงานประตูระบายน้ำบ้านโปรงตาเพชร ซึ่งเป็นดินประเภทดินทรายมีตะกอนทรายปน (SM) ได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยอยู่ที่ 1.50 และมีระยะระหว่าง Cutoff wall อยู่ที่ 9 เมตรขึ้นไป

คำสำคัญ: Computational Fluid Dynamics, CFD, USBR, Seepage, Uplift Pressure, Permeability, Flow nets, Baffle pier, Chute block, ประตูระบายน้ำ, อาคารสลายพลังงาน, น้ำกระโดด

#### Abstract

This study investigates and analyzes the hydraulic characteristics of a regulator structure through the application of Computational Fluid Dynamics (CFD), developing a three-dimensional numerical model of a regulator specifically designed by the researcher. The research further examines and compares seepage beneath the foundation and uplift pressure under the structure, utilizing Lane's Weighted Creep Theory and flow net analysis, with validation through finite element analysis. The design of the regulator headworks was based on site-specific data, including permeability tests from boring logs and topographic surveys conducted at Ban Prong Ta Phet, Phetchaburi Province, Thailand.

Key findings from the hydraulic analysis reveal that the simulated hydraulic jump characteristics, including the pre-jump ( $y_2$ ) and post-jump ( $y_3$ ) depths, closely correspond to those predicted by the energy equation and hydraulic jump theory. The energy dissipation performance of the USBR Type III stilling basin, employed in the regulator design, is highest at smaller gate openings and decreases as the gate opening increases. Additionally, increasing the distance between the baffle piers and the chute blocks enhances the energy dissipation efficiency, with

the optimum spacing identified as three times the standard USBR recommendation.

From the geotechnical perspective, the study indicates that a high soil permeability coefficient results in seepage trajectories that cross the cutoff wall, deviating from the assumptions of Lane's Weighted Creep Theory, which presumes seepage follows the underside of the foundation structure. Uplift pressures obtained from flow net analysis and finite element simulations are consistent but are generally higher than those estimated by Lane's theory, impacting the design of the base slab thickness. Although the Royal Irrigation Department (RID) standard design practice assumes a safety factor of 1.30, site-specific soil conditions at Ban Prong Ta Phet, classified as silty sand (SM), support a higher safety factor of 1.50 with a minimum cutoff wall spacing of 9 meters.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, CFD, USBR, Seepage, Uplift Pressure, Permeability, Flow Nets, Baffle Pier, Chute Block, Regulator, Stilling Basin, Hydraulic Jump

## 1. คำนำ

ประตูระบายน้ำเป็นอาคารทางชลศาสตร์ชนิดหนึ่ง มีหน้าที่ในการควบคุมปริมาณน้ำ จัดการการไหล ลดความเสี่ยงในการเกิดน้ำท่วม และกักเก็บน้ำเพื่อใช้ในฤดูแล้งอย่างมีประสิทธิภาพ ประตูระบายน้ำจึงมีบทบาทสำคัญในการแก้ไขปัญหาที่พบบ่อยที่เกิดขึ้นในช่วงฤดูฝน รวมถึงปัญหาความขาดแคลนน้ำในช่วงฤดูแล้งด้วย

ในการออกแบบมิติและรูปร่างของประตูระบายน้ำมีแนวทางในการออกแบบตามมาตรฐานกรมชลประทาน ซึ่งได้อ้างอิงมาตรฐานจากสำนักงานปฏิรูปที่ดินแห่งสหรัฐอเมริกา (United States Department of The Interior Bureau of Reclamation : USBR) ซึ่งจำเป็นต้องใช้ทฤษฎีทางด้านวิศวกรรมชลศาสตร์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านอาคาร และกำหนดมิติรูปร่างของอาคาร อีกทั้งยังจำเป็นต้องใช้ทฤษฎีทางวิศวกรรมปฐพีเพื่อวิเคราะห์ Seepage และ Uplift pressure เพื่อใช้ในการออกแบบความยาวและความหนาของพื้นอาคาร

ในปัจจุบันการวิเคราะห์การไหลผ่านอาคารทางชลศาสตร์ สามารถวิเคราะห์ได้ด้วย Computational Fluid Dynamics (CFD) ผู้วิจัยจึงมีความประสงค์ในการนำ CFD มาใช้ทำแบบจำลอง Numerical model กับประตูระบายน้ำที่ออกแบบขึ้น เพื่อใช้ศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านหัวงานประตูระบายน้ำ

การวิเคราะห์ Seepage และ Uplift Pressure เพื่อกำหนดมิติและรูปร่างของพื้นอาคารทางชลศาสตร์ มักนิยมใช้ทฤษฎี Weighted Creep ของ Lane เนื่องจากสะดวกต่อการคำนวณออกแบบมิติรูปร่างมากกว่าการใช้ทฤษฎี Flow nets แต่การใช้ทฤษฎี Weighted creep ของ Lane จะสามารถใช้งานได้ดีสำหรับดินฐานรากทั่วไป ทว่าในพื้นที่ที่ตั้งประตูระบาย

น้ำบ้านโปรงตาเพชร จากผลการทดสอบ Boring log และ Permeability test พบว่า ค่า Coefficient of Permeability (k) มีค่าสูง

ผู้วิจัยจึงเกิดข้อสงสัยขึ้นจากผล Boring log ดังกล่าวไว้ว่า Seepage และ Uplift pressure จะเป็นไปตามทฤษฎี Weighted creep ของ Lane หรือไม่ โดยใช้ทฤษฎี Flow nets และผลวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อใช้เทียบผลวิเคราะห์จากทฤษฎี Weighted creep ของ Lane

ผู้วิจัยมุ่งหวังให้งานวิจัยนี้เป็นจุดเริ่มต้นของแนวทางพัฒนามาตรฐานในการออกแบบมิติรูปร่างประตูระบายน้ำทั้งในด้านวิศวกรรมชลศาสตร์และวิศวกรรมปฐพี ให้แก่ผู้ที่สนใจศึกษาและวิจัยในด้านนี้ต่อไป

## 2. ขอบเขตการศึกษา

การออกแบบมิติและรูปร่างของประตูระบายน้ำ จะออกแบบโดยใช้ทฤษฎีทางวิศวกรรมชลศาสตร์และวิศวกรรมปฐพี ซึ่งกำหนดให้ประเภทของบานระบายเป็นบานระบายชนิดตรง (Sluice Gate) เป็นอาคารตั้งอยู่บนฐานรากตื้น มีอัตราการไหลเข้าหัวงานอยู่ที่ 1,000 cms และมีดินใต้ฐานรากเป็นดินชนิดทรายมีตะกอนทรายปน (SM) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดินในแนวราบอยู่ที่  $8.63 \times 10^{-5}$  m/s และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดินในแนวตั้งอยู่ที่  $6.99 \times 10^{-5}$  m/s ซึ่งข้อมูลสำหรับการออกแบบดังกล่าว มาจากข้อมูลการสำรวจภูมิประเทศแบบ Topography survey และข้อมูลผล Boring log ที่มีการทำ Permeability test ของชั้นดินในบริเวณที่ตั้งหัวงานประตูระบายน้ำบ้านโปรงตาเพชร อำเภอแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี ที่ดำเนินการสำรวจโดยกรมชลประทานในปีพ.ศ. 2566-2567

## 3. ทฤษฎีทางวิศวกรรมชลศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

### 3.1 สมการพลังงาน (Energy Equation)

สมการพลังงานเป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับงานที่ต้องการหาความดัน ความเร็ว ระดับความลึก และการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหล มักจะใช้คู่กับสมการการไหลต่อเนื่องเพื่อใช้ในการหาอัตราการไหล ความเร็ว หน้าตัดการไหลและความลึกของการไหล ดังสมการที่ (1) [5]

$$z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = C \quad (1)$$

โดยที่ $z$	คือ หัวศักดา (Potential head), m
$\frac{P}{\gamma}$	คือ หัวความดัน (Pressure head), m
$\frac{V^2}{2g}$	คือ หัวความเร็ว (Velocity head), m

### 3.2 การแบ่งสภาวะการไหลด้วย Froude Number

Froude Number เป็นค่าที่ใช้ในการแบ่งสภาวะการไหลของของเหลว ซึ่งเป็นค่าที่สำคัญในการพิจารณาในการวิเคราะห์หาความลึกหลังเกิดน้ำกระโดดและเลือกออกแบบอาคารสลายพลังงาน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) [5]

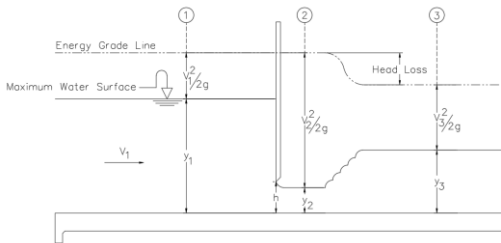
$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad (2)$$

โดยที่  $F_r$  คือ Froude Number  
 $V$  คือ ความเร็วการไหล, m  
 $g$  คือ ค่าความเร่งโน้มถ่วงของโลก, m/s<sup>2</sup>  
 $y$  คือ ความลึกของน้ำ ณ ตำแหน่งที่พิจารณา, m

สำหรับค่า  $F_r = 1$  จะเป็นการไหลวิกฤต (Critical Flow)  
 สำหรับค่า  $F_r > 1$  จะเป็นการไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Flow)  
 สำหรับค่า  $F_r < 1$  จะเป็นการไหลใต้วิกฤต (Subcritical Flow)

### 3.3 การวิเคราะห์น้ำกระโดด (Hydraulic Jump)

เป็นปรากฏการณ์ของการไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Flow) เปลี่ยนสถานะไปสู่การไหลใต้วิกฤต (Subcritical Flow) หรือเป็นปรากฏการณ์ที่ของไหลที่มีความลึกน้อยแต่มีความเร็วมากไปสู่สภาวะที่มีความลึกมากแต่ความเร็วช้า มักจะเกิดขึ้นบริเวณท้ายฝายน้ำล้น ท่อลอด และประตูน้ำแบบไหลลอดทั้งประตูบานตรงและประตูบานโค้ง สมการในการวิเคราะห์จะใช้ดังสมการที่ (3) [5]



รูปที่ 1 ตำแหน่งในการวิเคราะห์น้ำกระโดด

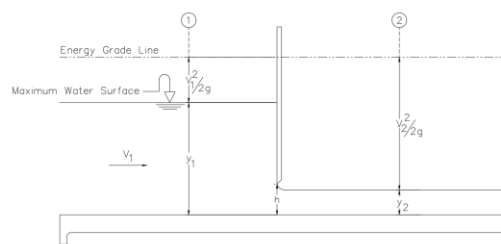
$$y_3 = \frac{1}{2} y_2 (\sqrt{1 + 8F_2^2} - 1) \quad (3)$$

โดยที่  $y_3$  คือ ความลึกของน้ำหลังเกิดน้ำกระโดด, m  
 $y_2$  คือ ความลึกของน้ำก่อนเกิดน้ำกระโดด, m  
 $F_2$  คือ Froude Number ตำแหน่งก่อนเกิดน้ำกระโดด

จากรูปที่ 1 เป็นการอธิบายตำแหน่งของตัวแปรต่างๆ ในการวิเคราะห์ Hydraulic jump โดยที่ตัวแปร  $y_2$  จะได้จากการคำนวณด้วยสมการพลังงาน ดังสมการที่ (1)

### 3.4 การวิเคราะห์อัตราการไหลผ่านบานระบายชนิดบานตรง

#### 3.4.1 กรณีเป็นการไหลแบบอิสระ (Free Flow)



รูปที่ 2 กรณีเป็นการไหลแบบอิสระ (Free Flow)

จากรูปที่ 2 เป็นลักษณะการไหลลอดผ่านบานระบายในกรณีที่เป็นการไหลแบบอิสระ จะสังเกตได้จากความลึก  $y_2$  จะมีค่าที่น้อยกว่าระยะเปิดบาน ( $h$ ) เล็กน้อย และพลังงานการไหลด้าน Downstream ในกรณีนี้ จะมีค่าเท่ากับพลังงานการไหลด้าน Upstream การวิเคราะห์การไหลลอดผ่านประตูระบายน้ำกรณีเป็นการไหลแบบอิสระจะใช้สมการที่ (4) [5]

$$Q = C_d h L \sqrt{2gy_1} \quad (4)$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การไหลของน้ำผ่านบานระบายกรณีเป็นการไหลแบบอิสระ Swamee ได้เสนอสมการที่ได้จากความสัมพันธ์ของกราฟของ H.R. Henry ดังสมการที่ (5)

$$C_d = 0.611 \left( \frac{y_1 - h}{y_1 + 15h} \right)^{0.072} \quad (5)$$

โดยที่  $Q$  คือ อัตราการไหลลอดผ่านบานระบาย, cms  
 $C_d$  คือ สัมประสิทธิ์การไหลของน้ำผ่านบานระบาย  
 $h$  คือ ความสูงของช่องเปิดบาน, m  
 $L$  คือ ความกว้างของช่องการไหล, m  
 $g$  คือ ค่าความเร่งโน้มถ่วงของโลก, m/s<sup>2</sup>  
 $y_1$  คือ ความลึกของน้ำหน้าบานระบาย, m  
 $y_2$  คือ ความลึกของน้ำหลังลอดผ่านบานระบาย, m

### 3.5 สมการของ Manning

คำนวณโดยวิธีการ Slope-Area Method เป็นวิธีการคำนวณการไหลในทางน้ำเปิด จากความสัมพันธ์ลาดของผิวน้ำกับพื้นที่หน้าตัดของการไหลเฉลี่ย ดังสมการที่ (12) [5]

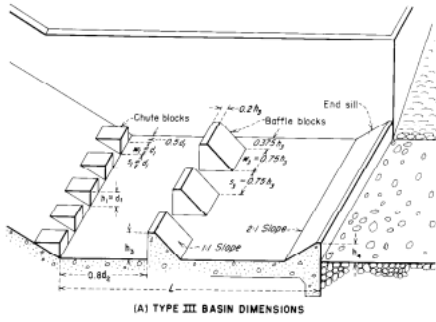
$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

โดยที่  $V$  คือ ความเร็วการไหลเฉลี่ยหน้าตัดการไหล, m/s  
 $n$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning  
 $R$  คือ รัศมีชลศาสตร์ของหน้าตัดการไหล, m  
 $S$  คือ ความลาดท้องคลองตามแนวยาวศูนย์กลางคลอง

ค่ารัศมีชลศาสตร์ของหน้าตัดการไหลสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดการไหลกับเส้นขอบเปียก สมการของ Manning ใช้ในการคำนวณออกแบบมิติรูปร่างหน้าตัดของคลองชักน้ำเข้าห้วงงานและคลองชักน้ำออกจากห้วงงาน ซึ่งมีความสำคัญในการคำนวณพิจารณากำหนดระดับพื้นอาคารสลายพลังงาน เพื่อให้หน้าทางด้านท้ายสามารถคุมน้ำกระโดดได้

### 3.6 อาคารสลายพลังงานแบบ USBR Stilling Basin Type III

อาคารสลายพลังงานประเภทนี้ไม่ยาวมากเหมาะสำหรับอาคารในคลองชลประทานทั่วไปและทางระบายน้ำล้นขนาดเล็กที่มีความเร็วก่อนเข้าอาคารสลายพลังงานไม่เกิน 15.5 m/s (50 ft/s) และมีค่า Froude Number มากกว่า 4.50 โดยจะมีการติดตั้งชิ้นส่วนพิเศษ Chute blocks, Baffle blocks (หรือ Baffle piers) และ End Sill



รูปที่ 3 อาคารสลายพลังงานแบบ USBR Stilling Basin Type III [3]

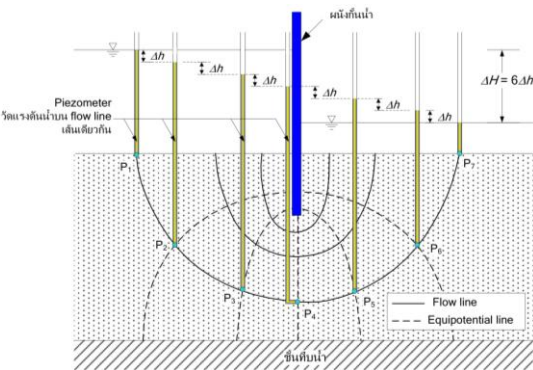
ผู้วิจัยได้เลือกใช้ USBR Stilling Basin Type III เนื่องจากมีความเหมาะสมที่สุดจากการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านประตูระบายน้ำด้วยทฤษฎีที่ได้กล่าวมาในหัวข้ออื่นๆก่อนหน้านี้

#### 4. ทฤษฎีทางวิศวกรรมปฐพีที่เกี่ยวข้อง

##### 4.1 การใช้ความลึกและความหนากำแพงที่น้ำ (Cutoff wall)

กำแพงที่น้ำควรต้องมีอย่างน้อย 2 ตำแหน่ง คือ ต้นทางของพื้นด้านเหนือน้ำและด้านปลายของพื้นท้ายน้ำ เพื่อป้องกันการเกิดพัดพาเม็ดดินใต้ฐานรากออกไป (Piping) โดยตามมาตรฐานกรมชลประทานจะกำหนดใช้ความลึกและความหนาของกำแพงที่น้ำไว้ดังตารางที่ 3 โดยที่กำแพง 2 แห่งที่อยู่ใกล้กัน และกำหนดให้มีระยะห่างไม่น้อยกว่า 2 เท่าของความลึกกำแพงตัวที่ลึกกว่าหรือเข็มพืด (Sheet pile) [6]

##### 4.2 ตาข่ายการไหล (Flow nets)



รูปที่ 4 ลักษณะการวาด Flow nets [4]

ทฤษฎี Flow nets ถูกคิดค้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึมผ่านได้ฐานรากและแรงดันยกขึ้นของน้ำ ประกอบไปด้วยเส้นการไหล (Flow lines) ที่จะแสดงทางการไหลของน้ำ และเส้นที่มีแรงดันระดับบนเส้นการไหลเท่ากัน (Equipotential lines) โดยทั้ง 2 เส้นนี้จะทำมุมตั้งฉากซึ่งกันและกัน ประกอบกันเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยประมาณ ดังรูปที่ 4 ในการคำนวณหาการไหลซึมผ่านได้ฐานรากแต่ละ Equipotential drop คำนวณได้โดยใช้สมการที่ (6)

$$\Delta q = k \frac{H}{N_d} \quad (7)$$

การคำนวณหาแรงดันยกขึ้นของน้ำโดยใช้ทฤษฎี Flow nets คำนวณได้โดยใช้สมการที่ (7)

$$UP = \gamma_w [H - (\frac{n}{N_d} \times H) + t] \quad (8)$$

การตรวจสอบอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเกิดพัดพาเม็ดดินออกจากรูฐานรากสามารถทำได้โดยใช้สมการที่ (8)

$$F.S. = \frac{i_c}{i_{ab}} \quad (9)$$

- โดยที่  $\Delta q$  คือ ค่าการไหลซึมแต่ละ Potential drop, m/s/m
- $k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดิน, m/s
- $UP$  คือ แรงดันยกขึ้นของน้ำ, t/m<sup>2</sup>
- $H$  คือ ระดับน้ำด้านหน้า - ระดับน้ำด้านท้าย, m
- $N_d$  คือ จำนวนช่อง Equipotential drop ทั้งหมด
- $n$  คือ จำนวนช่อง Equipotential drop จากจุดเริ่มต้นการไหลจนถึงจุดที่พิจารณา
- $t$  คือ ความหนาของพื้นอาคาร, m
- $\gamma_w$  คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำเท่ากับ 1 t/m<sup>3</sup>
- $F.S.$  คือ อัตราส่วนความปลอดภัยต้องไม่น้อยกว่า 1
- $i_c$  คือ วิกฤตความชันทางชลศาสตร์
- $i_{ab}$  คือ ความชันทางชลศาสตร์

##### 4.3 ทฤษฎี Weighted creep ของ Lane

เป็นทฤษฎีว่าด้วย Seepage จะมีลักษณะเป็นการไหลตามผิวสัมผัสระหว่างอาคารกับดินฐานราก ซึ่งจะเท่ากับผลรวมระยะทางน้ำซึมแนวตั้งที่ต้องมีมุมชันมากกว่า 45 องศา กับ 1/3 ของระยะทางในแนวนอน ที่ต้องมีมุมราบกว่า 45 องศา การตรวจสอบความปลอดภัยจากการเกิดพัดพาเม็ดดินออกจากรูฐานรากจะต้องมีผลรวมระยะทางน้ำซึมมากกว่าค่าระยะทางน้ำซึมที่ต้องการ โดยใช้สมการที่ (9)

$$C_w = \frac{L_w}{H} \quad (10)$$

และการวิเคราะห์แรงดันยกขึ้นของน้ำโดยวิธีอัตราส่วน (Ratio Method) จะใช้สมการที่ (10) ในการวิเคราะห์

$$UP = (UE - EI - D)\gamma_w \quad (11)$$

โดยทั่วไปการกำหนดความยาวและความหนาของพื้นอาคารจะใช้ทฤษฎี Weighted creep ratio ของ Lane เนื่องจากมีความสะดวกต่อการคำนวณมากกว่าการเขียน Flow nets ซึ่งในการคำนวณออกแบบความหนาของพื้นอาคารจะใช้สมการที่ (11) ในการคำนวณ

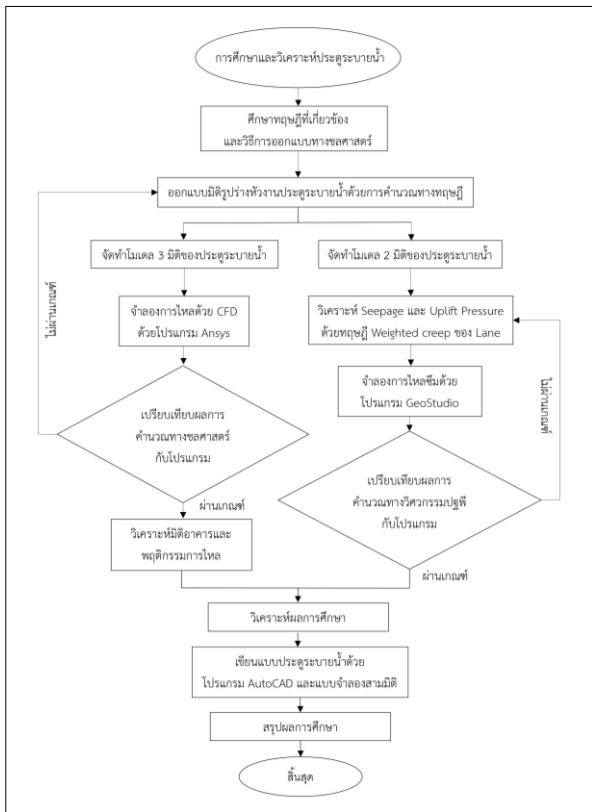
$$t = \frac{UP - D}{\gamma_{Concrete}} \times F.S. \quad (12)$$

- โดยที่  $C_w$  คือ Weighted creep ratio
- $L_w$  คือ ผลรวมของระยะทางน้ำซึม, m
- $H$  คือ ระดับน้ำด้านหน้า - ระดับน้ำด้านท้าย, m
- $UP$  คือ แรงดันยกขึ้นของน้ำ, t/m<sup>2</sup>
- $UE$  คือ Uplift elevation มีค่าเท่ากับ  $H - Loss$ , m

- Loss** คือ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างผลรวมระยะทางน้ำขึ้น ณ จุดที่พิจารณาและผลรวมทางน้ำขึ้นทั้งหมดคูณด้วย  $H$ , m
- El** คือ ระดับพื้นอาคารหักออกด้วยความหนาของพื้น ณ จุดที่พิจารณา, m
- D** คือ ความลึกของน้ำด้านท้าย, m
- $\gamma_w$  คือ หนักรน้ำหนักของน้ำเท่ากับ  $1 \text{ t/m}^3$
- $\gamma_{\text{Concrete}}$  คือ หนักรน้ำหนักของคอนกรีตเท่ากับ  $2.4 \text{ t/m}^3$
- F.S.** คือ อัตราส่วนความปลอดภัยต้องไม่น้อยกว่า 1.30 ตามมาตรฐานกรมชลประทาน

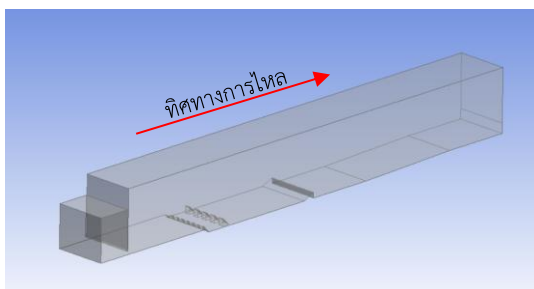
### 5. ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยสรุปขั้นตอนดำเนินงานวิจัยในรูปแบบของ Flow chart ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 Flow chart

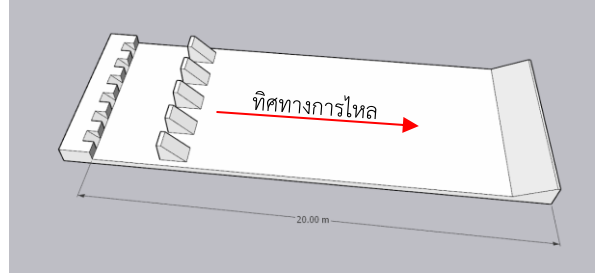
### 6. โมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล



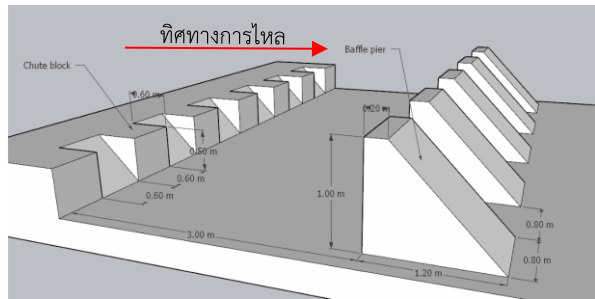
รูปที่ 6 โมเดลจำลองการไหลกรณี 1 ช่องบานระบาย

รูปที่ 6 เป็นโมเดลจำลองการไหลกรณี 1 ช่องบานระบาย โดยมีช่องบานระบายกว้าง 8 เมตร และควบคุมความลึกน้ำหน้าบานระบายอยู่ 6.50 เมตร เสมอ สำหรับทางด้าน Downstream มี USBR Stilling Basin Type III ซึ่งผู้วิจัยได้วิเคราะห์พฤติกรรมการไหลและเลือกออกแบบเป็น Stilling Basin ประเภทนี้ โดยจะแสดงมิติรูปร่างของ USBR Stilling Basin Type III ดังรูปที่ 7 และ 9

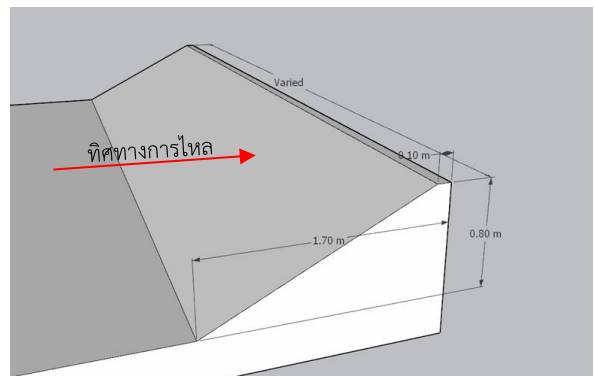
โมเดลจำลองการไหลกรณี 1 ช่องบานระบาย จะใช้จำลองการเกิด Hydraulic jump และศึกษาประสิทธิภาพในการสลายพลังงานของมิติรูปร่าง Stilling Basin ที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบ



รูปที่ 7 ความยาวของ USBR Stilling Basin Type III ที่ออกแบบ

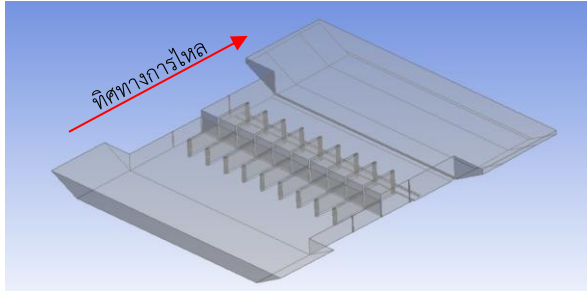


รูปที่ 8 มิติรูปร่างของ Chute block และ Baffle pier ที่ออกแบบ



รูปที่ 9 มิติรูปร่างของ End Sill ที่ออกแบบ





รูปที่ 10 โมเดลจำลองการไหลกรณี 10 ช่องบานระบาย

รูปที่ 10 เป็นโมเดลจำลองกรณี 10 ช่องบานระบายที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับโมเดลจำลองกรณี 1 ช่องบานระบาย โดยที่จะใช้สังเกต Hydraulic jump ให้เกิดอยู่ภายในบริเวณ Stilling Basin และใช้สังเกตพฤติกรรมการไหลของน้ำหลังผ่านอาคารไปแล้ว ผู้วิจัยได้สรุปคุณลักษณะโมเดลจำลองการไหลกรณี 10 ช่องบานระบาย ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปคุณลักษณะมิติรูปร่างของประตูระบายน้ำ

ลักษณะ	ขนาด/แบบ
บานประตูชนิดบานตรง	ขนาด 8.00 เมตร x 6.50 เมตร จำนวน 10 ช่อง
ระดับน้ำสูงสุด (รทก.)	+34.50 เมตร(รทก.)
ระดับธรณีบานระบาย	+28.00 เมตร(รทก.)
ระดับพื้นอาคารสลายพลังงาน	+27.50 เมตร(รทก.)
ตอม่อกลางรูปโค้งมน	หนา 1.00 เมตร สูง 9.00 เมตร ยาว 30.00 เมตร
ตอม่อริมตักฉากกับทิศทางไหล	กำแพงกันดินวางแบบตัว L (แบบหูช้าง)
คลองชักน้ำเข้าและออกหัวงาน	รูปสี่เหลี่ยมคางหมู ความลาดชันด้านข้าง 1 : 2 ท้องคลองกว้าง 89.00 เมตร

ตารางที่ 2 Modeling และ Boundary condition ที่ใช้งานในโปรแกรม Ansys CFD (Fluent)

Modeling	
Multiphase : Volume of fluid (VOF), Open Channel Flow	
Viscous : RNG, k-epsilon, Standard Wall Functions	
Boundary Condition	
Inlet	Pressure inlet (water) Pressure inlet (air)
Outlet	Pressure Outlet (water) Pressure Outlet (air)
Wall	No slit wall
Free Surface	Symmetry

ผู้วิจัยเลือกใช้ Modeling ตามที่ระบุในตารางที่ 2 เนื่องจากงานวิจัยเรื่อง Experimental and CFD Modeling of Hydraulic Jump Forming at Submerged Weir ของ Shaymaa Abdul Muttaleb Al-Hashimi, Khitam Abdulhussein Saeed และ Thameen N. Nahi ได้ผลการศึกษากว่า การใช้ Modeling แบบ k-epsilon, standard wall functions ในการจำลอง CFD ได้ Water surface profile ที่มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ [1]

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาหาขนาดของ Mesh ที่เหมาะสมสำหรับการทำจำลองการไหล โดยการเทียบผลจำลองและผลคำนวณของค่าความลึก  $y_3$  ในแต่ละโมเดลจำลอง ได้ผลดังตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 ขนาด Mesh ที่ศึกษาและผลความคลาดเคลื่อนของค่าความลึกหลังเกิดน้ำกระโดด ( $y_3$ ) ของโมเดลจำลองการไหลกรณี 1 ช่องบานระบาย

ขนาด Mesh (m)	จำนวน Element	ค่าความลึก $y_3$ (m)		ความคลาดเคลื่อน (%)
		จำลอง	คำนวณ	
1.00	36,396	2.988	2.618	14.13%
0.50	208,900	2.803	2.618	7.07%
0.25	1,157,177	-	2.618	-
0.30	731,915	2.575	2.618	1.64%

จากตารางที่ 3 ผู้วิจัยทำการจำลองโมเดล 1 ช่องบานระบายโดยมีระยะเปิดบานระบายอยู่ที่ 0.50 เมตร จะสังเกตได้ว่าที่ขนาด Mesh 0.25 เมตร ได้จำนวน Element สูงถึง 1,157,177 เซลล์ ซึ่งเกินข้อจำกัดของโปรแกรม Ansys 2024 R2 Student version ที่กำหนดให้ใช้จำนวน Element ได้ไม่เกิน 1,000,000 เซลล์ ดังนั้นสำหรับโมเดลจำลองการไหล 1 ช่องบานระบาย ผู้วิจัยเลือกใช้ขนาด Mesh เท่ากับ 0.30 เมตร ในการทำจำลอง CFD เนื่องจากให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจากทุกกรณี

ตารางที่ 4 ขนาด Mesh ที่ศึกษาและผลความคลาดเคลื่อนของค่าความลึกหลังเกิดน้ำกระโดด ( $y_3$ ) ของโมเดลจำลองการไหลกรณี 10 ช่องบานระบาย

ขนาด Mesh (m)	จำนวน Element	ค่าความลึก $y_3$ (m)		ความคลาดเคลื่อน (%)
		จำลอง	คำนวณ	
1.00	560,171	2.444	2.618	6.65%
0.50	2,960,733	-	2.618	-
0.80	1,029,598	-	2.618	-
0.85	833,865	2.742	2.618	4.74%

จากตารางที่ 4 ผู้วิจัยทำการจำลองโมเดล 10 ช่องบานระบายโดยมีระยะเปิดบานระบายอยู่ที่ 0.50 เมตร จะสังเกตได้ว่าที่ขนาด Mesh 0.50 เมตร และ 0.80 เมตร ได้จำนวน Element มากกว่าข้อจำกัดของโปรแกรม Ansys 2024 R2 Student version ที่กำหนดไว้ ดังนั้นสำหรับโมเดลจำลองการไหล 10 ช่องบานระบาย ผู้วิจัยเลือกใช้ขนาด Mesh เท่ากับ 0.85 เมตร ในการทำจำลอง CFD เนื่องจากให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ผู้วิจัยจึงสรุปการเลือกใช้ขนาด Mesh, จำนวน Element ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ขนาด Mesh และจำนวน Element ที่ใช้งานจริง

รายการ	โมเดล	
	1 ช่องบานระบาย	10 ช่องบานระบาย
ขนาด Mesh	0.30 m.	0.85 m.
จำนวน Element	731,915	833,865

## 7. ผลการจำลองการไหลกรณี 1 ช่องบานระบาย

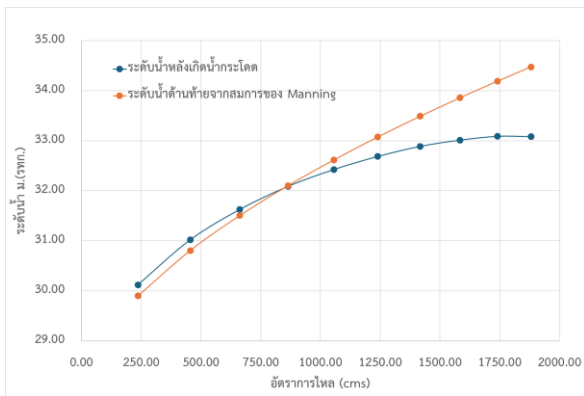
ค่าความลึกก่อนเกิดน้ำกระโดด ( $y_2$ ) และค่าความลึกหลังเกิดน้ำกระโดด ( $y_3$ ) ที่ได้จากแบบจำลองโมเดลกรณี 1 ช่องบานระบาย จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าความลึก  $y_2$  และค่าความลึก  $y_3$  จากการคำนวณด้วยสมการพลังงานและสมการวิเคราะห์ Hydraulic jump โดยจะใช้ค่าความลึก  $y_2$  ที่ไม่ได้ลดระดับ

พื้นอาคารสลายพลังงานลง สำหรับค่าความลึก  $y_3$  จะใช้ค่าหลังลดระดับพื้นอาคารสลายพลังงานแล้ว 0.50 เมตร

การเลือกระยะเปิดบานระบายเพื่อนำมาจำลองจะใช้ในช่วงระยะเปิดบานระบาย 0.50 – 2.50 เมตร เนื่องจากระดับน้ำ  $y_3$  ในช่วงนี้มีค่าที่สูงหรือใกล้เคียงกับระดับน้ำที่คำนวณจากสมการของ Manning โดยใช้อัตราการไหลผ่านบานระบายกรณีเป็นการไหลแบบอิสระ (Free Flow) ในการคำนวณหาค่าระดับน้ำทางด้านท้าย และใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning ( $n$ ) เท่ากับ 0.035 ซึ่งเหมาะสมกับลักษณะคลองธรรมชาติ ผลการคำนวณจะแสดงไว้ดังตารางที่ 6 และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลผ่านบานระบายและระดับน้ำเป็นไปตามรูปที่ 11

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณระดับน้ำหลังเกิดน้ำกระโดด ( $y_3$ ) และระดับน้ำด้านท้าย

ระยะเปิดบาน (m)	Q (cms)	ระดับน้ำ $y_3$ ม.(รทก.)	ระดับน้ำด้านท้าย ม.(รทก.)
0.50	236.101	+30.118	+29.898
1.00	454.956	+31.017	+30.805
1.50	662.725	+31.625	+31.506
2.00	863.924	+32.086	+32.102
2.50	1055.269	+32.423	+32.615
3.00	1239.222	+32.685	+33.073
3.50	1417.017	+32.887	+33.488
4.00	1583.314	+33.012	+33.857
4.50	1740.578	+33.088	+34.190
5.00	1880.596	+33.082	+34.476



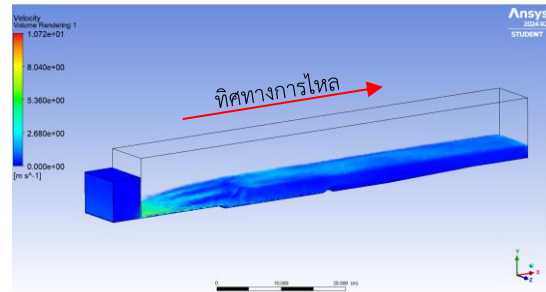
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลผ่านบานระบายและระดับน้ำ

ตารางที่ 7 ผลการคำนวณค่าความลึกก่อนเกิดน้ำกระโดด ( $y_2$ ) และค่าความลึกหลังเกิดน้ำกระโดด ( $y_3$ )

ระยะเปิดบาน (m)	$y_2$ (m)	$y_3$ (m)
0.50	0.294	2.618
1.00	0.581	3.517
1.50	0.867	4.125
2.00	1.161	4.586
2.50	1.459	4.923

ตารางที่ 8 ผลการจำลองค่าความลึกก่อนเกิด ( $y_2$ ) และค่าความลึกหลังเกิดน้ำกระโดด ( $y_3$ ) ของโมเดลกรณี 1 ช่องบานระบาย

ระยะเปิดบาน (m)	$y_2$ (m)	$y_3$ (m)
0.50	0.363	2.575
1.00	0.682	3.536
1.50	1.029	4.182
2.00	1.261	4.795
2.50	1.587	5.030



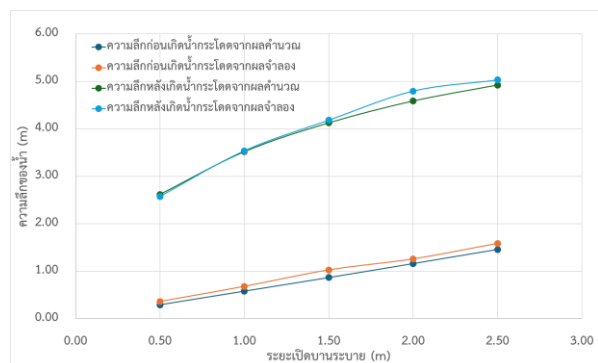
รูปที่ 12 ผลจำลองการไหลแบบ 3 มิติโมเดลกรณี 1 ช่องบานระบายที่ระยะเปิดบานระบาย 0.50 เมตร

จากรูปที่ 12 เป็นตัวอย่างผลการจำลองการไหล 3 มิติโมเดลกรณี 1 ช่องบานระบาย จะสังเกตเห็นถึงการเกิด Hydraulic jump ได้อย่างชัดเจน

จากตารางที่ 7 ผลการคำนวณค่าความลึก  $y_2$  และค่าความลึก  $y_3$  นำมาเทียบกับผลจำลองความลึก  $y_2$  และค่าความลึก  $y_3$  จากตารางที่ 8 ได้ผลดังตารางที่ 9 และจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างระยะเปิดบานระบายและค่าความลึกของน้ำจากผลคำนวณและผลจำลองโมเดลกรณี 1 ช่องบานระบายดังรูปที่ 13

ตารางที่ 9 ความแตกต่างความลึกก่อนเกิดน้ำกระโดดและค่าความลึกหลังเกิดน้ำกระโดดระหว่างผลการคำนวณและผลจำลองโมเดลกรณี 1 ช่องบานระบาย

ระยะเปิดบาน (m)	ค่าความแตกต่าง (m)		ค่าความแตกต่าง (%)	
	$y_2$	$y_3$	$y_2$	$y_3$
0.50	0.069	0.043	23.45%	1.64%
1.00	0.102	0.019	17.57%	0.54%
1.50	0.162	0.057	18.69%	1.38%
2.00	0.100	0.209	8.62%	4.56%
2.50	0.128	0.107	8.77%	2.17%



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเปิดบานระบายและค่าความลึกของน้ำจากผลคำนวณและผลจำลองโมเดลกรณี 1 ช่องบานระบาย

จากตารางที่ 9 และรูปที่ 13 ผลจำลองโมเดลกรณี 1 ช่องบานระบายค่าความลึก  $y_2$  และความลึก  $y_3$  ระหว่างผลคำนวณและผลจำลองมีความใกล้เคียงและสอดคล้องกัน ผู้วิจัยจึงใช้การทดสอบทางสถิติด้วย t-Test : Paired Two Sample for Means โดยใช้ความมีนัยสำคัญอยู่ที่ 5% เพื่อตรวจสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างผลการคำนวณและผลจำลอง ดังตารางที่ 8

**ตารางที่ 10** ผลทดสอบทางสถิติด้วย t-Test ของผลการคำนวณและผลจำลองโมเดลกรณี 1 ช่องบานระบาย

ตัวแปร	$y_2$	$y_3$
$R^2$	0.998	0.999
t-Stat	-7.173	-1.640
P-value	0.002	0.176
t-Critical	2.776	2.776
ผลการทดสอบ	มีนัยสำคัญ	ไม่มีนัยสำคัญ

จากตารางที่ 10 ค่าความลึก  $y_2$  ระหว่างผลการคำนวณและผลการจำลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งเกิดจากการไหลของน้ำไหลลอดผ่านบานระบายเข้าปะทะชิ้นส่วน Baffle pier ทำให้ค่าความลึก  $y_2$  สูงขึ้น สำหรับค่าความลึก  $y_3$  ระหว่างผลการคำนวณและผลการจำลองมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ จึงสรุปได้ว่าค่าที่จากผลการจำลองและผลการคำนวณมีความใกล้เคียงและสอดคล้องกัน

## 8. ผลการจำลองการไหลกรณี 10 ช่องบานระบาย

ค่าความลึก  $y_2$  และความลึก  $y_3$  ที่ได้จากการจำลองการไหลกรณี 10 ช่องบานระบาย จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าความลึก  $y_2$  และความลึก  $y_3$  จากการคำนวณด้วยสมการพลังงานดังตารางที่ 5 โดยจะใช้ค่าความลึก  $y_2$  โดยที่ไม่ได้ลดระดับพื้นอาคารสลายพลังงานลง สำหรับค่าความลึก  $y_3$  จะใช้ค่าหลังลดระดับพื้นอาคารสลายพลังงานแล้ว 0.50 เมตร

การเลือกระยะเปิดบานระบายเพื่อนำมาจำลองจะใช้เหมือนกับกรณี 1 ช่องบานระบาย และเพิ่มเต็มการจำลองสำหรับกรณีที่มีอาคารจำเป็นต้องปิดบานเพื่อซ่อมแซมบานระบายอีก 5 กรณี ซึ่งเลือกจากการวิเคราะห์หาอัตราการไหลผ่านบานระบายกรณีเป็นการไหลแบบอิสระ (Free Flow) ที่มีค่าไม่น้อยกว่า 1,000 cms ตามที่ออกแบบไว้ข้างต้น

นอกจากนำค่าความลึกความลึก  $y_2$  และความลึก  $y_3$  มาพิจารณาแล้ว ผลการจำลองกรณี 10 ช่องบานระบายจะใช้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านประตูระบายน้ำด้วย

**ตารางที่ 11** ผลคำนวณค่าความลึกก่อนเกิด ( $y_2$ ) และค่าความลึกหลังเกิดน้ำกระโดด ( $y_3$ ) ของกรณีปิดบานระบายบางบาน

จำนวนปิดบาน (ช่อง)	ระยะเปิดบาน (m)	Q (cms)	q (cms/m)	$y_2$ (m)	$y_3$ (m)
1	3.00	1111.756	17.041	1.769	5.185
2	3.50	1125.507	19.486	2.098	5.387
3	4.00	1094.734	21.773	2.441	5.512
4	4.50	1024.433	23.935	2.812	5.588
5	6.00	1000.356	28.323	4.412	5.526

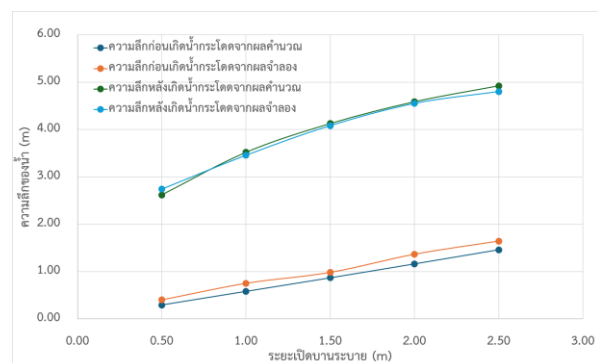
**ตารางที่ 12** ผลการจำลองค่าความลึกก่อนเกิด ( $y_2$ ) และค่าความลึกหลังเกิดน้ำกระโดด ( $y_3$ ) ของโมเดลกรณี 10 ช่องบานระบาย

กรณี	ระยะเปิดบาน (m)	$y_2$ (m)	$y_3$ (m)
เปิดพร้อมกัน	0.50	0.402	2.742
เปิดพร้อมกัน	1.00	0.752	3.456
เปิดพร้อมกัน	1.50	0.983	4.081
เปิดพร้อมกัน	2.00	1.366	4.549
เปิดพร้อมกัน	2.50	1.643	4.800
ปิด 1 บาน	3.00	1.839	5.066
ปิด 2 บาน	3.50	2.295	5.453
ปิด 3 บาน	4.00	2.597	5.631
ปิด 4 บาน	4.50	2.723	5.738
ปิด 5 บาน	6.00	3.296	5.520

นำผลการคำนวณกรณีเปิดบานพร้อมกันจากตารางที่ 7 และผลการคำนวณกรณีปิดบานระบายบางบานจากตารางที่ 11 นำมาเทียบกับผลจำลองความลึก  $y_2$  และความลึก  $y_3$  จากตารางที่ 12 ได้ดังตารางที่ 13 และได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเปิดบานระบายและค่าความลึกของน้ำจากผลคำนวณและผลจำลองโมเดลกรณี 10 ช่องบานระบายเปิดบานพร้อมกันและปิดบานระบายบางบาน ดังรูปที่ 14 และ 15

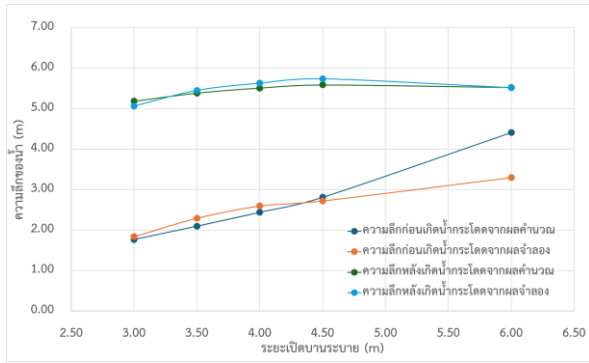
**ตารางที่ 13** ความแตกต่างความลึกก่อนเกิดน้ำกระโดดและความลึกหลังเกิดน้ำกระโดดระหว่างผลการคำนวณและผลจำลองโมเดลกรณี 10 ช่องบานระบาย

กรณี	ระยะเปิดบาน (m)	ค่าความแตกต่าง (m)		ค่าความแตกต่าง (%)	
		$y_2$	$y_3$	$y_2$	$y_3$
เปิดพร้อมกัน	0.50	0.108	0.124	36.70%	4.74%
เปิดพร้อมกัน	1.00	0.172	0.061	29.63%	1.73%
เปิดพร้อมกัน	1.50	0.116	0.044	13.38%	1.07%
เปิดพร้อมกัน	2.00	0.205	0.037	17.66%	0.81%
เปิดพร้อมกัน	2.50	0.184	0.123	12.61%	2.50%
ปิด 1 บาน	3.00	0.071	0.119	4.01%	2.30%
ปิด 2 บาน	3.50	0.197	0.066	9.39%	1.23%
ปิด 3 บาน	4.00	0.156	0.119	6.39%	2.16%
ปิด 4 บาน	4.50	0.089	0.150	3.17%	2.68%
ปิด 5 บาน	6.00	1.116	0.006	25.27%	0.11%



**รูปที่ 14** ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเปิดบานระบายและค่าความลึกของน้ำจากผลคำนวณและผลจำลองโมเดลกรณี 10 ช่องบานระบายเปิดบานพร้อมกัน





รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเปิดบานระบายและค่าความลึกของน้ำจากผลคำนวณและผลจำลองโมเดลกรณี 10 ช่องบานระบายเปิดบานระบายบาง

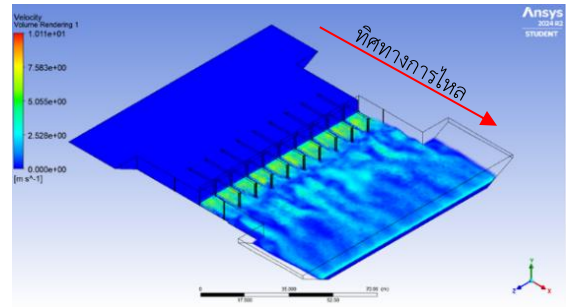
ตารางที่ 14 ผลทดสอบทางสถิติด้วย t-Test ของผลการคำนวณและผลจำลองโมเดลกรณี 10 ช่องบานระบาย

ตัวแปร	เปิดพร้อมกัน		ปิดบานระบายบาง	
	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>
R <sup>2</sup>	0.998	0.998	0.947	0.972
t-Stat	-8.179	0.688	0.637	0.216
P-value	0.001	0.529	0.559	0.432
t-Critical	2.776	2.776	2.776	2.776
ผลการทดสอบ	มีนัยสำคัญ	ไม่มีนัยสำคัญ	ไม่มีนัยสำคัญ	ไม่มีนัยสำคัญ

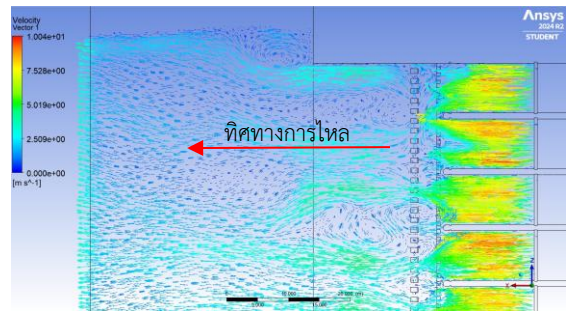
จากตารางที่ 14 สำหรับกรณีเปิดบานพร้อมกัน ค่าความลึก y<sub>2</sub> ระหว่างผลการคำนวณและผลจำลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จากรูปที่ 11 ค่าความลึก y<sub>2</sub> จากผลจำลองให้ค่าที่สูงกว่าผลจากการคำนวณทุกกรณี และสำหรับค่าความลึก y<sub>3</sub> ระหว่างผลการคำนวณและผลจำลองมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ

สำหรับกรณีปิดบานระบายบางบาง ทั้งค่าความลึก y<sub>2</sub> และค่าความลึก y<sub>3</sub> ระหว่างผลการคำนวณและผลจำลองมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าที่ระยะเปิดบานระบายมากอิทธิพลของชิ้นส่วน Baffle pier จะส่งผลต่อค่าความลึก y<sub>2</sub> น้อย สำหรับค่าความลึก y<sub>2</sub> ที่กรณีเปิดบานระบาย 5 บานโดยมีระยะเปิดบานระบายอยู่ที่ 6 เมตร มีค่าความแตกต่างระหว่างผลจำลองและผลการคำนวณสูงถึง 1.115 เมตร และมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมากถึง 25.27% ซึ่งเกิดจากพฤติกรรมกระแสน้ำผ่านบานระบายกรณีเป็นการไหลแบบอิสระ (Free Flow) เมื่อเปิดบานระบายเข้าใกล้เปิดบานระบายพัวน้ำ (Fully opening) ค่าความลึก y<sub>2</sub> จากการคำนวณโดยโมเดลระดับพื้นอาคารสลายพลังงาน 0.50 เมตร มีค่าที่ต่ำกว่าค่าความลึก y<sub>3</sub> ผู้วิจัยจึงนำค่าความลึก y<sub>2</sub> จากการคำนวณซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.345 เมตรมาเปรียบเทียบกับค่าผลจำลอง พบว่ามีความแตกต่างเพียง 0.049 เมตร และมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเพียง 1.46%

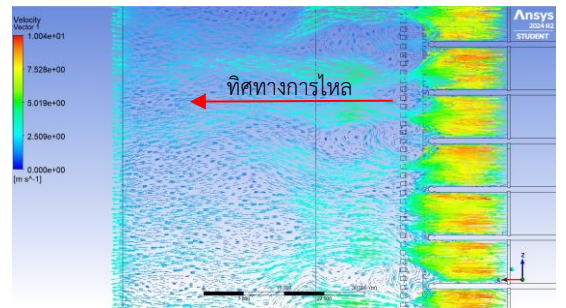
ตัวอย่างผลจำลองการไหลแบบ 3 มิติโมเดลกรณี 10 ช่องบานระบาย โดยที่เปิดบานระบายพร้อมกันและปิดบานระบายบางบาง จะแสดงดังรูปที่ 16 และ 19 ตามลำดับ



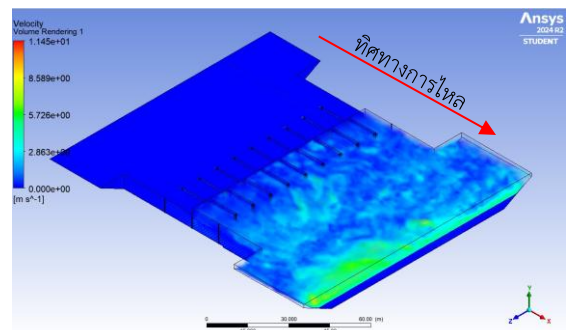
รูปที่ 16 ผลจำลองการไหลแบบ 3 มิติโมเดลกรณี 10 ช่องบานระบายโดยที่เปิดบานระบายพร้อมกัน ที่ระยะเปิดบาน 1.00 เมตร



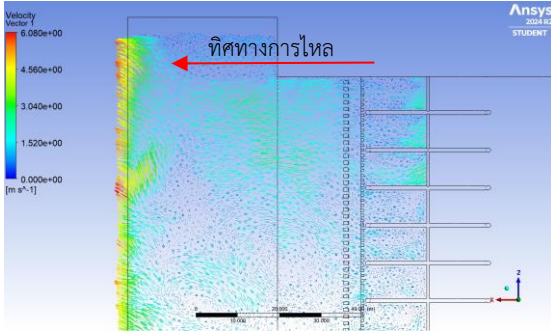
รูปที่ 17 กระแสการไหลโมเดลกรณี 10 ช่องบานระบายโดยที่เปิดบานระบายพร้อมกัน ที่ระยะเปิดบาน 1.00 เมตร (บริเวณริมตลิ่ง)



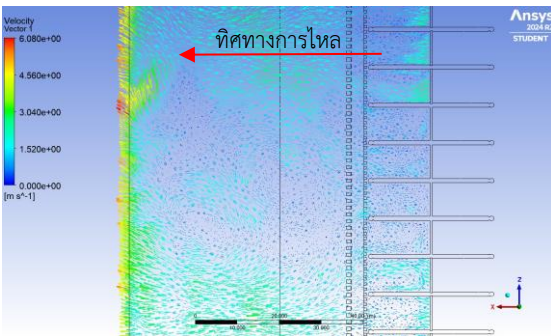
รูปที่ 18 กระแสการไหลโมเดลกรณี 10 ช่องบานระบายโดยที่เปิดบานระบายพร้อมกัน ที่ระยะเปิดบาน 1.00 เมตร (บริเวณกึ่งกลางอาคาร)



รูปที่ 19 ผลจำลองการไหลแบบ 3 มิติโมเดลกรณี 10 ช่องบานระบายโดยที่ปิดบานระบาย 4 บาน ที่ระยะเปิดบาน 4.50 เมตร



รูปที่ 20 กระแสการไหลโมเดลกรณี 10 ช่องบานระบายโดยที่ปิดบานระบาย 4 บาน ที่ระยะเปิดบาน 4.50 เมตร (บริเวณริมตลิ่ง)

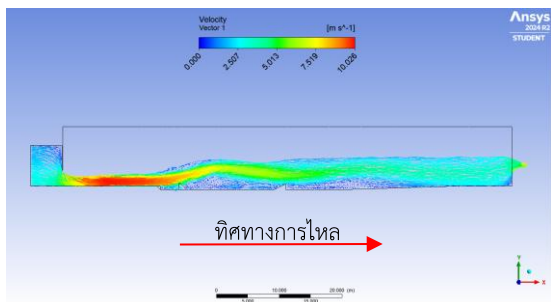


รูปที่ 21 กระแสการไหลโมเดลกรณี 10 ช่องบานระบายโดยที่ปิดบานระบาย 4 บาน ที่ระยะเปิดบาน 4.50 เมตร (บริเวณกึ่งกลางอาคาร)

จากรูปที่ 14 และรูปที่ 15 จะเห็นว่ากระแสการไหลของน้ำกรณีเปิดบานระบายพร้อมกันจะมีลักษณะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) บริเวณ Stilling Basin อย่างมาก และจะมีความปั่นป่วนลดลงหลังจากผ่านบริเวณ Stilling Basin ไปแล้ว และสำหรับรูปที่ 17 และรูปที่ 18 จะเห็นว่ากระแสการไหลของน้ำกรณีปิดบานระบายบางบานจะมีลักษณะเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในบริเวณอาคารสลายพลังงานจนถึงช่วงคลองด้านท้าย โดยเฉพาะในบริเวณที่ปิดบานระบายที่แสดงให้เห็นถึงกระแสการไหลแบบปั่นป่วนขนาดใหญ่

### 9. ประสิทธิภาพของอาคารสลายพลังงาน USBR Stilling Basin Type III

ประสิทธิภาพในการสลายพลังงานของอาคารสลายพลังงาน USBR Stilling Basin Type III ที่นำมาใช้งานกับประตูระบายน้ำได้ผลการจำลองดังตารางที่ 15 และตารางที่ 16



รูปที่ 22 ผลจำลองการไหลโมเดลกรณี 1 ช่องบานระบาย ที่ระยะเปิดบานระบาย 2.50 เมตร (ระยะวาง Baffle pier 3 เมตร ห่างจาก Chute block)

ตารางที่ 15 ผลคำนวณค่า Froude Number จากผลการจำลอง

ระยะเปิดบาน (m)	y <sub>2</sub> (m)	V <sub>2</sub> (m/s)	y <sub>3</sub> (m)	V <sub>3</sub> (m/s)	Fr <sub>2</sub>	Fr <sub>3</sub>
0.50	0.363	10.227	2.575	1.303	5.42	0.26
1.00	0.682	10.268	3.536	1.714	3.97	0.29
1.50	1.029	10.200	4.182	1.996	3.21	0.31
2.00	1.261	10.186	4.795	2.472	2.90	0.36
2.50	1.587	10.010	5.030	2.760	2.54	0.39

ตารางที่ 16 ผลคำนวณพลังงานการไหลจากผลการจำลองและประสิทธิภาพในการสลายพลังงานของอาคารสลายพลังงาน USBR Stilling Basin Type III

ระยะเปิดบาน (m)	E <sub>2</sub> (m)	E <sub>3</sub> (m)	ΔE (m)	ΔE/E <sub>2</sub> (%)
0.50	5.69	2.66	3.03	53.25%
1.00	6.06	3.69	2.37	39.11%
1.50	6.33	4.39	1.94	30.65%
2.00	6.55	5.11	1.44	21.98%
2.50	6.69	5.42	1.27	18.98%

จากตารางที่ 16 จะพบว่าในระยะการเปิดบานระบายที่ 0.50 เมตร มีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานการไหลมากที่สุดและที่ระยะเปิดบานระบาย 2.50 เมตรมีประสิทธิภาพการสลายพลังงานเหลือเพียง 18.98% ซึ่งสามารถสังเกตจากรูปที่ 22 ได้ว่าการไหลที่มีความเร็วสูงมีลักษณะไหลข้าม Baffle pier ออกไปทางด้านท้าย ผู้วิจัยจึงทำการปรับระยะการวางชิ้นส่วน Baffle pier ให้ห่างจาก Chute block มากขึ้นและจำลองการไหลเพื่อหาตำแหน่งการวางที่เหมาะสมที่สุด ได้ผลดังตารางที่ 18

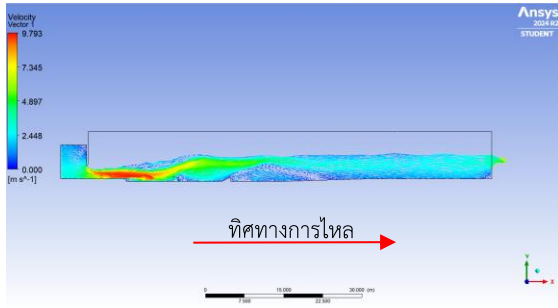
ตารางที่ 17 ผลจำลองและประสิทธิภาพในการสลายพลังงานการไหลในแต่ละตำแหน่งการวางชิ้นส่วน Baffle pier ที่ระยะเปิดบานระบาย 2.50 เมตร

ระยะวาง (m)	y <sub>2</sub> (m)	V <sub>2</sub> (m/s)	y <sub>3</sub> (m)	V <sub>3</sub> (m/s)	E <sub>2</sub> (m)	E <sub>3</sub> (m)	ΔE (m)	ΔE/E <sub>2</sub> (%)
4.00	1.573	10.005	4.927	2.793	6.67	5.32	1.35	20.24%
5.00	1.521	10.136	4.988	2.853	6.76	5.40	1.36	20.12%
6.00	1.524	10.215	4.992	2.253	6.84	5.25	1.59	23.25%
7.00	1.563	10.231	5.053	2.983	6.90	5.51	1.39	20.14%
8.00	1.491	10.199	5.044	2.426	6.79	5.34	1.45	21.35%
9.00	1.484	10.248	4.717	2.161	6.84	4.96	1.88	27.49%
10.00	1.369	10.258	4.865	2.271	6.73	5.13	1.60	23.77%
11.00	1.273	10.255	4.773	2.282	6.63	5.04	1.59	23.98%
12.00	1.267	10.326	4.796	2.001	6.70	5.00	1.70	25.37%

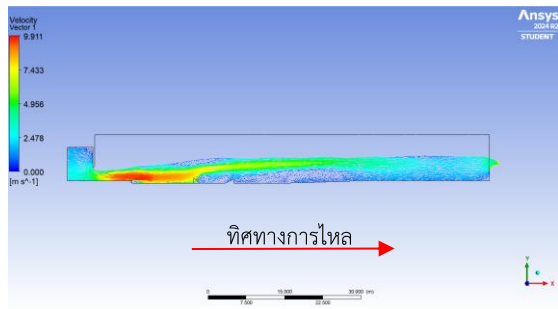
จากตารางที่ 17 ระยะการวางชิ้นส่วน Baffle pier ห่างจาก Chute block ที่ 9 เมตร มีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานมากที่สุดอยู่ที่ 27.49% ซึ่งมีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานมากกว่าระยะวางที่ 3 เมตร ตามข้อเสนอแนะของ USBR อยู่ 8.51% และมีความเร็วการไหลด้านท้ายเฉลี่ยลดลงจาก 2.760 เมตร/วินาที เหลือเพียง 2.161 เมตร/วินาที จะสามารถสังเกตกระแสการไหลที่มีความเร็วสูงนั้นลดลงอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 23

สำหรับระยะการวางชิ้นส่วน Baffle pier ที่ 12 เมตร มีความเร็วการไหลเหลือเพียง 2.001 เมตร/วินาที ซึ่งเป็นค่าความเร็วการไหลที่น้อยที่สุด

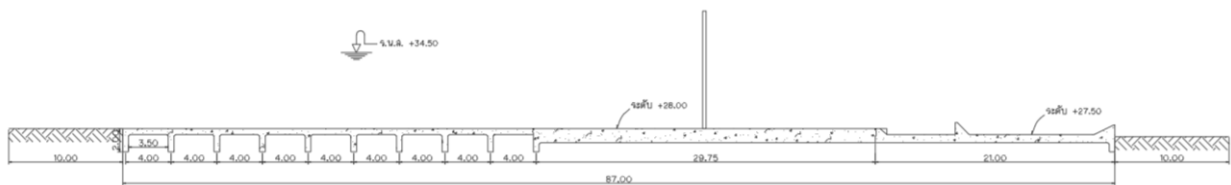
จากทุกกรณี แต่กระแสการไหลที่มีความเร็วสูงมีทิศทางพุ่งขึ้นสู่ผิวน้ำดังรูปที่ 24 อาจทำให้เกิดการกัดเซาะทางด้านท้ายได้มาก อีกทั้งตำแหน่งการเกิดน้ำกระโดดอยู่ที่ปลายอาคารสลวยพลังงานจึงมีความเสี่ยงที่น้ำกระโดดจะเกิดนอกอาคารสลวยพลังงานได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสรุปว่าระยะการวางชิ้นส่วน Baffle pier ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำ USBR Stilling Basin Type III มาใช้กับประตูระบายน้ำอยู่ที่ 3 เท่าของระยะตามคำแนะนำของ USBR



รูปที่ 23 ผลจำลองการไหลโมเดลกรณี 1 ช่องบานระบาย ที่ระยะเปิดบานระบาย 2.50 เมตร (ระยะวาง Baffle pier 9 เมตร ห่างจาก Chute block)



รูปที่ 24 ผลจำลองการไหลโมเดลกรณี 1 ช่องบานระบาย ที่ระยะเปิดบานระบาย 2.50 เมตร (ระยะวาง Baffle pier 12 เมตร ห่างจาก Chute block)

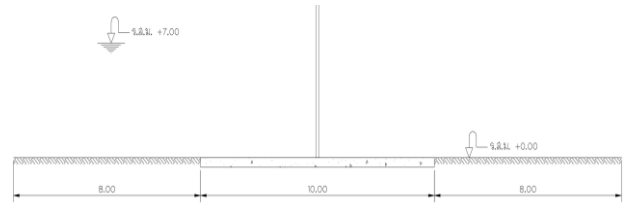


รูปที่ 27 โมเดลจำลองกรณีมิติประตูระบายน้ำที่ได้ออกแบบ

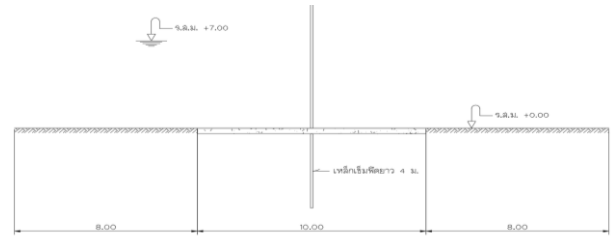
ตารางที่ 18 โมเดลคำนวณที่ใช้ในโปรแกรมจำลองการไหลซึมผ่านใต้ฐานรากและแรงดันยกขึ้นของน้ำ GeoStudio

โมเดลจำลอง	ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดิน (m/s)	ผลต่างระหว่างระดับเหนือน้ำกับท้ายน้ำ (m)
กรณีไม่มีเข็มพืด	$1.00 \times 10^{-7}$	7
กรณีมีเข็มพืด	$1.00 \times 10^{-7}$	7
กรณีมิติประตูระบายน้ำที่ได้ออกแบบ	$7.76 \times 10^{-5}$	7

## 10. โมเดลที่ใช้ในจำลองการไหลซึมผ่านใต้ฐานรากและแรงดันยกขึ้นของน้ำ



รูปที่ 25 โมเดลจำลองการทดสอบในกรณีไม่มีเข็มพืด



รูปที่ 26 โมเดลจำลองการทดสอบในกรณีไม่มีเข็มพืด

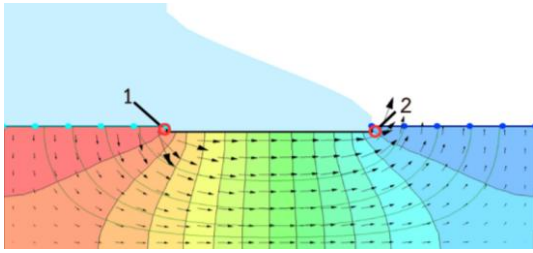
โมเดลสำหรับการจำลองในกรณีไม่มีเข็มพืด กรณีมีเข็มพืด และกรณีมิติประตูระบายน้ำที่ได้ออกแบบ ดังรูปที่ 25 26 และ 27 ตามลำดับใช้ในการตรวจสอบ Seepage และ Uplift pressure ของประตูระบายน้ำจากโปรแกรม GeoStudio กับค่าจากคำนวณด้วยทฤษฎี Flow nets และ วิธี Ratio method จากทฤษฎี Weighted creep ratio ของ Lane รวมถึงใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลซึมข้ามผ่านกำแพงที่น้ำ โดยอ้างอิงข้อมูลจากการสำรวจของกรมชลประทาน ได้แก่ Soil Boring และการทดสอบ Permeability Test วันที่ 20 พฤศจิกายน 2567 ซึ่งได้ทำการสรุปคุณสมบัติของโมเดลที่ใช้วิเคราะห์ ดังตารางที่ 18

## 11. ผลการจำลองการไหลซึมผ่านใต้ฐานรากและแรงดันยกขึ้นของน้ำในกรณีไม่มีเข็มพืด และกรณีมีเข็มพืด

การพิจารณา ค่า Water Flux,  $q$  หรืออัตราการไหลซึมผ่านช่องการไหลพบว่า ที่ระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้ายของอาคารต้องวิเคราะห์การไหลในแนวตั้ง โดยสีเหลี่ยมมุมฉากของช่องการไหลแต่ละช่องที่วิเคราะห์มีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว ( $b/L$ ) เท่ากับ  $1/0.7$  หรือตามลักษณะช่องการไหลในแนวตั้ง และบริเวณที่ไหลโดยพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสจะมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวในการวิเคราะห์การไหลในแนวนอน จะเท่ากับ 1 ส่วนการพิจารณาแรงดันยกขึ้นของน้ำจะมีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลอง GeoStudio, ผลจากการคำนวณด้วยทฤษฎี Flow nets และวิธี



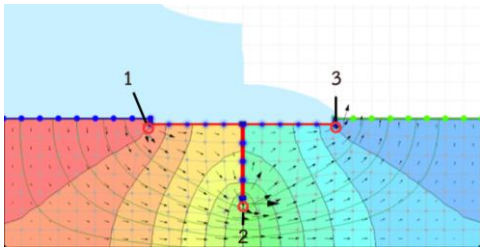
Ratio method จากทฤษฎี Weighted creep ratio ของ Lane ว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะนำไปใช้ในการออกแบบความยาวและความหนาของพื้นอาคารต่อไป



รูปที่ 28 ผลการจำลองอาคารการไหลซึมผ่านได้ฐานรากในกรณีไม่มีเข็มพืด

ตารางที่ 19 เปรียบเทียบผลการจำลองการไหลซึมในกรณีไม่มีเข็มพืด

วิธีการ	ค่าอัตราการไหลซึม (m <sup>3</sup> /s/m)	ค่าความแตกต่าง
โปรแกรม GeoStudio	$8.43 \times 10^{-7}$	$3.18 \times 10^{-8}$ (3.77%)
ทฤษฎีตาข่ายการไหล	$8.11 \times 10^{-7}$	



รูปที่ 29 ผลการจำลองอาคารการไหลซึมผ่านได้ฐานรากในกรณีมีเข็มพืด

ตารางที่ 20 เปรียบเทียบผลการจำลองการไหลซึมในกรณีมีเข็มพืด

วิธีการ	ค่าอัตราการไหลซึม (m <sup>3</sup> /s/m)	ค่าความแตกต่าง
โปรแกรม GeoStudio	$8.36 \times 10^{-7}$	$1.96 \times 10^{-8}$ (2.29%)
ทฤษฎีตาข่ายการไหล	$8.56 \times 10^{-7}$	

จากรูปที่ 28 และ 29 การพิจารณาผลการจำลองอัตราการไหลซึมผ่านได้ฐานรากของทั้ง 2 กรณี ค่าที่ได้จากการจำลอง GeoStudio มีความแตกต่างกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎี Flow nets ดังแสดงในตารางที่ 20 และ 21 อยู่ที่ 3.77% และ 2.29% ตามลำดับ ซึ่งมีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก แสดงให้เห็นว่า ผลการจำลองนี้มีความน่าเชื่อถือ สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึมผ่านได้ฐานรากได้

ในการพิจารณาแรงดันยกขึ้นของน้ำกรณีไม่มีเข็มพืดจะทำการพิจารณา 2 ตำแหน่ง คือ Equipotential lines เส้นแรก และ Equipotential lines เส้นสุดท้าย ตามรูปที่ 28 ส่วนกรณีมีเข็มพืดจะพิจารณาทั้งหมด 3 ตำแหน่ง โดยเพิ่มตำแหน่งปลายสุดของเข็มพืด ตามรูปที่ 29 ซึ่งการเลือกพิจารณาเพียง 2 หรือ 3 ตำแหน่งข้างต้นนั้นเนื่องจากการคำนวณแรงดันยกขึ้นของน้ำด้วยวิธีอัตราส่วน (Ratio Method) จะมีการพิจารณาวิเคราะห์เฉพาะจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยจะพิจารณาเฉพาะบริเวณช่วงปลายของการไหลในแนวราบและแนวตั้งในแต่ละจุดได้ฐานรากที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของทางเดินน้ำในแต่ละช่วงเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถ

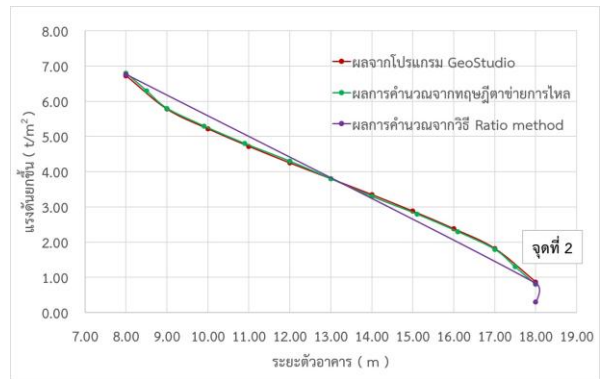
เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทุกตำแหน่งได้ฐานรากได้ โดยผลการเปรียบเทียบจะแสดงในตารางที่ 21 และ 22 และ รูปที่ 30 และ 31

ตารางที่ 21 เปรียบเทียบผลการจำลองแรงดันยกขึ้นของน้ำในกรณีไม่มีเข็มพืด

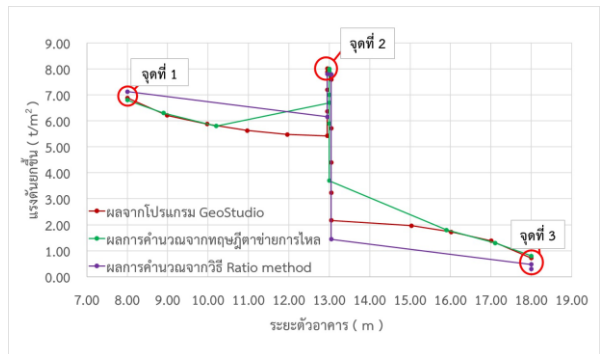
จุดที่	แรงดันยกขึ้น (t/m <sup>2</sup> )		
	GeoStudio	ทฤษฎี Flow nets	วิธี Ratio method
1	6.73	6.80	6.77
2	0.87	0.80	0.83

ตารางที่ 22 เปรียบเทียบผลการจำลองแรงดันยกขึ้นของน้ำในกรณีมีเข็มพืด

จุดที่	แรงดันยกขึ้น (t/m <sup>2</sup> )		
	GeoStudio	ทฤษฎี Flow nets	วิธี Ratio method
1	6.89	6.80	7.12
2	7.89	7.80	7.79
3	0.72	0.80	0.48



รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันยกขึ้นกับระยะตัวอาคารในกรณีไม่มีเข็มพืด



รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันยกขึ้นกับระยะตัวอาคารในกรณีมีเข็มพืด

จากรูปที่ 30 และ 31 และตารางที่ 21 และ 22 จะสังเกตเห็นได้ว่าแรงดันยกขึ้นต่อระยะตัวอาคารที่ได้จากการจำลอง GeoStudio, การคำนวณด้วยทฤษฎี Flow nets และวิธี Ratio method จากทฤษฎี Weighted creep ratio ของ Lane ในทุกจุดพิจารณาจะมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกันทั้งในกรณีมีเข็มพืดและไม่มีเข็มพืดยกเว้นในกรณีที่ไม่มีเข็มพืดในจุดที่ 3 เนื่องจากกราฟที่ได้ในวิธี Ratio method เป็นกราฟเส้นตรงแต่อีกสองวิธีเป็นกราฟเส้นโค้งทำให้ได้ค่าที่น้อยกว่าซึ่งทำให้ทราบได้ว่าการไหลซึมนั้นไม่เป็นไปตามแนวอาคาร ทำให้ต้องมีการใช้ F.S. สำหรับการออกแบบ

## 12. ผลการจำลองการไหลซึมผ่านได้ฐานรากและแรงดันยกขึ้นกรณีมิติประตูประบายน้ำที่ได้ออกแบบ

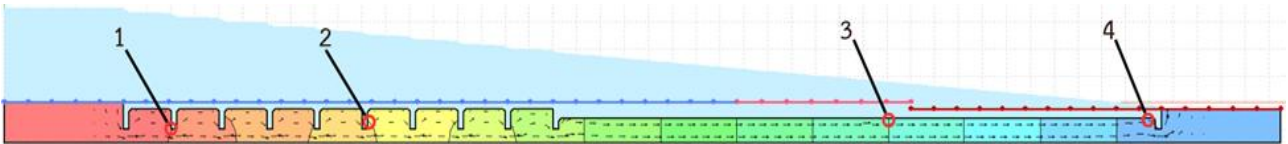
การจำลองการไหลซึมผ่านได้ฐานรากและแรงดันยกขึ้นในกรณีมิติประตูประบายน้ำที่ได้ออกแบบในการพิจารณาอัตราการไหลซึมผ่านได้ฐานรากนั้น จะมีการพิจารณาในทำนองเดียวกันกับการจำลองในหัวข้อที่ 9

ตารางที่ 23 เปรียบเทียบผลการจำลองการไหลซึมกรณีมิติประตูประบายน้ำที่ได้ออกแบบ

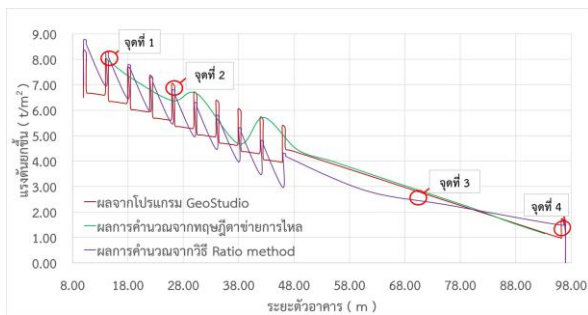
วิธีการ	ค่าอัตราการไหลซึม (m <sup>3</sup> /s/m)	ค่าความแตกต่าง
โปรแกรม GeoStudio	6.22 × 10 <sup>-4</sup>	1.25 × 10 <sup>-5</sup> (1.98%)
ทฤษฎีตาข่ายการไหล	6.35 × 10 <sup>-4</sup>	

จากตารางที่ 23 การพิจารณาอัตราการไหลซึมผ่านได้ฐานราก ค่าที่ได้จากการจำลอง GeoStudio มีค่าความแตกต่างกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎีตาข่ายการไหลอยู่ที่ 1.98% ซึ่งมีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก แสดงให้เห็นว่าผลการจำลองนี้มีความน่าเชื่อถือ

ในการพิจารณาเปรียบเทียบผลการคำนวณ Uplift pressure ด้วยโมเดลมิติประตูประบายน้ำที่ได้จะทำการพิจารณาจากรูปที่ 32 ทั้งหมด 4 ตำแหน่ง คือที่ระยะ X = 13.96 เมตร (ตำแหน่งปลายสุดของกำแพงที่บ้น้ำ



รูปที่ 32 ผลการจำลองโมเดลประตูประบายน้ำที่ได้ออกแบบผ่านโปรแกรม GeoStudio



รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันยกขึ้นกับระยะตัวอาคารในกรณีมิติประตูประบายน้ำที่ได้ออกแบบ

การไหลซึมผ่านได้ฐานรากตามทฤษฎีของ Lane กล่าวว่า น้ำจะเคลื่อนตัวไปในลักษณะขนานตามผิวสัมผัสของแนวอาคารและกำแพงที่บ้น้ำ โดยไม่เกิดการไหลข้ามหรือไม่สัมผัสโดยตรงกับผิวของอาคารที่อยู่ในแนวการไหล

จากผลการจำลองในรูปที่ 32 ทำให้ได้ค่าเปรียบเทียบในตารางที่ 24 และรูปที่ 33 และ จะสังเกตได้ว่า ค่าแรงดันยกขึ้นของน้ำที่ได้จากทั้ง 3 วิธีการคำนวณ มีความใกล้เคียงกัน โดยช่วงระยะเริ่มต้นของตัวอาคาร ค่าการคำนวณจากวิธี Ratio method จะสูงกว่าค่าจากการจำลอง GeoStudio แต่ช่วงระยะกึ่งกลางอาคารค่าการคำนวณจากวิธี Ratio

ตัวที่ 1), ที่ระยะ X = 30.42 เมตร (ตำแหน่งปลายสุดของกำแพงที่บ้น้ำตัวที่ 6), ที่ระยะ X = 72.07 เมตร (ตำแหน่งกึ่งกลางพื้นประตูประบายน้ำ) และที่ระยะ X = 96.50 เมตร (ตำแหน่งพื้นอาคารสลายพลังงาน) โดยแสดงผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 24

ตารางที่ 24 เปรียบเทียบผลการจำลองการไหลซึมกรณีมิติประตูประบายน้ำที่ได้ออกแบบ

จุดที่	ระยะ (m)	แรงดันยกขึ้น (t/m <sup>2</sup> )		
		GeoStudio	ทฤษฎี Flow nets	วิธี Ratio method
1	13.96	8.03	8.04	8.27
2	30.42	6.61	6.64	6.77
3	72.07	3.50	3.52	2.84
4	96.50	1.65	1.61	1.48

method กลับน้อยกว่าผลการจำลอง GeoStudio และการคำนวณทฤษฎี Flow nets อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการเคลื่อนที่น้ำตาม รูปที่ 32 ซึ่งสังเกตได้จากแนวการไหลของน้ำบริเวณกำแพงที่บ้น้ำได้อาคารมีการเคลื่อนตัวที่ไม่เป็นไปในลักษณะขนานตามผิวสัมผัสของแนวอาคารและกำแพงที่บ้น้ำ โดยแนวการไหลของน้ำมีลักษณะการไหลข้ามกำแพงที่บ้น้ำ จึงสรุปได้ว่า การไหลซึมผ่านได้ฐานรากของน้ำไม่เป็นไปตามทฤษฎีของ Lane

## 13. การปรับระยะห่างระหว่างกำแพงที่บ้น้ำ

ตามมาตรฐานกรมชลประทาน กล่าวว่า ระยะห่างของกำแพงที่บ้น้ำ 2 ตัวที่อยู่ใกล้กันต้องมีระยะห่างอย่างน้อย 2 เท่าของความลึกกำแพงที่บ้น้ำตัวที่ลึกกว่าและอัตราส่วนความปลอดภัยอยู่ที่ 1.30

จากการผลการจำลอง Seepage และ Uplift pressure กรณีมิติประตูประบายน้ำที่ได้ออกแบบ ที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 12 ได้ข้อสรุปว่าการไหลซึมผ่านได้ฐานรากไม่เป็นไปตามทฤษฎีของ Lane ผู้วิจัยจึงทำการทดลองปรับระยะห่างระหว่างกำแพงที่บ้น้ำ เพื่อหาระยะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับประตูประบายน้ำบ้านโปรงตาเพชรที่ตั้งอยู่บนดินทรายมีตะกอนทรายปน (SM) ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทาน Uplift pressure ซึ่งจะออกแบบความหนาพื้นบริเวณกึ่งกลางอาคารให้สามารถต้านทานแรงดันยกขึ้นได้



อาคารได้ด้วยสมการที่ (12) โดยใช้ความหนาพื้นอาคารคงที่ 1.20 เมตร โดยการใช้ความหนาพื้นจากระหว่างการก่อสร้างอาคาร และอิทธิพลของน้ำใต้ดินอาจมีระดับน้ำที่ใกล้ระดับผิวดินหลังปรับแล้ว ซึ่งจะทำให้การก่อสร้างมีความยากมากขึ้นเมื่อมีความหนาเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงใช้ในความหนาพื้นที่ได้ใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

ตารางที่ 25 เปรียบเทียบแรงดันยกขึ้นในวิธี Ratio method, โปรแกรม GeoStudio กับน้ำหนักคอนกรีตและการใช้อัตราส่วนความปลอดภัย

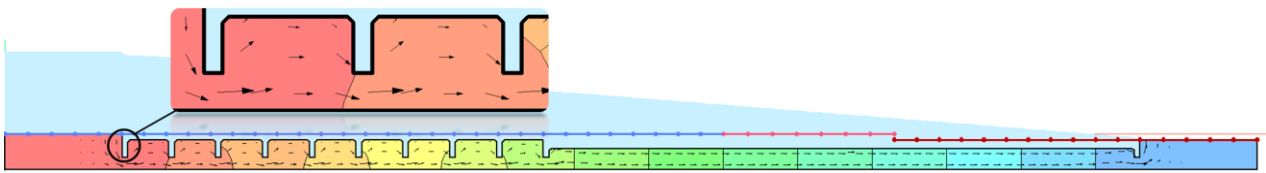
ระยะระหว่างกำแพงที่น้ำ (m)	วิธี Ratio method (t/m <sup>2</sup> )	GeoStudio (t/m <sup>2</sup> )	น้ำหนักคอนกรีต (t/m <sup>2</sup> )	F.S.
4.50	2.76	3.350	2.88	1.35
5.00	2.73	3.231	2.88	1.37
6.00	2.65	3.062	2.88	1.41
7.00	2.60	2.986	2.88	1.43
8.00	2.54	2.838	2.88	1.47
9.00	2.49	2.734	2.88	1.50
10.00	2.45	2.715	2.88	1.53
11.00	2.40	2.555	2.88	1.56
12.00	2.36	2.430	2.88	1.59
13.00	2.32	2.404	2.88	1.62
14.00	2.28	2.337	2.88	1.65
15.00	2.25	2.276	2.88	1.68
16.00	2.22	2.219	2.88	1.71

การวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบกับ Uplift pressure ด้วยวิธี Ratio method และโปรแกรม GeoStudio จะใช้โมเดลประตูระบายน้ำตามรูปที่ 27 ที่ได้ออกแบบความหนาพื้นให้เท่ากันตลอดกึ่งกลางประตูอยู่ที่ 1.2 เมตร

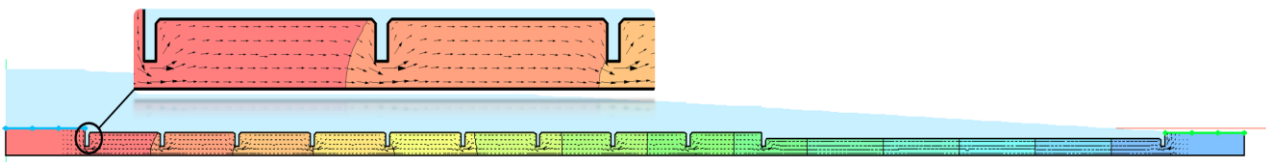
ซึ่งผลการวิเคราะห์จะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้ก็ต่อเมื่อน้ำหนักของคอนกรีตที่กระทำกับพื้น มีค่ามากกว่าแรงดันยกขึ้นจาก 2 วิธีการข้างต้น

จากตารางที่ 25 เปรียบเทียบแรงดันยกขึ้นพบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบความหนาพื้นประตูระบายน้ำการศึกษาของบทความนี้อยู่ที่ 1.50 และระยะห่างระหว่างกำแพงที่น้ำที่เหมาะสมอยู่ที่ 9 เมตรขึ้นไป

จากรูปที่ 34 และ 35 จะแสดงผลการเปรียบเทียบการไหลซึมของน้ำก่อนและหลังการปรับระยะห่างระหว่างกำแพงที่น้ำ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมของการไหลซึมที่สอดคล้องกับทฤษฎีของ Lane โดยก่อนการปรับระยะห่าง เส้นการไหลซึมของน้ำมีลักษณะการไหลซึมผ่านชั้นดินได้อย่างอิสระ ทำให้แรงดันน้ำใต้ฐานรากเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีการปรับระยะห่างที่เหมาะสมทำให้การไหลของน้ำบริเวณกำแพงที่น้ำจะมีการเคลื่อนตัวเป็นไปในลักษณะขนานตามผิวสัมผัสของแนวอาคารและกำแพงที่น้ำ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Lane จากการวิเคราะห์ที่ได้ข้อสรุปว่า การออกแบบความหนาพื้นประตูระบายน้ำด้วยอัตราส่วนความปลอดภัยที่ 1.3 ตามมาตรฐานกรมชลประทานด้วยวิธี Ratio method อาจไม่เพียงพอต่อการออกแบบให้พื้นอาคารคอนกรีตให้สามารถรับแรงดันยกขึ้นได้อาคารได้ในกรณีที่ดินใต้ฐานรากเป็นดินชนิดทรายมีตะกอนทรายปน (SM) เนื่องจากการไหลของน้ำมีลักษณะดังรูปที่ 34 คือ การไหลของน้ำบริเวณกำแพงที่น้ำไม่เป็นที่ไปตามทฤษฎีของ Lane ดังนั้น หากใช้ทฤษฎีดังกล่าวในการออกแบบพื้นประตูระบายน้ำควรคำนึงถึงอัตราส่วนความปลอดภัยในการออกแบบที่เหมาะสมด้วยสำหรับค่า permeability ในดินชนิดต่างๆ



รูปที่ 34 เส้นทางการไหลซึมของน้ำผ่านกำแพงที่น้ำก่อนปรับระยะ



รูปที่ 35 เส้นทางการไหลซึมของน้ำผ่านกำแพงที่น้ำหลังปรับระยะ

#### 14. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาที่กล่าวมาทั้งหมด ผู้วิจัยได้สรุปผลการศึกษาเป็น 3 ประเด็นได้แก่ ประเด็นที่ 1 คือ ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจำลองการไหลและผลจากการคำนวณ ประเด็นที่ 2 คือ ประสิทธิภาพในการสลายพลังงานของอาคารสลายพลังงาน USBR Stilling Basin Type II รวมถึงการปรับปรุงระยะวางชิ้นส่วน Baffle pier และประเด็นที่ 3 คือ ผลการวิเคราะห์การไหลซึมผ่านได้อาคารและแรงดันยกขึ้น รวมถึงการใช้ค่า Factor of

safety สำหรับการออกแบบความหนาพื้นอาคารและการปรับระยะห่างระหว่าง Cutoff wall

ในประเด็นที่ 1 โมเดลกรณี 1 ช่องบานระบายและโมเดลกรณี 10 ช่องบานระบายให้ผลจำลองค่าความลึกก่อนน้ำกระโดดและความลึกหลังเกิดน้ำกระโดดที่ใกล้เคียงกับการคำนวณ โดยเฉพาะในการจำลองน้ำกระโดดที่ทำให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับการคำนวณอย่างมาก อีกทั้งผลการทดสอบทั้งกรณีทดสอบ 1 บานระบายและกรณีทดสอบ 10 บานระบายมีความสอดคล้องกันและสามารถใช้งานทดแทนกันได้

ในประเด็นที่ 2 อาคารสลายพลังงานแบบ USBR Stilling Basin Type III ส่งผลต่อค่าความลึกก่อนน้ำกระโดด ทำให้ค่าความลึกก่อนน้ำกระโดดมีค่าสูงขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวเกิดขึ้นทั้งในโมเดลกรณี 1 ช่องบานระบายและโมเดลกรณี 10 ช่องบานระบาย ความแตกต่างระหว่างผลคำนวณกับผลจำลองจะมากในระยเปิดบานระบายน้อยและจะลดลงเมื่อเปิดบานระบายมากขึ้น ประสิทธิภาพของอาคารสลายพลังงานแบบ USBR Stilling Basin Type III สำหรับประตูระบายน้ำ มีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานมากที่สุดในระยเปิดบานระบายน้อย โดยที่มีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานมากที่สุด 53.25% ที่ระยเปิดบานระบาย 0.50 เมตร และประสิทธิภาพในการสลายพลังงานจะลดลงเมื่อเปิดบานระบายมากขึ้น ทั้งนี้ในกรณีระยเปิดบานระบาย 2.50 เมตร การขยับขึ้นส่วน Baffle pier ออกห่างจาก Chute block มากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการสลายพลังงานสูงขึ้น โดยระยที่เหมาะสมที่สุดในการวางชิ้นส่วน Baffle pier คือ 3 เท่าของระยตามคำแนะนำของ USBR (ในการศึกษานี้อยู่ที่ 9 เมตรห่างจาก Chute block) มีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานพลังงานเพิ่มสูงขึ้นจาก 18.98% เป็น 27.49%

ในประเด็นที่ 3 ผลการวิเคราะห์การไหลซึมผ่านใต้อาคารโดยใช้โปรแกรม GeoStudio ในกรณีมีเข็มพืดและกรณีไม่มีเข็มพืด รวมถึงกรณีประตูระบายน้ำที่ได้ออกแบบ ให้ผลการวิเคราะห์อัตราการไหลซึมผ่านใต้อาคารและแรงดันยกขึ้นที่มีความสอดคล้องกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี Flow nets แรงดันยกขึ้นในกรณีมีเข็มพืดและกรณีไม่มีเข็มพืดให้ผลวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยวิธี Ratio method แต่ในกรณีประตูระบายน้ำที่ได้ออกแบบ ช่วงกลางประตูระบายน้ำมีความแตกต่างค่อนข้างมาก เกิดจากการไหลซึมผ่านใต้อาคารมีลักษณะการไหลข้าม Cutoff wall ซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎีของ Lane ทำให้ Factor of safety ตามมาตรฐานของกรมชลประทานที่ 1.30 ไม่เพียงพอในการออกแบบความหนาพื้นอาคารให้น้ำหนักคอนกรีตสามารถต้านทานแรงดันยกขึ้นได้ การหาค่า Factor of safety โดยการเพิ่มระย Cutoff wall เพื่อลดการที่น้ำไหลซึมข้าม Cutoff wall จากผลที่ได้ น้ำหนักคอนกรีตสามารถต้านทานแรงดันยกขึ้นได้ที่ Factor of safety เท่ากับ 1.50 โดยมีระยห่างระหว่าง Cutoff wall เริ่มต้นที่ 9 เมตรเป็นต้นไป โดยข้อมูล ระดับน้ำเป็นค่าวิกฤติในการออกแบบ แต่ในความเป็นจริงระดับน้ำอาจมีค่าต่ำกว่าที่กำหนดหรืออาจมีระดับน้ำด้านท้ายเข้ามาช่วยต้านทาน Uplift pressure ด้วย และค่า Permeability จากผลทดสอบดินในแต่ละพื้นที่ที่มีผลต่อการการไหลซึมของน้ำทำให้มีผลต่อระยห่างระหว่าง Cutoff wall, Factor of safety และ Uplift pressure ที่เกิดขึ้น

### 15. ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะในงานวิจัย

ผลการศึกษาด้านชลศาสตร์ของงานวิจัยนี้เป็นเพียงการทำ Numerical model เท่านั้น และในปัจจุบันประตูระบายน้ำบ้านโปรงตาเพชรยังไม่มีก่อสร้างขึ้นจริง จึงไม่มีข้อมูลภาคสนามเทียบเคียงผล

การปรับปรุงมิติรูปร่างของประตูระบายน้ำในงานวิจัยนี้ เป็นเพียงแนวคิดริเริ่มในการศึกษาเพื่อเป็นการยืนยันผลการศึกษาที่ได้กล่าวมาข้างต้น ควรมีการศึกษา Physical model ควบคู่ด้วย

การจำลอง CFD ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในด้านของจำนวน Element ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำในการจำลอง หากสามารถเพิ่มความละเอียดในการ Meshing จะทำให้ผลการจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น

งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการจำลอง CFD ให้ครอบคลุมได้ทุกสถานการณ์ ที่อาจเกิดขึ้นระหว่างใช้งานประตูระบายน้ำ เช่น กรณีที่บานระบายเปิดไม่เท่ากัน กรณีที่ปิดบานระบายสลับกัน กรณีที่ปิดบานระบายทางด้านข้าง กรณีมีน้ำหลากเข้าหัวงานโดยมีเศษซากหรือโคลน เป็นต้น

ค่า Permeability, ค่า Manning's n และค่า  $C_d$  บานระบาย จะส่งผลต่อผลการศึกษาเชิงตัวเลขหรือเชิงสถิติได้ หากตัวแปรดังกล่าวเปลี่ยนไปเนื่องจากตัวแปรดังกล่าวเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อปัจจัยในการวิเคราะห์ ทั้งทางด้านวิศวกรรมชลศาสตร์ และวิศวกรรมปฐพี โดยเฉพาะค่า Manning's n และค่า  $C_d$  บานระบาย จะส่งผลต่อเลือกกรณีสำหรับในจำลอง CFD อีกด้วย

งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการจำลองถึงอิทธิพลของน้ำด้านท้าย (Tailwater effect) ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสลายพลังงานของ USBR Stilling Basin Type III ได้ ทว่ามีการศึกษาอิทธิพลของน้ำด้านท้ายเรื่อง The Effect of Tailwater on the USBR Type III Stilling Basin Model ของ Gilang idfi, Umboro Lasminto และ Anak Agung Gde Kartika ได้ผลการศึกษาว่า อิทธิพลของน้ำด้านท้ายจะช่วยทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของ Stilling Basin ให้ดีขึ้น [2]

การเลือกใช้และออกแบบมิติรูปร่างของ Stilling Basin ที่นำมาใช้กับประตูระบายน้ำ ในปัจจุบันนิยมใช้ตามมาตรฐานของ USBR ซึ่งจะเหมาะสมสำหรับอาคารชลศาสตร์ที่มีการไหลชันด้านท้าย (Steep slope) มากกว่านำมาใช้กับอาคารบังคับน้ำที่มีการไหลในแนวราบ (Mild slope) เช่น ประตูระบายน้ำ ดังนั้น จึงควรคิดค้นหรือปรับปรุงการออกแบบมิติรูปร่างของ Stilling Basin ที่เหมาะสมกับประตูระบายน้ำต่อไปอนาคต

ในการออกแบบพื้นประตูระบายน้ำในกรมชลประทานนิยมใช้วิธี Ratio method จากทฤษฎี Weighted creep เนื่องจากมีวิธีการคำนวณที่ง่าย แต่มีข้อผิดพลาดของความต่างแรงดันยกขึ้นที่ไม่ควรมองข้าม ควรมีการวิเคราะห์แรงดันยกขึ้นใต้อาคารผ่านโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเทียบเคียงค่า Uplift pressure ด้วย

ควรมีการศึกษาระยะห่างระหว่าง Cutoff wall และ Factor of safety ที่เหมาะสมสำหรับดินประเภทต่างๆตามค่า Permeability เพื่อกำหนดเป็นมาตรฐานใหม่สำหรับการออกแบบประตูระบายน้ำกรมชลประทาน และยังสามารถพัฒนาต่อยอดแบบจำลองเพื่อวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับอิทธิพลของการไหลซึมด้านข้างของประตูระบายน้ำได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Al-Hashimi, S. A. M., Saeed, K. A., & Nahi, T. N. (2019). Experimental and CFD modeling of hydraulic jumps forming at submerged weir. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s40030-019-00381-z>
- [2] Idfi, G., Lasminto, U., & Kartika, A. A. G. (2024). The effect of tailwater on the USBR Type III stilling basin model. *Evolutionary Studies in Imaginative Culture*, 8(1), 1108–1119. <https://doi.org/10.70082/esic/8.1.089>
- [3] United States Bureau of Reclamation. (1987). *Design of small dams* (3rd ed., pp. 393–394). U.S. Government Printing Office.
- [4] พรพจน์ ตันเส็ง. (2554). *ปฐพีกลศาสตร์* (น. 132–149) [หนังสืออิเล็กทรอนิกส์]. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. <https://j5.rtarf.mi.th/web/doc/ขอบเขตสอบ2564/นทพ.ปรับคุณภาพ/ปฐพีกลศาสตร์.pdf>
- [5] กิรติ สิวัจจนกุล. (ไม่ปรากฏปี). *ชลศาสตร์* (พิมพ์ครั้งที่ 1). บริษัท เอ.พี. กราฟิค ดีไซน์และการพิมพ์ จำกัด.
- [6] สันติ ทองพานัก. (2552). *ประมวลหลักปฏิบัติวิชาชีพในการออกแบบฝาย* (น. 20) [หนังสืออิเล็กทรอนิกส์]. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. <https://irre.ku.ac.th/books/pdf/15.pdf>