

## การไหลผ่านทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย

สมชาย ดอนเจดีย์<sup>1</sup>

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 71340

ชัยยุทธ ชินณะราศรี<sup>2</sup> อุดมศักดิ์ อิศรางกูร ณ อยุธยา<sup>2</sup> และ ทศพล จตุระบุล<sup>3</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

รับเมื่อ 29 สิงหาคม 2546 ตอรับเมื่อ 4 ธันวาคม 2546

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาลักษณะการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายจากการทดลอง ในทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดที่มีความกว้าง 0.40 เมตร มีความลาดชันของราง  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  โดยมีความสูงของรางเท่ากับ 1.50, 2.12, และ 2.60 เมตร ตามลำดับ ชั้นบันไดมีความสูงเป็นร้อยละ 5 ของความสูงราง อัตราไหลอยู่ในช่วงระหว่าง 4 ถึง 68 ลิตรต่อวินาที จากผลการศึกษาพบว่า ที่อัตราไหลน้อย การไหลผ่านชั้นบันไดจะเป็นแบบ Nappe flow แต่เมื่ออัตราไหลเพิ่มมากขึ้นการไหลจะเปลี่ยนเป็นแบบ Transition flow และ Skimming flow ตามลำดับ การแบ่งขอบเขตของการไหลแสดงได้ด้วยตัวเลขอัตราส่วนของความลึกวิกฤตต่อความสูงชั้นบันได การสูญเสียพลังงานการไหลแปรเปลี่ยนผกผันกับค่า Modified drop number โดยการสูญเสียพลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Modified drop number ลดลง ในขณะที่การสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น ความเร็วทางด้านท้ายน้ำจะลดลง ทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสลายพลังงานได้ประมาณร้อยละ 10 และลดความเร็วทางด้านท้ายน้ำได้ร้อยละ 14 เมื่อเปรียบเทียบกับทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบ

**คำสำคัญ :** ทางระบายน้ำล้นชั้นบันได / กล่องตาข่าย / การสูญเสียพลังงาน / ความเร็วท้ายน้ำ

<sup>1</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน (อดีตนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมแหล่งน้ำ (WAREE) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

<sup>3</sup> นักวิจัย ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมแหล่งน้ำ (WAREE) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

## Flow through Gabion Stepped Spillways

Somchai Donjadee<sup>1</sup>

Kasetsart University, Kampaeng Saen Campus, Nakorn Pathom 71340

Chaiyuth Chinnarasri<sup>2</sup> Udomsak Israngkura<sup>2</sup> and Thodsapol Chaturabul<sup>3</sup>

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

*Received 29 August 2003 ; accepted 4 December 2003*

### Abstract

This paper presents the results of the experimental studies on the flow through the gabion stepped spillways. The width of the gabion stepped spillways is 0.40 m and the slopes of the gabion stepped spillways are 30°, 45°, and 60° with total spillway drop height 1.50, 2.12, and 2.60 m, respectively. The step height is 5 percent of the total spillway drop height. The discharge through the gabion stepped spillways was varied from 4 to 68 l/s. It was found that nappe flow occurred at low flow rates, transition flow at intermediate discharges and skimming flow at larger flow rates. The regimes of flow could be identified by the ratio of critical flow depth and step height. The energy loss varied inversely with the modified drop number, i.e. energy loss increased when modified drop number decreased. As the energy loss of flow increased, the velocity of flow at the spillway outlet decreased. The energy of flow was dissipated more in the gabion stepped spillways than in the horizontal stepped spillways about 10 percent. The velocity of flow at the outlet of the gabion stepped spillways was less than that of the horizontal stepped spillways by about 14 percent.

**Keywords :** Stepped spillways / Gabions / Energy loss / Outlet velocity

---

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Irrigation Engineering (Former Graduate Student, Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi).

<sup>2</sup> Assistant Professor, Water Resources Engineering Research Lab. (WAREE), Department of Civil Engineering.

<sup>3</sup> Researcher, Water Resources Engineering Research Lab. (WAREE), Department of Civil Engineering.

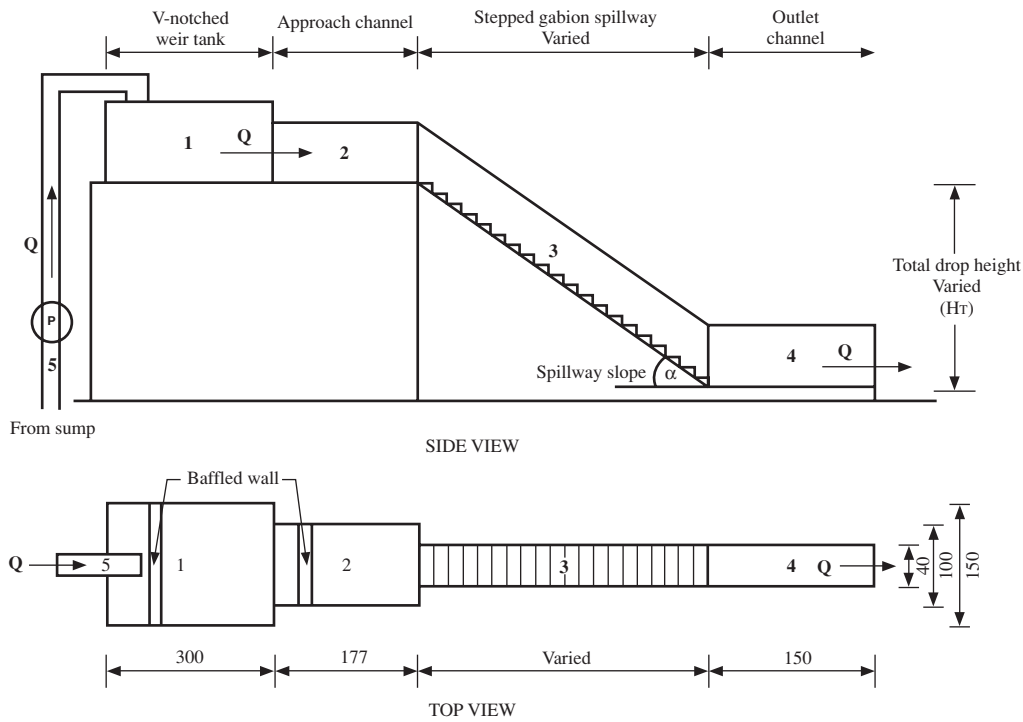
## 1. บทนำ

ทางระบายน้ำล้นขั้นบันได (stepped spillway) เป็นโครงสร้างทางชลศาสตร์ที่สำคัญสำหรับการระบายน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำ โดยสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสลายพลังงาน และลดความเร็วทางด้านท้ายน้ำ ทำให้ความยาวของการเกิดน้ำกระโดดบริเวณท้ายน้ำสั้นลง ส่งผลให้สามารถลดขนาดการก่อสร้างของอ่างสลายพลังงานลงได้ นอกจากนี้ทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดยังก่อให้เกิดการผสมกันของฟองอากาศได้ดี [1] และมีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานของการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นดีกว่าทางระบายน้ำล้นแบบพื้นเรียบ (plained-bed spillway) [2]-[6] ที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาทางระบายน้ำล้นแบบขั้นบันไดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายพลังงานให้มากยิ่งขึ้น ด้วยการนำวัสดุที่หาได้ง่ายและราคาถูกลงอย่างเช่น หิน มาใส่ในกล่องตาข่ายแล้วนำมาวางเป็นขั้นบันได (Gabion steps) [7]-[8] แนวคิดนี้เป็นที่น่าสนใจและควรมีการศึกษาทดลองเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย ซึ่งรวมถึงการสลายพลังงานและความเร็วทางด้านท้ายน้ำ พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบพื้นราบ (horizontal stepped spillway) เพื่อเป็นพื้นฐานในการออกแบบเบื้องต้นในการก่อสร้างทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายและแบบพื้นราบต่อไป

## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้พื้นที่ของอาคารชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาและทดลองแสดงดังรูปที่ 1 โดยมีจะสูบน้ำจากบ่อพักน้ำเข้าสู่ถังวัดอัตราไหล และไหลเข้าทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดโดยผ่านปากทางเข้ารางซึ่งทำหน้าที่ปรับสภาพการไหลให้มีระดับผิวน้ำค่อนข้างราบเรียบ ถังวัดอัตราไหลมีฝายรูปตัววี (V-notched weir) ติดตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าเพื่อทำหน้าที่วัดอัตราไหล โดยออกแบบตามเกณฑ์ที่เสนอโดย Bos [9] จากการสอบเทียบฝายวัดน้ำสามารถเสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราไหลได้ดังนี้คือ  $Q = 0.02 h_w^{2.42}$  เมื่อ  $Q$  คือ อัตราไหล (ลิตร/วินาที) และ  $h_w$  คือ ความสูงของระดับน้ำเหนือสันฝาย โดยวัดจากระดับต่ำสุดของปากฝายรูปตัววี (เซนติเมตร) ซึ่งอัตราไหลที่ใช้ในการทดลองมีค่าระหว่าง 4 ถึง 68 ลิตรต่อวินาที

ทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบพื้นราบที่ใช้สำหรับสังเกตพฤติกรรมการไหลมี 3 รางซึ่งมีความลาดชัน  $30^\circ$   $45^\circ$  และ  $60^\circ$  และมีความสูง 1.50, 2.12 และ 2.60 เมตร ตามลำดับ แต่ละรางมีความกว้าง 0.40 เมตร ขั้นบันไดมีความสูงเป็นร้อยละ 5 ของความสูงราง และนำมาประยุกต์ใช้ทำเป็นทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย โดยการนำกล่องตาข่ายซึ่งบรรจุหินไว้เต็มกล่อง (Gabions) มาวางบนขั้นบันได ในการทดลองครั้งนี้ใช้หิน 3 ชนิดคือ 1) หินที่มีผิวขรุขระมีขนาด 25-35 มิลลิเมตร (Gabion I) 2) หินที่มีผิวกลมมนขนาด 25-35 มิลลิเมตร (Gabion II) และ 3) หินที่มีผิวขรุขระมีขนาด 50-70 มิลลิเมตร (Gabion III) ซึ่งมีอัตราส่วนความพรุนเท่ากับ 0.27, 0.30 และ 0.39 ตามลำดับ

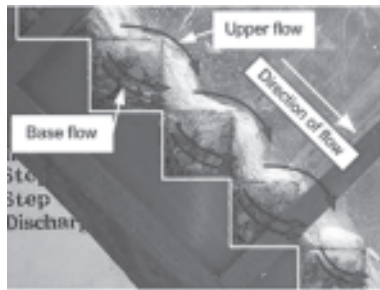


รูปที่ 1 ฟังการจ้ดวางอุปกรณ์การทดลอง (ซม.)

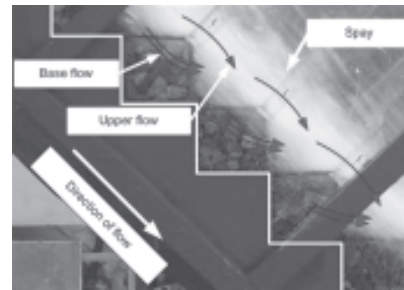
การวัดความเร็วได้ทำการวัดที่บริเวณด้านเหนือน้ำ ณ ตำแหน่งก่อนที่น้ำไหลเข้าทางระบายน้ำล้นชั้นบันได และที่บริเวณท้ายน้ำ ณ ตำแหน่งที่น้ำออกจากทางระบายน้ำล้นชั้นบันได โดยทำการวัด 2 วิธี คือ 1) วัดความลึกของน้ำที่หน้าตัดการไหล และคำนวณความเร็วจากสมการ  $v = \frac{Q}{Bd}$  และ 2) โดยใช้หลอดปิโตต และคำนวณความเร็วจากสมการ  $v = c_v \sqrt{2gh_p}$  เมื่อ  $v$  คือ ความเร็ว (ม./วินาที)  $Q$  คือ อัตราไหล (ม.<sup>3</sup>/วินาที)  $B$  คือ ความกว้างของหน้าตัดการไหล (ม.)  $d$  คือ ความลึกการไหล (ม.)  $c_v$  คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้ของเครื่องมือวัด ( $c_v$  เท่ากับ 0.98, [10])  $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที<sup>2</sup>) และ  $h_p$  คือ ความสูงของน้ำในหลอดปิโตตเหนือระดับผิวหน้า (ม.)

### 3. ลักษณะทางกายภาพของการไหลในทางระบายน้ำล้นชั้นบันได

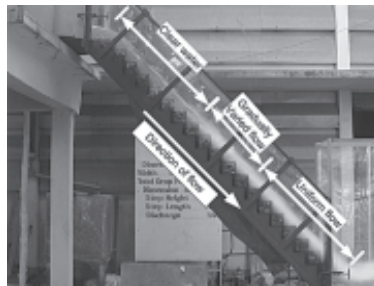
การไหลในทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายสามารถแบ่งช่วงการไหลได้ 3 แบบ เรียงตามลำดับค่าอัตราไหลจากน้อยไปหามาก เช่นเดียวกับการไหลในทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบ คือ การไหลแบบ Nappe, Transition และ Skimming flow ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ในกรณีของทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย การไหลแยกออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ไหลผ่านชั้นหินที่บรรจุอยู่ในกล่องตาข่าย (base flow) และส่วนที่ไหลบนผิวของกล่องตาข่าย (upper flow) ดังแสดงในรูปที่ 2



(ก) Nappe flow



(ข) Transition flow



(ค) Skimming flow

**รูปที่ 2** ลักษณะการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย  
(ก) Nappe flow (ข) Transition flow และ (ค) Skimming flow

สำหรับการไหลแบบ Nappe flow บนทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย น้ำจะเริ่มไหลผ่านกล่องตาข่าย จนถึงอัตราไหลค่าหนึ่งแล้วจึงเปลี่ยนไปเป็นการไหลแบบ Transition flow ในการไหลแบบ Nappe flow นี้ ปริมาณน้ำจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่ไหลผ่านกล่องตาข่ายและส่วนที่ไหลบนกล่องตาข่าย ซึ่งส่วนที่ไหลผ่านกล่องตาข่ายจะไหลในลักษณะเลียบบขั้นบันไดผ่านช่องว่างระหว่างหินที่บรรจุอยู่ในกล่องตาข่าย ส่วนที่ไหลบนกล่องตาข่าย กระแสน้ำจะไหลแบบผิวกล่องตาข่ายและมีการผสมของอากาศบริเวณผิวน้ำ เมื่ออัตราไหลมากขึ้นจะเริ่มเกิดน้ำกระโดดบนขั้นบันไดแล้วพัฒนาเข้าสู่ช่วง Transition flow ซึ่งพบว่าการไหลแบบ Transition flow บริเวณผิวน้ำ จะมีการผสมของน้ำและอากาศ เกิดเป็นละอองน้ำในปริมาณที่สูงมาก และไม่สามารถกำหนดรูปแบบการไหลได้แน่นอนเพราะเป็นช่วงที่การไหลแบบ Nappe flow เปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลเข้าสู่การไหลแบบ Skimming flow

การไหลแบบ Skimming flow สามารถแบ่งการไหลได้ 3 ช่วงคือ 1) ช่วงน้ำไหลเข้าสู่ทางระบายน้ำล้น ซึ่งน้ำในช่วงนี้จะมีลักษณะเป็นน้ำใส (clear water) 2) ช่วงที่เป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลงทีละน้อย (gradually varied flow) และ 3) ช่วงที่เป็นการไหลแบบสม่ำเสมอ (uniform flow) การผสมของฟองอากาศจะเริ่มจากจุดที่เปลี่ยนจากช่วงน้ำใสที่มีปริมาณน้ำไหลเต็มพื้นที่ภาคตัดขวางของการไหลมาเป็นช่วงที่การไหลเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป จุด

ที่เริ่มเกิดการผสมของฟองอากาศนี้ เรียกว่า “Inception point” จากการศึกษาการไหลแบบ Skimming flow จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราไหลสูงๆ ดังนั้นปริมาณน้ำที่ไหลผ่านกล่องตาข่ายจึงมีสัดส่วนน้อยกว่าปริมาณน้ำที่ไหลบนกล่องตาข่าย

สำหรับการแบ่งขอบเขตการไหลบนทางระบายน้ำล้นชั้นบันได ได้มีผู้ทำการทดลองการไหลบนทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบ [1], [3]-[4], [11]-[16] และได้เสนอสมการไว้หลายรูปแบบดังตารางที่ 1 ซึ่งส่วนใหญ่จะวิเคราะห์และนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง  $d_c/h$  กับ  $h/l$  เมื่อ  $d_c$  คือ ความลึกวิกฤติของการไหล (ม.)  $h$  คือ ความสูงของชั้นบันได (ม.) และ  $l$  คือ ความยาวของชั้นบันได (ม.)

ในการทดลองครั้งนี้ได้เสนอกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $d_c/h$  กับ  $h/l$  จากผลการทดลองในครั้งนี้รวมกับผลการศึกษาของผู้อื่นซึ่งเป็นทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบดังรูปที่ 3 ซึ่งพบว่าการแบ่งขอบเขตการไหลของทั้งทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบและทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย สามารถใช้เกณฑ์เดียวกันได้โดยขีดจำกัดบนของการไหลแบบ Nappe flow และขีดจำกัดล่างของการไหลแบบ Skimming flow เป็นไปตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\frac{d_c}{h} = 0.92 - 0.30 \left( \frac{h}{l} \right) - 0.07 \left( \frac{h}{l} \right)^2 \quad (1)$$

$$\frac{d_c}{h} = 0.84 \left( \frac{h}{l} \right)^{-0.20} \quad (2)$$

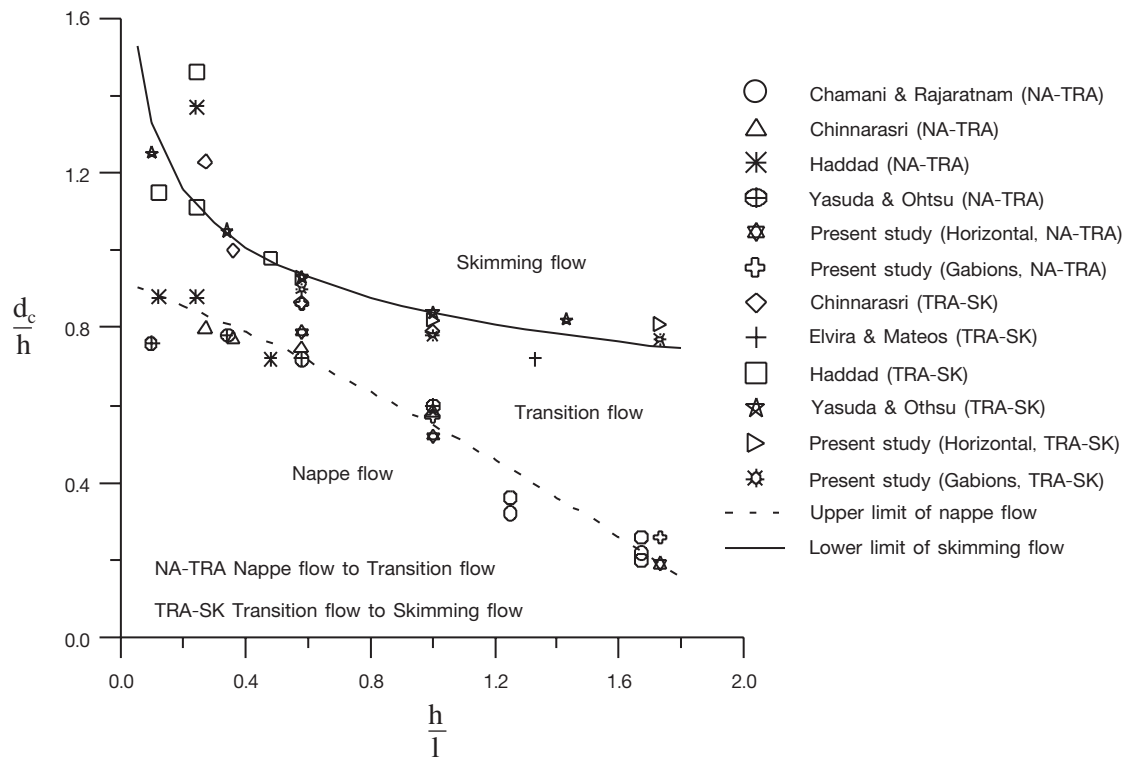
เมื่อ  $d_c$  คือ ความลึกวิกฤติของการไหล (ม.)

$h$  คือ ความสูงของชั้นบันได (ม.)

$l$  คือ ความยาวของชั้นบันได (ม.)

ตารางที่ 1 สมการเงื่อนไขการเปลี่ยนรูปแบบการไหลของการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นชันบันได

ผู้ศึกษา	สมการ	หมายเหตุ
● ขีดจำกัดบนของการไหลแบบ Nappe flow		
Chanson (1995) [11]	$\frac{d_c}{h} \leq 0.092 \left(\frac{h}{l}\right)^{-1.276}$	แบ่งภาวะการไหลแบบ Nappe flow ที่มีการกระโจนของน้ำ
Yasuda และ Ohtsu (1999) [12]	$\frac{d_c}{h} = \left(1.4 - \frac{h}{l}\right)^{0.26}$	-
Chanson (2001) [3]	$\frac{d_c}{h} = 0.89 - 0.4 \left(\frac{h}{l}\right)$	$0.5 < h/l \leq 1.7$ ความแม่นยำ $\pm 10\%$
Chinnarasri (2002) [4]	$\frac{d_c}{h} = 0.80 (0.55)^{h/l}$	$0.4 < h/l \leq 5.0$
● ขีดจำกัดล่างของการไหลแบบ Skimming flow		
Chanson (1994) [1]	$\frac{d_c}{h} = 1.057 - 0.465 \left(\frac{h}{l}\right)$	-
Mondardo และ Fabiani (1995) [13]	$\frac{d_c}{h} = 1.195 - 0.595 \left(\frac{h}{l}\right)$	สำหรับชันบันไดที่ก่อสร้างด้วย คอนกรีตหรือหิน
	$\frac{d_c}{h} = 0.781 - 0.177 \left(\frac{h}{l}\right)$	สำหรับชันบันไดที่ก่อสร้างด้วย กล่องตาข่าย
Chanson (1996) [14]	$\frac{(d_c)_{\text{onset}}}{h} = \frac{Fr_b^{2/3} \sqrt{1 + \frac{1}{Fr_b^2}}}{\sqrt{1 + 2Fr_b^{2/3} \left(1 + \frac{1}{Fr_b^2}\right)^{3/2} \left(1 - \frac{\cos \alpha_b}{1 + \frac{1}{Fr_b^2}}\right)}}$	ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของ การไหลตกอิสระ เมื่อ $Fr_b$ เป็น Froude number ที่มุม ของชันบันได และ $\alpha_b$ เป็นมุมของ การไหลผ่านมุมชันบันได (องศา)
James et al. (1999) [15]	$\frac{d_c}{h} = 0.541 \left(\frac{h}{l}\right)^{-1.07}$	$h/l \geq 0.3$
Yasuda และ Ohtsu (1999) [12]	$\frac{d_c}{h} = 0.862 \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.165}$	-
Tatewar และ Ingle (1996) [16]	$\frac{d_c}{h} = -0.120 \left(\frac{h}{l}\right) - 0.004 \theta + 0.888$	สำหรับชันบันไดแบบพื้นเอียง $0.4 < h/l \leq 0.85$ เมื่อ $\theta$ เป็นมุมเอียง ของพื้นรางชันบันได
Chanson (2001) [3]	$\frac{d_c}{h} = 1.20 - 0.325 \left(\frac{h}{l}\right)$	$0.5 < h/l \leq 1.7$ ความแม่นยำ $\pm 10\%$
Chinnarasri (2002) [4]	$\frac{d_c}{h} = 0.80 \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.22}$	$0.4 < h/l \leq 50$



รูปที่ 3 ขอบเขตการจำแนกประเภทของการไหลบนทางระบายน้ำล้นชั้นบันได

#### 4. การสลายพลังงานและความเร็วทางด้านท้ายน้ำ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างการสลายพลังงานและความเร็วด้านท้ายน้ำกับตัวแปรที่สำคัญที่มีบทบาทต่อลักษณะการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย โดยได้ใช้วิธีการวิเคราะห์มิติของ Buckingham- $\pi$  สามารถสรุปความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติที่สำคัญได้ดังนี้

$$\text{การสลายพลังงาน} \quad : \quad \frac{E_L}{H_T} = f_1 \left( \frac{q^2}{qH_T^3}, \frac{D}{h}, \alpha \right) \quad (3)$$

$$\text{ความเร็วทางด้านท้ายน้ำ} \quad : \quad \frac{V_T}{\sqrt{gH_T}} = f_1 \left( \frac{q^2}{gH_T^3}, \frac{D}{h}, \alpha \right) \quad (4)$$

เมื่อ  $E_L$  คือ การสูญเสียพลังงาน (ม.)  $H_T$  คือ ความสูงทั้งหมดของทางระบายน้ำล้นชั้นบันได (ม.)  $q$  คือ อัตราไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง ( $\text{ม.}^3/\text{วินาที}/\text{ม.}$ )  $V_T$  คือ ความเร็วทางด้านท้ายน้ำ ( $\text{ม.}/\text{วินาที}$ )  $h$  คือ ความสูงของชั้นบันได (ม.)  $D$  คือ ขนาดของหิน (ม.)  $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $\text{ม.}/\text{วินาที}^2$ )  $\alpha$  คือ ความ

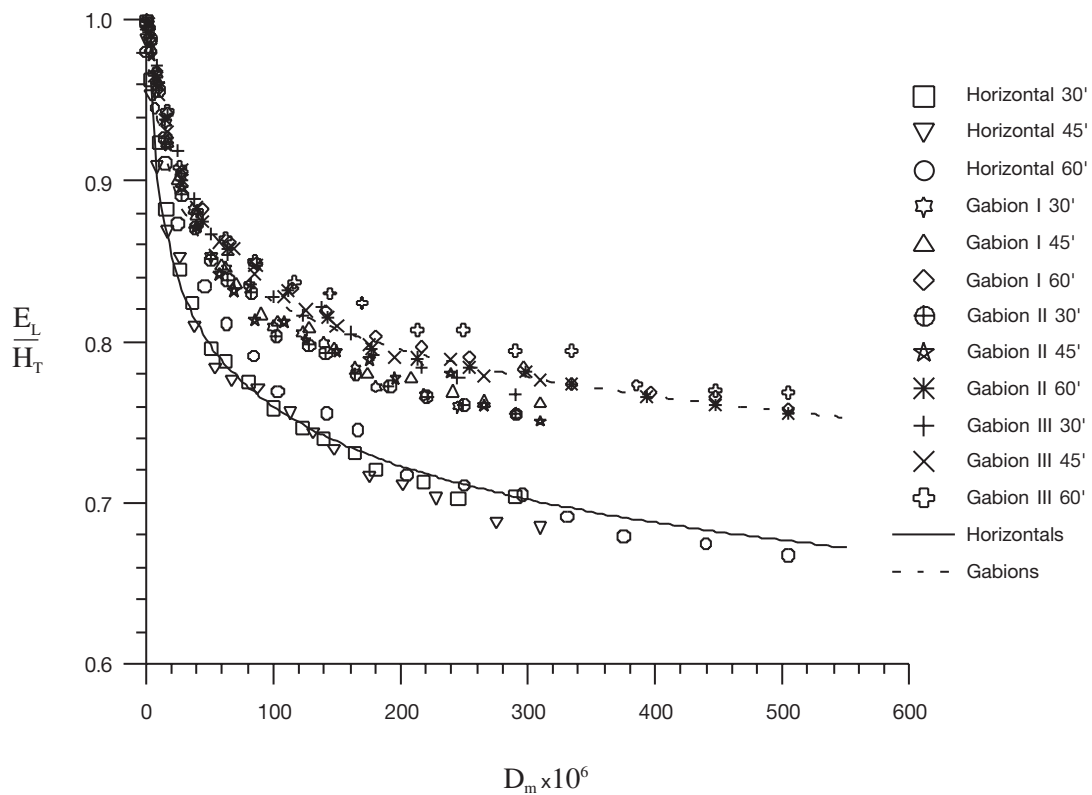


ลาดชันของทางระบายน้ำล้น  $\frac{E_L}{H_T}$  คืออัตราส่วนการสลายพลังงานต่อความสูงรวมของทางระบายน้ำล้น  $\frac{q^2}{gH_T^3}$  เรียก

ว่า Spillway drop number และ  $\frac{D}{h}$  หมายถึงอัตราส่วนของขนาดหินต่อความสูงชั้นบันได

จากผลการศึกษาพบว่า อิทธิพลของความลาดเอียงของรางมีผลอย่างมากต่อการสลายพลังงานของการไหลบนทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดทั้งแบบพื้นราบและแบบกล่องตาข่าย โดยที่ค่า Spillway drop number เท่ากัน รางที่มีความลาดชันน้อยกว่าสามารถสลายพลังงานได้ในอัตราที่สูงกว่ารางที่มีความลาดชันมากกว่า และที่รางเดียวกัน การสูญเสียพลังงานจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อ Spillway drop number ลดลง จากการที่ความลาดเอียงของรางมีอิทธิพลอย่างมากกับการสลายพลังงาน ดังนั้นในการศึกษาคั้งนี้จึงได้นำค่า  $(h/l)^2$  มาคูณเข้ากับ Spillway drop number แล้วเรียกใหม่ว่าเป็น Modified drop number ( $D_M = [(h/l)^2(q^2/gH_T^3)]$ ) ซึ่งทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนส่วนการสูญเสียพลังงานกับ Modified drop number ของทุกความชันของรางเป็นเส้นโค้งต่อเนื่องกัน

การเปรียบเทียบ การสูญเสียพลังงานในการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบกับทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสูญเสียพลังงานและ Modified drop number

จากผลการศึกษาพบว่า ในช่วงที่เป็นการไหลแบบ Nappe flow การสลายพลังงานจะเกิดขึ้นมากเนื่องจากมวลน้ำไหลลงมากระทบกับชั้นบันได และการเกิดกระโดดของน้ำในบางส่วนของชั้นบันไดสำหรับการไหลแบบ Skimming flow ซึ่งกระแสน้ำจะแตะสัมผัสกับปลายชั้นบันไดในช่วงเวลาสั้นๆ ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับปลายชั้นบันไดมีน้อย การสลายพลังงานที่เพิ่มขึ้นมาเกิดจากแรงเสียดทานของการไหล และการไหลวนของกระแสน้ำในช่องว่างระหว่างชั้นบันได

จะเห็นได้ว่าการสลายพลังงานของทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย จะสลายพลังงานได้มากกว่าทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบทุกค่าของ Modified drop number ( $D_M = [(h/l)^2(q^2/gH_T^3)]$ ) โดยมีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานมากกว่าทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบประมาณร้อยละ 10 จากการทดลองสามารถสรุปความสัมพันธ์ของการสลายพลังงาน กับค่า Modified drop number ดังสมการที่ (5) และ (6)

$$\text{สำหรับทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบ} \quad \frac{E_L}{H_T} = 0.392 D_M^{-0.072} \quad (5)$$

$$\text{สำหรับทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย} \quad \frac{E_L}{H_T} = 0.502 D_M^{-0.054} \quad (6)$$

เนื่องจากการไหลในทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายการไหลจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไหลผ่านกล่องตาข่ายและส่วนที่ไหลบนกล่องตาข่าย เมื่ออัตราไหลน้อยจะเป็นการไหลผ่านกล่องตาข่ายเกือบทั้งหมด จะเห็นได้ว่าพลังงานการไหลจะถูกสลายไปได้เกือบทั้งหมด โดยดูได้จากสัดส่วน  $E_L/H_T$  ที่เข้าใกล้ศูนย์ เมื่ออัตราไหลมากขึ้นจะพบการไหลส่วนที่ไหลบนกล่องตาข่าย โดยปริมาณน้ำที่ไหลตกกระทบกับผิวบนกล่องตาข่ายจะถูกกล่องตาข่ายที่มีความพรุน (porosity) ช่วยในการดูดซับพลังงานอีกส่วนหนึ่งด้วย

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของขนาดหินที่บรรจุในกล่องตาข่าย พบว่าที่ทุกความลาดชันของราง หินผิวขรุขระขนาดใหญ่จะช่วยสลายพลังงานของการไหลได้ดีกว่าหินผิวขรุขระขนาดเล็กและหินผิวกลมมนตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบจากขนาดของหิน พบว่าหินที่มีขนาดใหญ่กว่าสามารถสลายพลังงานได้มากกว่าหินที่มีขนาดเล็กกว่าประมาณร้อยละ 2 ถึง 3 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะหินขนาดใหญ่มีปริมาณช่องว่างระหว่างก้อนหินที่มากกว่า การไหลผ่านกล่องตาข่ายจึงมีปริมาณมากกว่า และจากเหตุผลที่ว่า การสลายพลังงานในส่วนของการไหลผ่านกล่องตาข่ายสามารถสลายพลังงานได้เกือบทั้งหมด สำหรับหินชนิดเดียวกันหินที่มีขนาดใหญ่กว่าจึงสามารถสลายพลังงานได้มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างหินต่างชนิดกัน พบว่าหินที่มีผิวขรุขระ (crushed) สามารถสลายพลังงานได้มากกว่า หินที่มีผิวกลมมน (rounded) ประมาณร้อยละ 1 ถึง 2

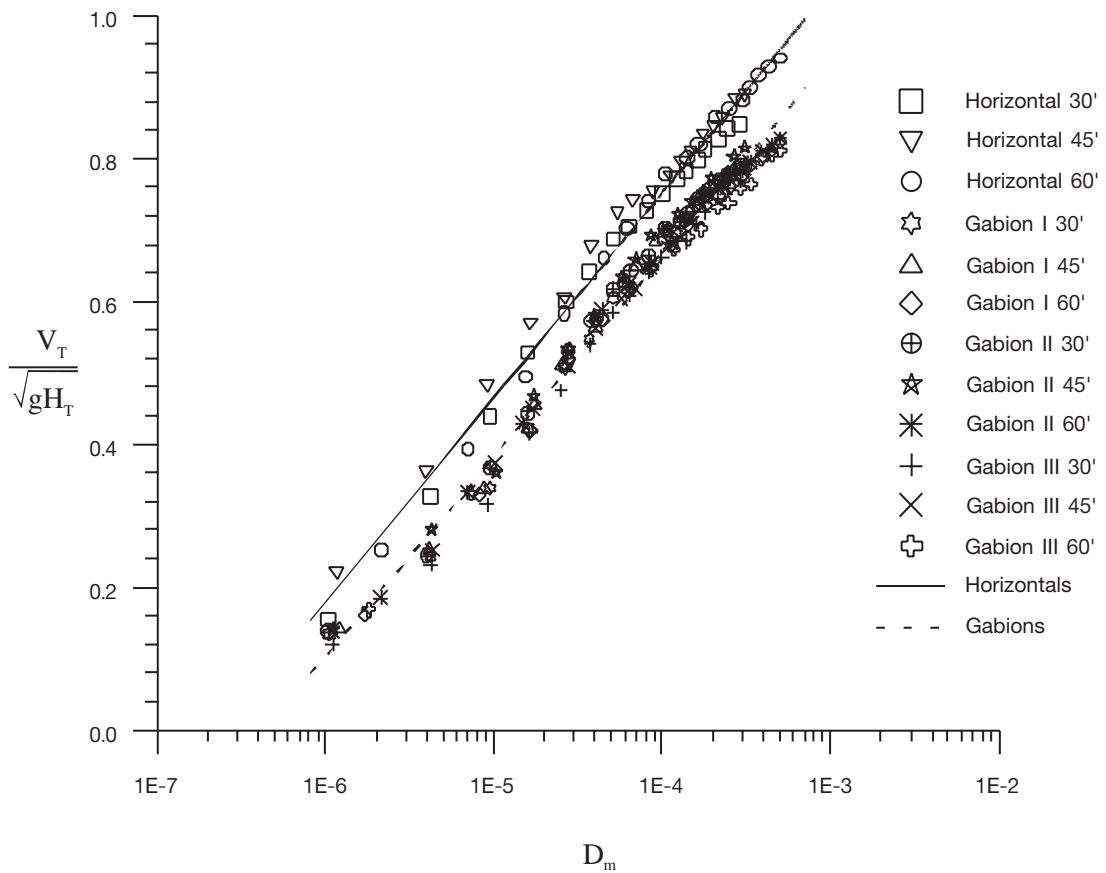
ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ปลายทางออกของทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดกับค่า Modified drop number ( $D_M$ ) ของทุกลักษณะการไหลมีลักษณะเป็นเส้นตรงต่อเนื่อง ดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า ความเร็วที่ปลายทางออกของทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายน้อยกว่าของทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบทุกค่าของ Modified

drop number ซึ่งสอดคล้องกับการที่การสลายพลังงานในการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย มีมากกว่าการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบ

จากการเปรียบเทียบระหว่างทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบกับทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย พบว่าทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายสามารถลดความเร็วทางด้านท้ายน้ำลงได้ประมาณร้อยละ 14 ของทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบ ซึ่งสามารถหาสมการตัวแทนได้ดังสมการที่ (7) และ (8)

สำหรับทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบ 
$$\frac{V_T}{\sqrt{gH_T}} = 0.124 \ln D_M + 1.901 \quad (7)$$

สำหรับทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย 
$$\frac{V_T}{\sqrt{gH_T}} = 0.121 \ln D_M + 1.777 \quad (8)$$



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วทางด้านท้ายน้ำและ Modified drop number

## 5. สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ว่า การไหลที่เกิดขึ้นบนทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายและแบบพื้นราบแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ Nappe flow, Transition flow และ Skimming flow ซึ่งการแบ่งขอบเขตของการไหลแสดงได้ด้วยตัวเลขอัตราส่วนของความลึกวิกฤตต่อความสูงขั้นบันได ( $d_c/h$ ) โดยที่สมการแสดงขีดจำกัดบนของการไหลแบบ Nappe flow และขีดจำกัดล่างของการไหลแบบ Skimming flow แสดงไว้ดังสมการที่ 1 และ 2

การสลายพลังงาน ( $E_L/H_T$ ) ของทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายสามารถสลายพลังงานได้มากกว่าทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบพื้นราบประมาณร้อยละ 10 โดยที่การสลายพลังงานจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อ Modified drop number ( $D_M = [(h/l)^2(q^2/gH_T^3)]$ ) ลดลง และที่ Modified drop number เท่ากัน ทางระบายน้ำล้นที่มีความลาดชันน้อยกว่าสามารถสลายพลังงานได้มากกว่า ในขณะที่ความเร็วที่ปลายทางออกของทางระบายน้ำล้นขั้นบันได จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความลาดชันของรางเพิ่มมากขึ้น โดยที่ทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายสามารถลดความเร็ว ( $V_T/(gH_T)^{0.5}$ ) ได้ประมาณร้อยละ 14 เมื่อเปรียบเทียบกับทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบพื้นราบ

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทบวงมหาวิทยาลัย และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ได้สนับสนุนเงินทุนบางส่วนในการวิจัยครั้งนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

1. Chanson, H., 1994, "Hydraulics of Skimming Flow over Stepped Channels and Spillways", *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 32, No. 3, pp. 445-460.
2. อุดมศักดิ์ อิศรางกูร ณ อยุธยา และ ชัยยุทธ ชินณะราศรี, 2535, "การสูญเสียพลังงานการไหลในรางขั้นบันได", *การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์*, 26-29 พฤศจิกายน, กรุงเทพฯ, หน้า 209-221.
3. Chanson, H., 2001, "Hydraulics Design of Stepped Spillway and Downstream Energy Dissipators", *Dam Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 205-242.
4. Chinnarasri, C., 2002, "Assessing the Flow Resistance of Skimming Flow on the Step Faces of Stepped Spillways", *Dam Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 303-321.
5. Frizell, K.H., 1992, "Hydraulics of Stepped Spillways for RCC Dams and Dam Rehabilitations", *Proceeding of the 3<sup>rd</sup> Specialty Conference on Roller Compacted Concrete, ASCE*, San Diego CA, pp. 423-439.

6. Sorensen, R.M., 1985, "Stepped Spillway Hydraulics Model Investigation", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 111, No. 12, pp. 1461-1472.
7. Peyras, L., Royet, P., and Degoutte, G., 1992, "Flow and Energy Dissipation over Stepped Gabion Weirs", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 5, pp. 707-717.
8. Stephenson, D., 1979, "Gabion Energy Dissipators", *Proceeding of the 13<sup>th</sup> ICOLD Congress*, New Delhi, Q. 50, R. 3, pp. 33-43.
9. Bos, M.G., 1976, "Discharge Measurement Structures", *International Institute for Land Reclamation and Improvement*, Wageningen, The Netherlands, pp. 23-32.
10. Linsley, R.K., 1992, *Water Resources Engineering*, McGraw-Hill, New York, pp. 361-364.
11. Chanson, H., 1995, *Hydraulics Design of Stepped Cascades, Channel, Weirs and Spillways*, Pergamon, Oxford, UK, 292 p.
12. Yasuda, Y. and Ohtsu, I., 1999, "Flow Resistance of Skimming Flow in Stepped Channels", *Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Association for Hydraulic Research (IAHR)-Congress*, Graz, Austria.
13. Mandardo, J. M. and Fabiani, A.L., 1995, "Comparison of Energy Dissipation between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes", *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 33, No.1 pp.119-122.
14. Chanson, H., 1996, "Prediction of the Transition Nappe/Skimming Flow on a Stepped Channel", *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 34, No. 3, pp. 421-429.
15. James, C.S., Comninos, M., and Palmer, M.W., 1999, "Effects of Slope and Step Size on the Hydraulics of Stepped Chutes", *Journal of South African Institute of Civil Engineering*, Vol. 41, No. 2, pp. 1-6.
16. Tatewar, S.P. and Ingle, R.N., 1999, "Nappe Flow on Inclined Stepped Spillways", *Journal of Institute of Engineering, India*, Vol. 79, No. 2, pp. 175-179.
17. Haddad, A.A., 1998, *Water Flow over Stepped Spillway*, Master of Engineering Thesis, Polytechnic of Bari, Italy.
18. Chamani, M.R. and Rajaratnam, N., 1999, "Onset of Skimming Flow on Stepped Spillway", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 125, No. 9, pp. 969-971.
19. Elviro, V. and Mateos, C., 1995, "Spanish Research into Stepped Spillways", *International Journal on Hydropower & Dams*, Vol. 2, No. 5, pp. 61-65.