

การสลายพลังงานและความเร็วท้ายรางบนรางขั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้น

Energy Dissipation and Outlet Velocity on Stepped Channels with End Sills

ทศพล จตุระบุต ชัยยุทธ ชินณะราศรี และ อุดมศักดิ์ อิศรางกูร ณ อยุธยา

ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมแหล่งน้ำ (WAREE)

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

Thodsapol Chaturabul, Chaiyuth Chinnarasri and Udomsak Israngkura

Water Resources Engineering Research Lab. (WAREE)

Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140

Tel: 0-2470-9137 E-Mail: chaiyuth.chi@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาจากการทดลองเพื่อหาการสลายพลังงานและความเร็วการไหลท้ายรางขั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้น ตัวรางกว้าง 0.40 ม. และยาว 3.0 ม. โดยมีความลาดชัน 30° 45° และ 60° ตามลำดับ ขั้นบันไดมีความสูงร้อยละ 5 ของความสูงราง ความสูงของธรณีที่ปลายขั้นคือ 0.0, 0.5, 1.0 และ 1.5 ซม. ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า ตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการสลายพลังงานและความเร็วท้ายรางคือ ความลาดเอียงของราง Drop number และธรณีที่ปลายขั้น การสลายพลังงานของการไหลบนรางขั้นบันไดจะลดลง เมื่อค่า Drop number และความลาดชันของรางเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของธรณีที่ปลายขั้นเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามความเร็วท้ายรางขั้นบันไดจะเพิ่มขึ้น เมื่อค่า Drop number และความลาดชันของรางเพิ่มขึ้น แต่ลดลงเมื่อความสูงของธรณีที่ปลายขั้นเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ของการสลายพลังงานของการไหลบนรางขั้นบันไดและความเร็วการไหลท้ายรางกับตัวแปรที่สำคัญได้แสดงในรูปสมการ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ระหว่าง 0.895 ถึง 0.996

Abstract

This paper presents the results of the experimental study on the energy dissipation and outlet velocity on stepped channels with end sills. The channels are 0.40 m wide and 3.0 m long with the slopes of 30°, 45° and 60°, respectively. The step height is 5% of the channel height. The heights of the end sill are 0.0, 0.5, 1.0 and 1.5 cm, respectively. It was found that the important variables affecting the energy dissipation and outlet velocity were channel slope, Drop number, and end sill. The energy dissipation decreased when Drop number and the slope of the channel increased but increased when the height of end sill increased. In contrast, the outlet velocity increased

when Drop number and the slope of channel increased. From these results, the relations of energy dissipation and outlet velocity on stepped channel and the important variables were formed with the R^2 in the ranges of 0.895 and 0.996.

1. บทนำ

รางขั้นบันไดเป็นทางน้ำเปิดซึ่งมีพื้นรางเป็นขั้นบันได รางประเภทนี้ได้ถูกนำมาใช้เป็นรางระบายน้ำผ่านบริเวณที่มีความลาดชันสูง เช่น ทางระบายน้ำคันของเขื่อน หรือระบบระบายน้ำของถนนที่ตัดผ่านภูเขา ในช่วง 2-3 ทศวรรษที่ผ่านมา การออกแบบและก่อสร้างรางขั้นบันไดได้รับความนิยมน้อยลง อันเป็นผลมาจากการประยุกต์ใช้วัสดุประเภท Roller-compacted concrete และ Polymer-coated gabion wire ในการก่อสร้างเขื่อนและทางน้ำคัน ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีวิธีการก่อสร้างที่สอดคล้องกับรางขั้นบันได

Essery และ Hornor [1] เป็นบุคคลแรกที่ทำการศึกษาทดลองอย่างจริงจังเกี่ยวกับการไหลบนรางขั้นบันไดทั้งแบบพื้นราบและแบบพื้นเอียง พร้อมทั้งเสนอกราฟสำหรับออกแบบรางขั้นบันได สำหรับการศึกษากลับมาเกี่ยวกับการสลายพลังงานของรางขั้นบันได มีผู้สนใจทำการทดลองมากมาย เช่น Stephenson [2] Rajaratnam [3] Diez-Cascon และคณะ [4] Peyras และคณะ [5] Christodoulou [6] Israngkura และ Chinnarasri [7] Fratino และคณะ [8] และ Pinheiro และ Fael [9] เป็นต้น

ในปี พ.ศ. 2537 Chamani และ Rajaratnam [10] ได้เสนอสมการคำนวณการสลายพลังงานบนรางขั้นบันไดแบบพื้นราบขั้นเป็นครั้งแรก และในปีเดียวกัน Chanson [11] ก็เสนอสมการคำนวณการสลายพลังงานในการไหลแบบ Nappe flow และ Skimming flow ทั้งแบบมีประตูป้องกันน้ำและไม่มี ผลจากรายงานของ Chanson [11] ทำให้เกิดบทวิเคราะห์และวิจารณ์ตามมาหลายฉบับ เช่น Ohtsu และ Yasuda [12] Kells [13] และ Matos และ Quintela [14] หลังจากนั้น Chanson และ

RECEIVED 16 September, 2003

ACCEPTED 25 November, 2003

Toombes [15] ก็ได้เสนอผลการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการสลายพลังงานในรางที่มีความลาดชันน้อย

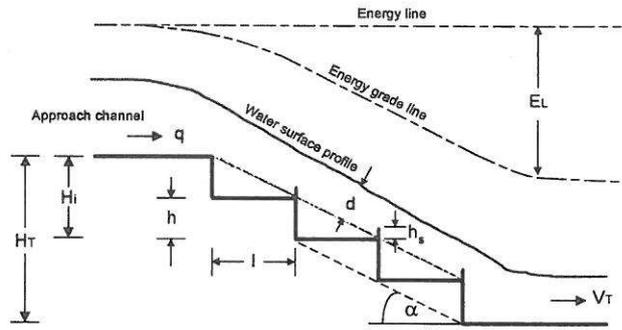
สำหรับรายงานการศึกษาเกี่ยวกับรางชันบันไดแบบมีธรรมชาติที่ปลายชัน พบว่า Poggi [16-17] เป็นบุคคลแรกที่ทำการการศึกษาเกี่ยวกับการไหลบนอาคารลระดับที่มีธรรมชาติที่ปลาย โดยศึกษาเกี่ยวกับการไหลแบบ Nappe flow ที่มีกระโดดของน้ำบนพื้นอาคาร และพบว่าอาคารลระดับที่มีธรรมชาติที่ปลายสามารถสลายพลังงานได้มากกว่าอาคารลระดับทั่วไปเล็กน้อย ต่อมา Vittal และ Porey [18] ก็ได้ทำการศึกษาเพื่อออกแบบทางน้ำล้นชันบันไดแบบมีธรรมชาติที่ปลายชันโค้งมนแบบ Ogee ของเขื่อน Tehri ในประเทศซาอุดีอาระเบีย และเมื่อไม่นานมานี้ Peruginelli และ Pagliara [19] ก็ได้ศึกษาการสลายพลังงานของรางชันบันไดแบบมีธรรมชาติที่ปลายชันเทียบกับรางชันบันไดแบบพื้นราบ ผลที่ได้พบว่ารางชันบันไดแบบมีธรรมชาติที่ปลายชันสามารถสลายพลังงานได้มากกว่ารางชันบันไดแบบพื้นราบเล็กน้อย ในขณะที่ Aigner [20] ได้สร้างสมการพื้นฐานจากการวิเคราะห์ตัวแปรที่สำคัญ เพื่อใช้เป็นแนวทางการออกแบบรางชันบันไดแบบอ่าง

ถึงแม้ว่าการศึกษาเกี่ยวกับการไหลบนรางชันบันไดมีการศึกษามากกว่า 10 ปี แต่ก็ยังอยู่ในวงจำกัด ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาชลศาสตร์การไหลบนรางชันบันไดแบบพื้นราบ งานศึกษาหลายฉบับยังต้องการการศึกษาเพิ่มเติม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาเกี่ยวกับชลศาสตร์การไหลบนรางชันบันไดแบบมีธรรมชาติที่ปลายชันหรือแบบมีอ่าง และรางชันบันไดรูปแบบอื่นซึ่งมีผู้ทำศึกษาน้อยมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าววัตถุประสงค์ของการศึกษานี้จึงเป็นการทดลองเกี่ยวกับการไหลของน้ำบนรางชันบันไดแบบมีธรรมชาติที่ปลายชัน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการสลายพลังงาน และความเร็วการไหลท้ายรางชันบันไดเทียบกับตัวแปรการออกแบบรางอื่นๆ ในรูปตัวแปรไร้มิติ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบรางชันบันไดแบบมีธรรมชาติที่ปลายชันรวมถึงอาคารสลายพลังงานที่ปลายรางต่อไป

2. การวิเคราะห์มิติ

ในสภาวะการไหลใดๆ การสลายพลังงานของรางชันบันไดแบบมีธรรมชาติที่ปลายชัน (E_L) จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (q) ความสูงรวมของรางชันบันได (H_T) ความลาดชันของราง (α) ความสูงลูกตั้งของชันบันได (h) ความสูงของธรรมชาติที่ปลายชัน (h_s) และความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) ซึ่งตัวแปรต่างๆ นี้แสดงไว้ดังรูปที่ 1 และเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้เป็น

$$E_L = f_n(q, H_T, \alpha, h, h_s, g) \quad (1)$$



รูปที่ 1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการสลายพลังงานของรางชันบันไดแบบมีธรรมชาติที่ปลายชัน

การศึกษาค้นคว้านี้ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการไหลบนรางชันบันไดแบบมีธรรมชาติที่ปลายชันให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ โดยใช้การวิเคราะห์มิติทฤษฎีของ Buckingham- π ซึ่งจากสมการที่ 1 สามารถวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติได้เป็น

$$\frac{E_L}{H_T} = f_1\left(\frac{q^2}{gH_T^3}, \frac{h_s}{h}, \alpha\right) \quad (2)$$

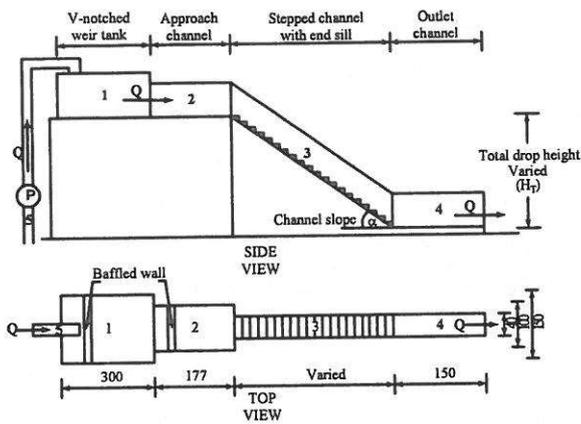
ในทำนองเดียวกัน พลังงานที่เหลืออยู่บริเวณท้ายรางชันบันไดในรูปของความเร็วมัธยัสถ์จะเขียนได้เป็น

$$\frac{V_T}{\sqrt{gH_T}} = f_2\left(\frac{q^2}{gH_T^3}, \frac{h_s}{h}, \alpha\right) \quad (3)$$

เมื่อ E_L/H_T เป็นอัตราส่วนการสูญเสียพลังงานของการไหลบนรางชันบันไดต่อความสูงราง $V_T/\sqrt{gH_T}$ เป็นความเร็วการไหลไร้มิติที่ท้ายรางชันบันได V_T เป็นความเร็วการไหลที่ท้ายรางชันบันได q^2/gH_T^3 เป็นค่า Drop number h_s/h เป็นความสูงสัมพัทธ์ของธรรมชาติที่ปลายชัน และ α เป็นความลาดชันของรางชันบันได

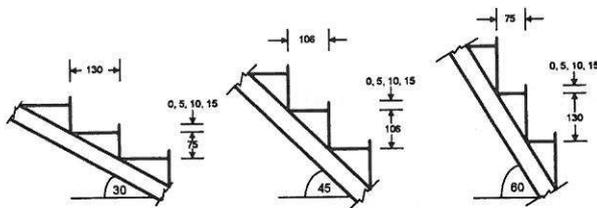
3. อุปกรณ์และวิธีการ

ผังการจัดวางอุปกรณ์การทดลองแสดงโดยสังเขปดังรูปที่ 2 อุปกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วย ถังรับน้ำซึ่งติดตั้งฝายวัดอัตราการไหลเป็นรูปสามเหลี่ยม ปากทางเข้าราง รางชันบันได และรางระบายน้ำออก ซึ่งแสดงไว้ดังหมายเลขที่ 1 ถึง 4 ในรูปที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 2 ผังการจัดวางอุปกรณ์ทดลอง

รางชั้นบันไดที่ใช้ในการศึกษาเป็นรางชั้นบันไดแบบมีรชมีที่ปลายชั้น ตัวรางสร้างด้วยแผ่นพลาสติกใส มีความกว้าง 0.40 เมตร ยาว 3.0 เมตร มีความลาดชัน 30° 45° และ 60° และมีความสูงในแนวตั้งเท่ากับ 1.50, 2.12, และ 2.60 เมตร ตามลำดับ ชั้นบันไดมีความสูงร้อยละ 5 ของความสูงราง และมีความสูงของรชมีที่ปลายชั้นบันไดเท่ากับ 0.0, 0.5, 1.0, และ 1.5 ซม. ตามลำดับ มิติของชั้นบันไดและรชมีที่ปลายชั้นแสดงไว้ในรูปที่ 3



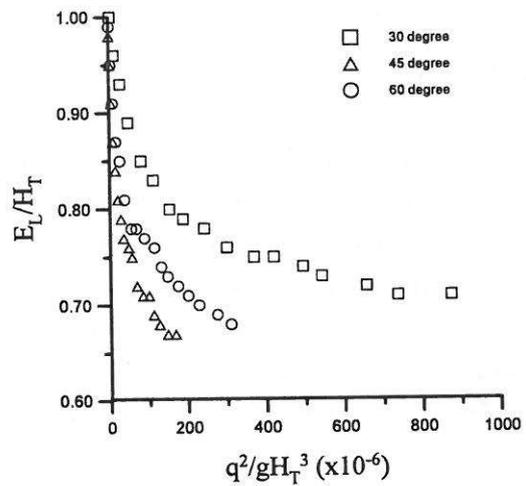
รูปที่ 3 มิติของชั้นบันไดและรชมีที่ปลายชั้นในหน่วยมิลลิเมตร

การวัดความลึกและความเร็วการไหลกระทำ 2 จุด คือ บริเวณปากทางเข้าราง ห่างจากชั้นบันไดชั้นแรกประมาณ 1 เท่าของความยาวลูกนอน เพื่อลดอิทธิพลของการไหลย้อนกลับ และบริเวณท้ายรางระบายน้ำออก ห่างจากชั้นบันไดชั้นสุดท้ายประมาณ 3-4 เท่าของความยาวลูกนอนของชั้นบันได เพื่อลดอิทธิพลของการไหลแบบปั่นป่วนและการผสมกันของน้ำและอากาศ ความลึกการไหลในหน้าตัดของรางวัดโดยใช้ Vernier-depth gauge ส่วนความเร็วการไหลของการศึกษาครั้งนี้ได้วัด 2 วิธี คือ คำนวณจากความลึกของน้ำในหลอดปิดตอด และคำนวณจากสมการต่อเนื่อง ผลการคำนวณจากทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 10 ดังนั้นการคำนวณการสลายพลังงานและความเร็วการไหลของการศึกษาครั้งนี้ จึงเลือกใช้ผลจากวัดโดยตรงด้วยหลอดปิดตอด

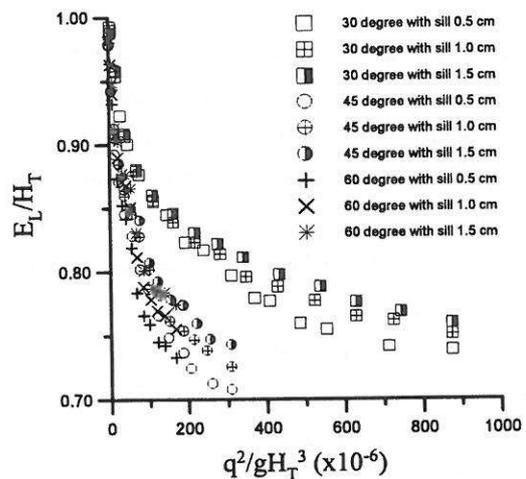
การทดลองทำโดยปล่อยน้ำเข้าสู่รางชั้นบันได ผ่านถึงวัดอัตราการไหลและปากทางเข้าราง เข้าสู่รางชั้นบันได แล้วไหลลงทางระบายน้ำออก เมื่อการไหลเข้าสู่สภาวะการไหลแบบคงที่ จึงทำการวัดอัตราการไหล ความลึก และความเร็วการไหล

4. การสลายพลังงานของการไหลบนรางชั้นบันได

การศึกษานี้ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการสูญเสียพลังงานการไหลบนรางชั้นบันได (E_L/H_T) กับค่า Drop number (q^2/gH_T^3) ของรางชั้นบันไดแบบพื้นราบ ($h_s = 0.0$ ซม.) และแบบมีรชมีที่ปลายชั้น ($h_s = 0.5, 1.0$ และ 1.5 ซม.) ได้ถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ความลาดเอียงของชั้นบันไดต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4



(ก) รางชั้นบันไดแบบพื้นราบ



(ข) รางชั้นบันไดแบบมีรชมีที่ปลายชั้น

รูปที่ 4 การสลายพลังงานกับค่า Drop number

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า ความลาดเอียงของรางขึ้นบันได รวมถึง Drop number และธรรมชาติที่ปลายชั้นมีอิทธิพลต่อการสลายพลังงาน โดยรางขึ้นบันไดที่มีความลาดชันน้อยจะสลายพลังงานได้มากกว่ารางขึ้นบันไดที่มีความลาดชันมาก ซึ่งในช่วงที่ Drop number มีค่าน้อย การสลายพลังงานของรางขึ้นบันไดที่มีความลาดชันต่างกันจะใกล้เคียง แต่เมื่อค่า Drop number มากขึ้น ความแตกต่างของการสลายพลังงานของรางขึ้นบันไดที่มีความลาดชันต่างกันก็จะมากขึ้นด้วย และเมื่ออัตราการไหลในรางมีค่ามาก การสลายพลังงานของการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบที่มีความลาดชัน 45° และ 60° (รูปที่ 4 ก) จะน้อยกว่ารางขึ้นบันไดแบบพื้นราบที่มีความลาดชัน 30° ประมาณร้อยละ 7 และ 12 ตามลำดับ ในขณะที่การสลายพลังงานของการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบมีธรรมชาติที่ปลายชั้นที่มีความลาดชัน 45° และ 60° (รูปที่ 4 ข) จะน้อยกว่ารางขึ้นบันไดแบบมีธรรมชาติที่ปลายชั้นที่มีความลาดชัน 30° ประมาณร้อยละ 9 ของพลังงานทั้งหมด

การสลายพลังงานในรางขึ้นบันไดแบบมีธรรมชาติที่ปลายชั้นที่มีความลาดชัน 45° และ 60° มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจาก ในช่วงอัตราการไหลที่ทำการศึกษา การไหลบนรางขึ้นบันไดแบบมีธรรมชาติที่ปลายชั้นที่มีความลาดชัน 60° จะเข้าสู่สภาวะการไหลแบบ Skimming flow เฉพาะในช่วงปลายของราง ดังนั้นการสลายพลังงานส่วนใหญ่จึงเกิดจากการไหลตก การกระโดดข้ามขั้น และการพุ่งตัวของน้ำออกจากธรรมชาติมากกว่าที่จะเกิดจากการไหลวนในช่องว่างของบันได ทำให้มีการสลายพลังงานมาก และมีปริมาณใกล้เคียงกับรางขึ้นบันไดแบบมีธรรมชาติที่ปลายชั้นที่มีความลาดชัน 45°

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของ Drop number พบว่าการสลายพลังงานจะลดลงเมื่อค่า Drop number เพิ่มขึ้น โดยในช่วงที่ Drop number มีค่าน้อย การสลายพลังงานจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่า Drop number เพิ่มขึ้น แต่เมื่อ Drop number มีค่าสูง การสลายพลังงานจะค่อยๆ ลดลงและมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อค่า Drop number มากขึ้น

สำหรับอิทธิพลของความสูงของธรรมชาติที่ปลายชั้นพบว่า รางขึ้นบันไดที่มีความสูงของธรรมชาติที่ปลายชั้นมากจะมีการสลายพลังงานมากกว่ารางขึ้นบันไดที่มีความสูงของธรรมชาติที่ปลายชั้นน้อย ซึ่งรวมถึงรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบด้วย โดยในช่วงที่ Drop number มีค่าน้อย การสลายพลังงานของรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีธรรมชาติที่ปลายชั้นจะใกล้เคียงกัน การสลายพลังงานส่วนใหญ่เกิดจากการไหลตกและการกระโจนตัวของน้ำบนชั้นบันได แต่เมื่อ Drop number มีค่ามากขึ้น ความสูงของธรรมชาติที่ปลายชั้นจะมีอิทธิพลต่อการสลายพลังงานอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากความสูงของธรรมชาติที่ปลายชั้นได้ช่วยเพิ่มขนาดของอ่างบนชั้นบันได ทำให้การไหลวนของน้ำต้องการพลังงานในการสร้างเสถียรภาพมากขึ้น

ในรางขึ้นบันไดที่มีความลาดชัน 30° การสลายพลังงานเนื่องจากการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีธรรมชาติที่ปลายชั้นที่มีความสูงของธรรมชาติ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซม. ($h_2/h = 0, 0.07, 0.13$ และ

0.20) จะเข้าใกล้ค่าคงที่ประมาณ 0.68, 0.74, 0.75 และ 0.76 ตามลำดับ ในขณะที่รางขึ้นบันไดที่มีความลาดชัน 45° การสลายพลังงานเนื่องจากการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีธรรมชาติที่ปลายชั้นที่มีความสูงของธรรมชาติ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซม. ($h_2/h = 0, 0.05, 0.09$ และ 0.14) จะเข้าใกล้ค่าคงที่ประมาณ 0.66, 0.71, 0.73 และ 0.74 ตามลำดับ ส่วนรางขึ้นบันไดที่มีความลาดชัน 60° การสลายพลังงานเนื่องจากการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีธรรมชาติที่ปลายชั้นที่มีความสูงของธรรมชาติ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซม. ($h_2/h = 0, 0.04, 0.08$ และ 0.12) จะเข้าใกล้ค่าคงที่ประมาณ 0.65, 0.73, 0.75 และ 0.77 ตามลำดับ และเมื่อมองภาพรวมเปรียบเทียบระหว่างการสลายพลังงานเนื่องจากการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีธรรมชาติที่ปลายชั้น พบว่ารางขึ้นบันไดแบบมีธรรมชาติที่ปลายชั้นสามารถสลายพลังงานได้มากกว่ารางขึ้นบันไดแบบพื้นราบประมาณร้อยละ 8

จากโค้งความสัมพันธ์ในรูปที่ 4 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ของการสลายพลังงานกับค่า Drop number จะได้ความสัมพันธ์ในรูปของสมการยกกำลัง คือ

$$\frac{E_L}{H_T} = \eta_1 \left(\frac{q^2}{gH_T^3} \right)^{\eta_2} \quad (4)$$

เมื่อ η_1 และ η_2 เป็นสัมประสิทธิ์และตัวเลขยกกำลังของสมการ

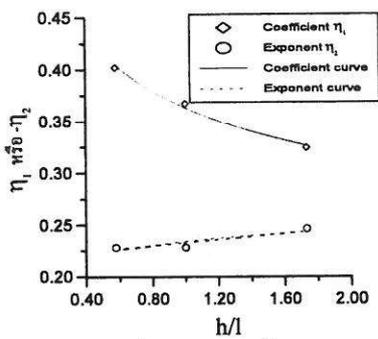
จากผลการศึกษาจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ η_1 ตัวเลขยกกำลัง η_2 และค่าสหสัมพันธ์ของชุดข้อมูล (R^2) ของรางขึ้นบันไดทั้งแบบพื้นราบและแบบมีธรรมชาติที่ปลายชั้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์และตัวเลขยกกำลังของสมการการสลายพลังงาน

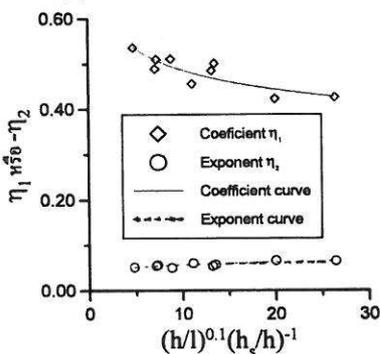
ความลาดชัน (องศา)	h/l	h_2/h	η_1	η_2	R^2
30	0.577	0.00	0.402	-0.076	0.977
		0.07	0.501	-0.057	0.961
		0.13	0.510	-0.056	0.991
		0.20	0.536	-0.051	0.982
45	1.000	0.00	0.367	-0.076	0.975
		0.05	0.423	-0.066	0.958
		0.09	0.456	-0.06	0.946
60	1.732	0.00	0.324	-0.082	0.969
		0.04	0.426	-0.065	0.933
		0.08	0.485	-0.054	0.898
		0.12	0.511	-0.050	0.895

เนื่องจากสมการการสลายพลังงานของการไหลบนราง
 ชันบันไดที่ได้มีความหลากหลาย และไม่สะดวกในการใช้งาน การศึกษา
 ครั้งนี้จึงได้นำค่าสัมประสิทธิ์ η_1 และตัวเลขยกกำลัง η_2 ที่แสดงไว้ใน
 ตารางที่ 1 มาพล็อตหาความสัมพันธ์กับตัวแปรที่ใช้ออกแบบราง
 ชันบันได ได้โค้งความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยรูปที่ 5ก เป็นโค้ง
 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ η_1 และตัวเลขยกกำลัง η_2 ซึ่งจัดอยู่ใน
 รูป η_1 และ $-\eta_2$ กับสัดส่วนความสูงของลูกตั้งและความยาวลูกนอนของ
 รางชันบันไดแบบพื้นราบ (h/l) ส่วนรูปที่ 5ข เป็นโค้งความสัมพันธ์ของ
 ค่าสัมประสิทธิ์ η_1 และตัวเลขยกกำลัง η_2 ซึ่งจัดอยู่ในรูป η_1 และ $-\eta_2$
 กับตัวแปรออกแบบรางชันบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้น ซึ่งเป็นผลคูณ
 ของความลาดชันของรางกับความสูงของธรณีที่ปลายขั้น $[(h/l)^{0.1}(h_s/h)^{-1}]$

โค้งความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ η_1 ในสมการการสลาย
 พลังงานของทั้งรางชันบันไดแบบพื้นราบและแบบมีธรณีที่ปลายขั้น มี
 แนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนความสูงลูกตั้งและลูกนอนของรางชันบันได
 เพิ่มขึ้น ในขณะที่ตัวเลขยกกำลัง η_2 มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อสัดส่วน
 ความสูงลูกตั้งและลูกนอนของรางชันบันไดเพิ่มขึ้น



(ก) รางชันบันไดแบบพื้นราบ



(ข) รางชันบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้น

รูปที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลัง ของสมการการสลาย
 พลังงานกับตัวแปรออกแบบรางชันบันได

จากโค้งความสัมพันธ์ในรูปที่ 5ก เมื่อนำมาวิเคราะห์หา
 ความสัมพันธ์ จะได้สมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ η_1 และ
 ตัวเลขยกกำลัง η_2 กับความลาดชันของรางชันบันไดแบบพื้นราบ คือ

$$\eta_{1,2} = a \left(\frac{h}{l} \right)^b \quad (5)$$

เมื่อ $\eta_{1,2}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์หรือตัวเลขยกกำลังของสมการ
 การสลายพลังงานของการไหลบนรางชันบันไดแบบพื้นราบ a และ b
 เป็นค่าสัมประสิทธิ์และตัวเลขยกกำลัง ในการคำนวณหา η_1 a และ b มี
 ค่าเท่ากับ 0.363 และ -0.196 สำหรับการคำนวณหา η_2 a และ b มีค่า
 เท่ากับ -0.078 และ 0.069 โดยที่สมการที่ 5 นี้ครอบคลุมช่วง h/l ระหว่าง
 0.577 ถึง 1.732 และมีค่าสหสัมพันธ์ของสมการมากกว่า 0.750

ในทำนองเดียวกัน เมื่อนำรูปที่ 5ข มาวิเคราะห์หา
 ความสัมพันธ์ในรูปสมการ จะได้สมการความสัมพันธ์ของค่า
 สัมประสิทธิ์ η_1 และตัวเลขยกกำลัง η_2 กับตัวแปรออกแบบรางชันบันได
 แบบมีธรณีที่ปลายขั้น คือ

$$\eta_{1,2} = c \left[\left(\frac{h}{l} \right)^{0.1} \left(\frac{h_s}{h} \right)^{-1} \right]^d \quad (6)$$

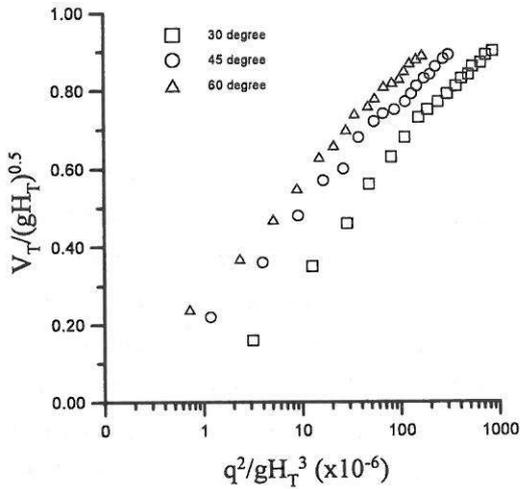
เมื่อ $\eta_{1,2}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์หรือตัวเลขยกกำลังของสมการ
 การสลายพลังงานของการไหลบนรางชันบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้น c
 และ d เป็นค่าสัมประสิทธิ์และตัวเลขยกกำลัง ในการคำนวณหา η_1 c
 และ d มีค่าเท่ากับ 0.662 และ -0.134 สำหรับการคำนวณหา η_2 c และ
 d มีค่าเท่ากับ -0.040 และ 0.141 โดยที่สมการที่ 6 นี้ครอบคลุมช่วง h/l
 ระหว่าง 0.577 ถึง 1.732 และช่วง h_s/h ระหว่าง 0.07 ถึง 0.20 มีค่า
 สหสัมพันธ์ของสมการมากกว่า 0.675

5. ความเร็วการไหลท้ายรางชันบันได

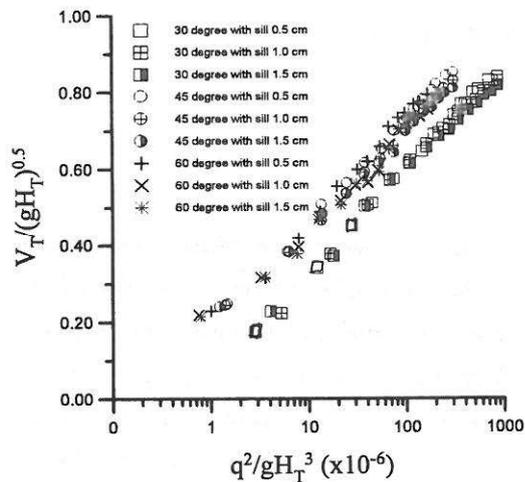
การศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว
 การไหลไร้มิติท้ายรางชันบันได ($V_T / \sqrt{gH_T}$) กับค่า Drop number ของ
 รางชันบันไดทั้งแบบพื้นราบ ($h_s = 0.0$ ซม.) และแบบมีธรณีที่ปลายขั้น
 ($h_s = 0.5, 1.0$ และ 1.5 ซม.) โค้งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงไว้ดังรูปที่ 6

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ที่ได้มีลักษณะเป็น
 เส้นตรง โดยที่ความลาดเอียงของรางชันบันได รวมถึง Drop number
 และธรณีที่ปลายขั้นมีอิทธิพลต่อความเร็วการไหลท้ายรางชันบันได โดย
 รางที่มีความลาดชันน้อยจะมีความเร็วท้ายรางน้อยกว่ารางที่มีความลาด
 ชันมาก เนื่องจากรางที่มีความลาดชันน้อยมีสัดส่วนการสลายพลังงาน
 มากกว่ารางที่มีความลาดชันมาก ทำให้พลังงานจลน์ที่เหลืออยู่ที่ท้ายราง

น้อยกว่ารางชั้นบันไดที่มีความลาดชันมาก และส่งผลให้ความเร็วการไหลที่ท้ายรางชั้นบันไดน้อยตามไปด้วย



(ก) รางชั้นบันไดแบบพื้นราบ



(ข) รางชั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้น

รูปที่ 6 ความเร็วการไหลที่ท้ายรางชั้นบันไดกับค่า Drop number

ในรางชั้นบันไดแบบพื้นราบที่มีความลาดชัน 30° และ 45° จะมีความเร็วท้ายรางน้อยกว่ารางชั้นบันไดแบบพื้นราบที่มีความลาดชัน 60° ประมาณร้อยละ 15 และ 8 ตามลำดับ (รูปที่ 6ก) ในขณะที่ความเร็วท้ายรางชั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้นที่มีความลาดชัน 30° จะน้อยกว่ารางชั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้นที่มีความลาดชัน 45° และ 60° ประมาณร้อยละ 9 (รูปที่ 6ข) โดยความเร็วการไหลที่ท้ายรางชั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้นที่มีความลาดชัน 45° จะใกล้เคียงกับรางชั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้นที่มีความลาดชัน 60° ซึ่งสอดคล้องกับการสลายพลังงานในรูปที่ 4.2x ที่มีสัดส่วนใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของ Drop number พบว่าความเร็วการไหลที่ท้ายรางชั้นบันไดจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Drop number เพิ่มขึ้น และ

สอดคล้องกับการสลายพลังงานซึ่งลดลงเมื่อค่า Drop number เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อการสลายพลังงานลดลง พลังงานจลน์ที่เหลืออยู่ที่ท้ายรางชั้นบันไดจะเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ความเร็วการไหลที่ท้ายรางชั้นบันไดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

สำหรับอิทธิพลของความสูงของธรณีที่ปลายขั้นพบว่า รางชั้นบันไดที่มีธรณีที่ปลายขั้นสูง จะมีความเร็วการไหลที่ท้ายรางน้อยกว่ารางชั้นบันไดที่มีธรณีที่ปลายขั้นต่ำ ซึ่งรวมถึงรางชั้นบันไดแบบพื้นราบด้วย เนื่องจากรางชั้นบันไดที่มีธรณีที่ปลายขั้นสูง จะมีการสลายพลังงานที่สูงกว่ารางชั้นบันไดที่มีธรณีที่ปลายขั้นต่ำ ในช่วง Drop number มีค่าน้อย ความเร็วการไหลที่ท้ายรางชั้นบันไดทั้งแบบพื้นราบและแบบมีธรณีที่ปลายจะใกล้เคียงกัน เนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่ถูกสลายไปบนรางชั้นบันได ทำให้พลังงานจลน์ที่ท้ายรางชั้นบันไดมีค่าน้อย แต่เมื่อ Drop number มีค่ามาก ธรณีที่ปลายขั้นจะมีผลต่อความเร็วการไหลที่ท้ายรางชั้นบันไดอย่างเห็นได้ชัด แต่การเปลี่ยนแปลงความสูงของธรณีที่ปลายขั้นจะมีผลต่อความเร็วการไหลที่ท้ายรางชั้นบันไดเพียงเล็กน้อย

ในรางชั้นบันไดที่มีความลาดชัน 30° ความเร็วการไหลที่ท้ายรางชั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้นซึ่งมีความสูงของธรณีเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซม. ($h_s/h = 0.07, 0.13$ และ 0.20) จะน้อยกว่าความเร็วการไหลที่ท้ายรางชั้นบันไดแบบพื้นราบ ($h_s/h = 0$) ประมาณร้อยละ 5, 6 และ 7 ตามลำดับ ในขณะที่ความเร็วท้ายรางชั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้นที่มีความลาดชัน 45° และมีความสูงของธรณีเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซม. ($h_s/h = 0.05, 0.09$ และ 0.14) จะน้อยกว่ารางชั้นบันไดแบบพื้นราบที่มีความลาดชันเท่ากัน ประมาณร้อยละ 3, 5 และ 6 ตามลำดับ ส่วนความเร็วการไหลที่ท้ายรางชั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้นที่มีความลาดชัน 60° และมีความสูงของธรณีเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซม. ($h_s/h = 0.04, 0.08$ และ 0.12) จะน้อยกว่ารางชั้นบันไดแบบพื้นราบที่มีความลาดชันเท่ากัน ประมาณร้อยละ 10, 11 และ 12 ตามลำดับ

จากโค้งความสัมพันธ์ในรูปที่ 6 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ของความเร็วการไหลที่ท้ายรางชั้นบันไดกับค่า Drop number จะได้ความสัมพันธ์ในรูปของสมการลอการิทึม คือ

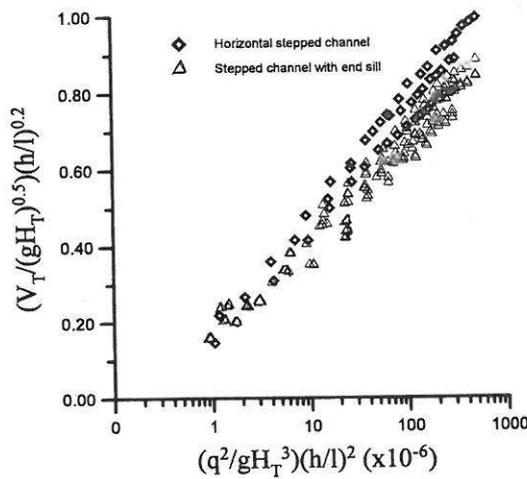
$$\frac{V_T}{\sqrt{gH_T}} = \eta_3 \ln\left(\frac{q^2}{gH_T^3}\right) + \eta_4 \quad (7)$$

เมื่อ η_3 และ η_4 เป็นสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของสมการแสดงไว้ในตารางที่ 2 สำหรับรางชั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้นสมการตัวแทนสามารถแสดงได้ด้วยสมการเดียวในแต่ละความลาดชัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของธรณีที่ปลายขั้นมีอิทธิพลต่อความเร็วท้ายรางชั้นบันไดน้อยมาก

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์และตัวเลขยกกำลังของสมการความเร็วการไหลท้ายรางชั้นบันได

ความลาดชัน (องศา)	แบบพื้นราบ			แบบมีธรณีที่ปลายชั้น		
	η_3	η_4	R^2	η_3	η_4	R^2
30	0.132	1.859	0.993	0.115	1.659	0.993
45	0.120	1.872	0.994	0.112	1.738	0.990
60	0.122	1.970	0.996	0.111	1.730	0.974

เนื่องจากสมการความเร็วการไหลท้ายรางชั้นบันไดที่ได้มีความหลากหลายและไม่สะดวกในการนำไปใช้งาน การศึกษาครั้งนี้จึงได้ปรับปรุงโค้งความสัมพันธ์ในรูปที่ 6 ขึ้นใหม่ เพื่อให้ได้โค้งความสัมพันธ์เพียง 2 เส้น ซึ่งเป็นตัวแทนของความเร็วท้ายรางชั้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีธรณีที่ปลายชั้น สำหรับทุกความลาดชันของรางชั้นบันได โดยนำค่าสัดส่วนความสูงของลูกตั้งกับความยาวลูกนอนของรางชั้นบันได (h/l) ไปคูณกับตัวแปรไร้มิติในแนวแกนนอนและแกนตั้งของรูปที่ 6 ได้ตัวแปรไร้มิติเป็น $[(q^2/gH_T^3)(h/l)^2]$ และ $[(V_T/\sqrt{gH_T})(h/l)^{0.2}]$ โดยตัวแปร $[(q^2/gH_T^3)(h/l)^2]$ จะเรียกเป็นค่า Modified drop number และได้แสดงความสัมพันธ์ไว้ในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความเร็วการไหลท้ายรางชั้นบันไดกับค่า Modified drop number สำหรับทุกความลาดชันรางชั้นบันได

จากโค้งความสัมพันธ์ที่ได้เมื่อนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในรูปแบบการลอการิทึม จะได้สมการความสัมพันธ์ของความเร็วท้ายรางชั้นบันไดแบบพื้นราบกับค่า Modified drop number สำหรับทุกความลาดชัน ซึ่งมีค่าสหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.960 ดังสมการที่ 8

$$\left(\frac{V_T}{\sqrt{gH_T}}\right)\left(\frac{h}{l}\right)^{0.2} = 0.13 \ln \left[\left(\frac{q^2}{gH_T^3}\right)\left(\frac{h}{l}\right)^2 \right] + 1.93 \quad (8)$$

สมการความสัมพันธ์ของความเร็วท้ายรางชั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายชั้นกับค่า Modified drop number สำหรับทุกความลาดชัน ซึ่งมีค่าสหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.960 แสดงดังสมการที่ 9

$$\left(\frac{V_T}{\sqrt{gH_T}}\right)\left(\frac{h}{l}\right)^{0.2} = 0.11 \ln \left[\left(\frac{q^2}{gH_T^3}\right)\left(\frac{h}{l}\right)^2 \right] + 1.70 \quad (9)$$

6. สรุป

การสลายพลังงานของการไหลบนรางชั้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีธรณีที่ปลายชั้น มีแนวโน้มเหมือนกัน โดยจะลดลงเมื่อค่า Drop number เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อ Drop number มีค่ามาก นอกจากนี้ การสลายพลังงานจะมีความมากขึ้นเมื่อความลาดชันของรางชั้นบันไดมากขึ้น และที่ค่า Drop number สูงๆ ความแตกต่างระหว่างการสลายพลังงานของการไหลบนรางชั้นบันไดจะมากขึ้นด้วย ที่สภาวะการไหลเดียวกัน รางชั้นบันไดที่มีธรณีที่ปลายชั้นสูงจะสลายพลังงานมากกว่ารางชั้นบันไดที่มีธรณีที่ปลายชั้นน้อย โดยเมื่อ Drop number เพิ่มขึ้น การสลายพลังงานของรางชั้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีธรณีที่ปลายชั้นจะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดประมาณร้อยละ 8 และการเพิ่มความสูงของธรณีที่ปลายชั้นจะเพิ่มการพลังงานได้เฉลี่ยร้อยละ 3 จากผลการทดลองที่ได้ สามารถสรุปความสัมพันธ์ไว้ในรูปสมการยกกำลังได้ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ระหว่าง 0.895 ถึง 0.977

ความเร็วการไหลท้ายรางชั้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีธรณีที่ปลายชั้น มีแนวโน้มเหมือน และสอดคล้องกับการสลายพลังงาน โดยจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Drop number เพิ่มขึ้น การเพิ่มความลาดชันของรางชั้นบันไดทั้งแบบพื้นราบและแบบมีธรณีที่ปลายชั้นสามารถลดความเร็วท้ายรางได้ประมาณร้อยละ 8-15 และที่สภาวะการไหลเดียวกัน รางชั้นบันไดที่มีธรณีที่ปลายชั้นสูงจะมีความเร็วการไหลท้ายรางน้อยกว่ารางชั้นบันไดที่มีธรณีที่ปลายชั้นต่ำ โดยรางชั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายชั้นจะมีความเร็วการไหลน้อยกว่ารางชั้นบันไดแบบพื้นราบประมาณร้อยละ 7-12 และการเพิ่มความสูงของธรณีที่ปลายชั้นจะลดความเร็วการไหลท้ายรางได้เฉลี่ยร้อยละ 2 จากผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปความสัมพันธ์ไว้ในรูปสมการลอการิทึมได้ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ระหว่าง 0.974 ถึง 0.996

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทบวงมหาวิทยาลัย และ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ได้

สนับสนุนทุนวิจัยบางส่วน และขอขอบคุณ ศ.ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Essery, I.T.S. and Hornor, M.W., "The Hydraulics Design of Stepped Spillways", Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), Report No. 33, London, 1971, 41 pages.
- [2] Stephenson, D., "Energy Dissipation down Stepped Spillways", International Water Power and Dam Construction, Vol. 43, No. 9, 1991, pp. 27-30.
- [3] Rajaratnam, N., "Skimming Flow in Stepped Spillway", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 4, 1990, pp. 587-591.
- [4] Diez-Cascon, et al., "Studies on the Hydraulic Behaviour of Stepped Spillways", International Water Power and Dam Construction, Vol. 43, No. 9, 1991, pp. 22-26.
- [5] Peyras, L., Royet, P. and Degoutte, G., "Flow and Energy Dissipation over Stepped Gabion Weirs", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 5, 1992, pp. 707-717.
- [6] Christodoulou, G.C., "Energy Dissipation on Stepped Spillways", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 5, 1993, pp. 644-650.
- [7] Israngkura, U. and Chinnarasri, C., "Flow Depth and Energy Losses through Stepped Chutes", Proceedings of the 9th Congress of Asian and Pacific Division of the International Association for Hydraulic Research (APD-IAHR Congress), Singapore, 1994, pp. 156-163.
- [8] Fratino, U., Piccinni, A.F. and Mainis, G.de, "Dissipation Efficiency of Stepped Spillways", in International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, Minor, H.E. & Hager, W.H. (Eds.), Zurich, Switzerland, 2000, pp. 103-110.
- [9] Pinheiro, A.N. and Fael, C.S., "Nappe Flow in Stepped Channels- Occurrence and Energy Dissipation ", in International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, Minor, H.E. & Hager, W.H. (Eds.), Zurich, Switzerland, 2000, pp. 119-126.
- [10] Chamani, M.R. and Rajaratnam, N., "Jet Flow on Stepped Spillways" Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 2, 1994, pp. 254-259.
- [11] Chanson, H., "Comparison of Energy Dissipation between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes", Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 32, No. 2, 1994, pp. 213-218.
- [12] Ohtsu, I. and Yasuda, Y., "Discussion on Comparison of Energy Dissipation Between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes", Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 33, No. 1, 1995, pp. 115-117.
- [13] Kells, J.A., "Discussion on Comparison of Energy Dissipation Between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes", Journal of Hydraulics Research, IAHR, Vol. 33, No.1, 1995, pp. 128-133.
- [14] Mátos, J. and Quintela, A., "Discussion on Comparison of Energy Dissipation Between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes", Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 33, No. 1, 1995, pp. 135-139.
- [15] Chanson, H. and Toombes, L., "Energy Dissipation in Stepped Waterway", Proceedings of 27th International Association for Hydraulic Research (IAHR)-Congress, Holly Jr., F.M. and Aasaffer, A. (Eds), San Francisco, USA, 1997, pp. 595-600 (Vol. D).
- [16] Poggi, B., "Sopra li Scaricatori a Scala di Stramazzi", L'energia elettrica, Milan, Oct., 1949, 26 pages.
- [17] Poggi, B., "Lo Scaricatore a Scala di Stramazzi", L'energia elettrica, Milan, Jan., 1956, 33 pages.
- [18] Vittal, N. and Porey P.D., "Design of Cascade Stilling Basins for High Dam Spillways", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 2, 1987, pp. 225-237.
- [19] Peruginelli, A. and Pagliara, S., "Energy Dissipation Comparison among Stepped Channel, Drop, and Ramp Structures", in International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, Minor, H.E. & Hager, W.H. (Eds.), Zurich, Switzerland, 2000, pp. 111-118.
- [20] Aigner, D., "Hydraulic Design of Pooled Step Cascades", XXIX International Association for Hydraulic Research (IAHR)-Congress, 16-21 September, 2001, Beijing, China.