

## สัมประสิทธิ์ความขรุขระของทางน้ำเปิดที่มีขยะและผักตบชวา Roughness Coefficient of Open Channel Carrying Garbage and Water Hyacinth

สุวิภา กุศลจุง<sup>1,\*</sup> และ เสรี จันทโรโยธา<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร

\*Corresponding author; E-mail address: Suwipa1704@gmail.com

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อที่จะหาสัมประสิทธิ์ความขรุขระของทางน้ำเปิด (Manning's roughness coefficient, n) ของทางน้ำที่มีขยะและผักตบชวา โดยศึกษาในห้องปฏิบัติการและทดลองในรางน้ำเปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 0.60 เมตร ยาว 16 เมตร สูง 0.75 เมตร ที่มีการไหลเวียนของน้ำ ในห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การศึกษานี้ได้จำลองขยะที่ลอยอยู่บนผิวน้ำด้วยวัสดุพลาสติกถ่วงน้ำหนักและไม้ จำนวน 75 การทดลอง และผักตบชวา 50 การทดลอง โดยข้อมูลความลึกการไหลในรางน้ำอยู่ระหว่าง 0.45 เมตร ถึง 0.60 เมตร และอัตราการไหลของน้ำอยู่ระหว่าง 7.87 ลิตรต่อวินาที ถึง 17.4 ลิตรต่อวินาที ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า ทางน้ำที่มีขยะและผักตบชวาทำให้ค่า n ลดลงสูงสุดประมาณ 20% และ 17% ตามลำดับ ความยาวของขยะและผักตบชวาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า n เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ระยะจมของขยะและผักตบชวาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า n เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: การทดลองในห้องปฏิบัติการ, ทางน้ำเปิด, คลอง, สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง, ขยะ, ผักตบชวา

### Abstract

This experimental study was aimed at determining the Manning's roughness coefficient of canals carrying floating garbage and water hyacinth. The study was conducted in a flow circulated rectangular flume of 0.6×16×0.75 m in Coastal Hydraulic Laboratory, Department of Water Resources Engineering, Chulalongkorn University. Floating garbage was modeled using weighed plastic and wood in this experiment with seventy-five sets. In addition, water hyacinth was modeled in this experiment with fifty sets. The experiments were performed with the ranges of flow depths of 0.45 m to 0.60 m and 7.87 liter/s to 17.4 liter/s, respectively. The study results indicated that the garbage and water hyacinth increased the Manning's n roughness coefficient about 20% and 17%, respectively. The results also shown that the increase of length of both garbage and water hyacinth increased the Manning's n roughness coefficient. Moreover, the increase of submerge depth of both garbage and water hyacinth increased the Manning's n roughness coefficient.

Keywords: laboratory experiment, open channel, canal, Manning's n roughness coefficient, garbage, water hyacinth

### 1. บทนำ

ปัญหาเรื่องน้ำท่วมขังระบายน้ำได้ช้า เป็นปัญหาใหญ่ที่เกิดขึ้นในหลายพื้นที่ ได้แก่ ชุมชนเมือง พื้นที่เขตสนามบิน พื้นที่ทางหลวง พื้นที่อุตสาหกรรม พื้นที่เกษตรกรรม เป็นต้น ซึ่งก่อให้เกิดผลเสียทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสุขอนามัย วิธีการบรรเทาปัญหาอย่างหนึ่งคือการปรับปรุงระบบระบายน้ำเพื่อให้สอดคล้องกับปริมาณน้ำที่เข้ามาในพื้นที่นั้นๆ โดยสามารถระบายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำท่วมขังและจะต้องมีการศึกษาและออกแบบให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ

คลองระบายน้ำเป็นระบบระบายน้ำอย่างหนึ่งที่ถูกรออกแบบมาเพื่อระบายน้ำฝน (storm drain) หรือน้ำเสีย (waste water drain) โดยพิจารณาว่าน้ำที่ระบายนั้นเป็นน้ำที่ไม่มีวัสดุอันเจือปนที่ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของน้ำ (เช่น ความหนาแน่น ความหนืด) เปลี่ยนไปจากค่าที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตาม ในสภาพความเป็นจริงคลองระบายน้ำโดยส่วนใหญ่กลับมีขยะ (garbage) และผักตบชวา (water hyacinth) ลอยน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในบริเวณเหนือน้ำของบานประตูระบายน้ำ ตัวอย่างเช่น คลองระบายน้ำของกรุงเทพมหานคร คลองส่งน้ำ แม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณเขื่อนเจ้าพระยา เป็นต้น ที่ผ่านมามีหลายการศึกษาพบว่าขยะและวัชพืชที่ลอยน้ำหรือที่จมหรือกอกอยู่ในน้ำส่งผลให้ความสามารถของการไหลของน้ำในทางน้ำลดลง นอกจากนี้ขยะและวัชพืชยังส่งผลกระทบต่อความสามารถของการไหลผ่านโครงสร้างทางชลศาสตร์ลดลง ดังนั้นขยะและผักตบชวาที่ลอยน้ำในปริมาณต่างๆ อาจมีผลให้ความสามารถในการระบายน้ำของคลองหรือทางน้ำเปิดบริเวณเหนือน้ำของโครงสร้างทางชลศาสตร์เปลี่ยนแปลงไปจากเงื่อนไขที่ออกแบบไว้

การศึกษานี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยจำลองวัสดุลอยน้ำ 2 ชนิด ได้แก่ ขยะลอยน้ำ และผักตบชวา ปนมากับน้ำในแบบจำลองทางน้ำเปิดขนาดกว้าง 0.60 เมตร ยาว 18 เมตร ลึก 0.75 เมตร โดยเป้าหมายเพื่อศึกษาผลของขยะและผักตบชวาในปริมาณต่างๆ ที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การไหลในทางน้ำเปิด (Manning's n) หรือค่า n

### 2. ทฤษฎีและแนวทางการศึกษา

#### 2.1 การไหลในทางน้ำเปิด

สูตรที่ใช้ในการคำนวณการไหลในทางน้ำเปิดที่เป็นที่รู้จัก และยอมรับ และใช้กันอย่างกว้างขวางในงานวิศวกรรมแหล่งน้ำ คือ สูตรหรือสมการของ Manning ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$Q = AV = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการไหล (discharge,  $m^3/วินาที$ ),  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล (flow area,  $m^2$ ),  $P$  คือ เส้นขอบเปียก (wetted perimeter,  $m$ ),  $R$  คือ รัศมีชลศาสตร์ (hydraulic radius,  $m$ ) โดยที่  $R=A/P$ ,  $n$  คือ สัมประสิทธิ์ความขรุขระของทางน้ำเปิด (Manning's roughness coefficient,  $m^{1/6}$ ) และ  $S$  คือ ความลาดชันของพลังงาน (energy slope)

ในการไหลสม่ำเสมอ (uniform flow) ในทางน้ำเปิดคดงรูป (prismatic channel) ที่หน้าตัดคดงรูป และลาดท้องน้ำคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 1 ถ้าตัวแปรทางเรขาคณิตของหน้าตัดทางน้ำ อันได้แก่ ความลึกการไหล ( $y$ ) พื้นที่หน้าตัดการไหล ( $A$ ) รัศมีชลศาสตร์ ( $R$ ) จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงแล้ว จากสมการที่ (1) อัตราการไหล ( $Q$ ) ของทางน้ำนั้น ก็จะเปลี่ยนไปตามความลาดพลังงาน ( $S$ ) และสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning ( $n$ ) ซึ่งในการไหลแบบสม่ำเสมอ ลาดพลังงาน ( $S_f$ ) จะเท่ากับลาดผิวหน้า ( $S_w$ ) และลาดท้องน้ำ ( $S_b$ ) ( $S_f = S_w = S_b = S$ ) ดังนั้นถ้าตัวแปรลาดท้องน้ำเป็นค่าคงที่ด้วย อัตราการไหล ( $Q$ ) ก็จะแปรเปลี่ยนไปตามค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning ( $n$ ) ซึ่งในการคำนวณค่า  $n$  ในกรณีการไหลแบบสม่ำเสมอได้จากสมการที่ (2)

$$n = \frac{1}{Q} AR^2 S^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

การไหลไม่สม่ำเสมอ (non-uniform flow) ที่แปรผันอย่างค่อยเป็นค่อยไป (gradually varied flow) ความลาดท้องน้ำ  $S_0 \leq 0.1$  หรือ  $\theta < 6^\circ$  ในทางน้ำเปิดคดงรูป (prismatic channel) ที่หน้าตัดคดงรูป และลาดท้องน้ำคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2 จะพบว่า ความลาดท้องน้ำ (bed slope,  $S_0$ ) ความลาดเอียงของผิวหน้า (water surface slope,  $S_w$ ) และความลาดพลังงานการไหล (energy slope,  $S_f$ ) ไม่เท่ากัน ดังนั้นสมการสำหรับการไหลไม่สม่ำเสมอจะอยู่ในรูปสมการพลังงาน ดังสมการที่ (3)

$$WS.EL._1 + \frac{V_1^2}{2g} = WS.EL._2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f + h_e \quad (3)$$

เมื่อ  $WS.EL.$  คือ ระดับผิวหน้าจากระดับอ้างอิงที่หน้าตัดใดๆ (water surface elevation,  $m$ ),  $V$  คือ ความเร็วเฉลี่ยของน้ำ (average velocity,  $m/s$ ),  $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $m/s^2$ ),  $h_f$  คือ ค่าการสูญเสียพลังงานจากความเสียดทาน (friction loss,  $m$ ) และ  $h_e$  คือ ค่าการสูญเสียพลังงานจากความหมุนเวียนของกระแสน้ำ (eddy loss,  $m$ ) ทางน้ำที่มีรูปร่างคงที่ค่า  $h_e \approx 0$  ส่วนค่า  $h_f$  ระหว่างหน้าตัดการไหล 2 หน้าตัดจะได้จาก ความลาดชันของพลังงานเฉลี่ยคูณด้วยระยะทางระหว่าง 2 หน้าตัด ( $h_f = \bar{S}_f \times \Delta x$ ) ซึ่งค่า  $\bar{S}_f$  ที่หน้าตัดใดๆ คำนวณได้จากสมการที่ (1) แสดงว่าค่า  $n$  มีผลต่อการไหลแบบไม่สม่ำเสมอ ซึ่งในการคำนวณค่า  $n$  ในกรณีการไหลแบบไม่สม่ำเสมอได้จากสมการที่ (4)

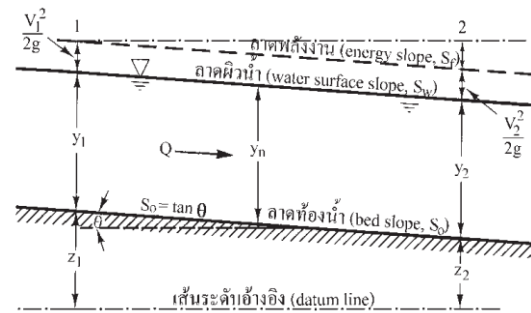
$$n = \left[ \frac{(WS.EL._1 - WS.EL._2 + \frac{Q^2}{2g} (\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2}))}{\frac{\Delta x}{2} Q^2 (\frac{1}{A_1^2 R_1^{4/3}} + \frac{1}{A_2^2 R_2^{4/3}})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ขณะที่ปรากฏในทางน้ำเปิดในรูปของวัตถุที่เป็นชิ้นๆ ที่ทั้งจมมิดในน้ำทั้งหมด (fully immersed) หรือ จมบางส่วน (partially immersed) ทำให้เกิดความต้านทานต่อการไหล (flow resistance) ในรูปแบบของแรงดูดลาก ความดันหรือแรงดูดลากรูปร่าง (pressure or form drag) ที่เป็นผลจากการแยกตัวการไหลจากผิวสัมผัส (flow separation) อธิบายได้ด้วยสมการที่ (5)

$$F_D = C_D A_p \frac{\rho V^2}{2} \quad (5)$$

$F_D$  คือ แรงดูดลากความดันหรือแรงดูดลากรูปร่าง (drag force,  $N$ )  
 $C_D$  คือ สัมประสิทธิ์ดูดลาก (drag coefficient)  
 $V$  คือ ความเร็วการไหลของน้ำเฉลี่ย (average velocity,  $m/s$ )  
 $A_p$  คือ พื้นที่หน้าตัดฉายเงาของวัตถุในระนาบตั้งฉากกับการไหล (projection area,  $m^2$ )

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ (water density,  $kg/m^3$ )  
สัมประสิทธิ์  $C_D$  ขึ้นกับรูปร่างของวัตถุ (form) และเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number,  $Re$ ) ที่ผ่านมามีการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์  $C_D$  มีความสัมพันธ์กับค่า  $n$  ส่วนค่า  $n$  ขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ ได้แก่ ความขรุขระของผิวทางน้ำเปิด (surface roughness) พืชปกคลุม (vegetation) จะมีผลต่อความขรุขระของทางน้ำเปิด ลดพื้นที่หน้าตัดการไหล และยังทำให้การไหลช้าลงด้วย ความผันแปรของทางน้ำเปิด (channel irregularities) ความคดเคี้ยวของทางน้ำเปิด (channel alignment) การตกตะกอนและกัดเซาะ (silting and scouring) สิ่งกีดขวาง (obstruction) รูปร่างการไหลของทางน้ำเปิด (size and shape of channel) ความลึกหรือระดับน้ำและอัตราการไหล (stage and discharges) การแปรผันตามฤดูกาล (seasonal change) และวัสดุตะกอนแขวนลอยและตะกอนท้องน้ำ (suspended material and bed load) เป็นต้น ดังนั้นการที่น้ำมีขยะปนจึงถือว่าเป็นลักษณะของการรวมกันขององค์ประกอบ พืชปกคลุมสิ่งกีดขวางทางน้ำ และการมีวัสดุตะกอนขนาดใหญ่ปนกับน้ำย่อมเป็นผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $n$



รูปที่ 1 การไหลแบบสม่ำเสมอ



รูปที่ 2 การไหลแบบไม่สม่ำเสมอ

## 2.2 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ

ในการศึกษาถึงชลศาสตร์การไหลของคลองที่มีขยะและผักตบชวาโดยใช้แบบจำลองกายภาพ มีตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $n$  ได้แก่

1) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของของไหล (variables characterizing the fluid) อันประกอบด้วย ความหนาแน่นของของไหล (density of fluid,  $\rho$ ) ความหนืดจลน์ของของไหล (kinematics viscosity of fluid,  $\nu$ ) และความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (acceleration due to gravity,  $g$ )

2) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของวัสดุท้องน้ำ (variables characterizing the bed material) ประกอบด้วย ขนาดวัสดุท้องน้ำ (sediment size,  $d_{50}$ ) ความหนาแน่นของวัสดุท้องน้ำ (density of the sediment,  $\rho_s$ ) การกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ (size distribution) ลักษณะของวัสดุท้องน้ำ (grain form) และแรงดึงดูดระหว่างวัสดุท้องน้ำ (cohesion of material)

3) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการไหล (variables characterizing the flow) ประกอบด้วย ความลึกการไหล (depth of approach flow,  $y$ ) ความเร็วการไหล (mean velocity of undisturbed flow,  $V$ ) อัตราการไหล (discharge) ความลาดเอียงของท้องน้ำ (bed slope,  $S_0$ ) และระยะเปิดบานประตู (gate opening,  $w$ )

4) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับวัสดุลอยน้ำ ในกรณีของขยะลอยน้ำ (garbage) ประกอบด้วย ระยะจมของขยะ ( $y_g$ ) ความยาวของปริมาณขยะ ( $L_g$ ) ความหนาแน่นของขยะ (density of the garbage,  $\rho_g$ ) ส่วนในกรณีของผักตบชวา (water hyacinth) ประกอบด้วย ระยะจมของผักตบชวา ( $y_{wh}$ ) ความยาวของปริมาณผักตบชวา ( $L_{wh}$ ) ความหนาแน่นของผักตบชวา (density of the Water Hyacinth,  $\rho_{wh}$ )

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก หากจะพิจารณาตัวแปรทั้งหมดจะก่อให้เกิดความยุ่งยากทั้งในการออกแบบ การทดลองและการวิเคราะห์ เพื่อเป็นการง่ายต่อการวิเคราะห์ตัวแปรดังกล่าว อีกทั้งเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา จึงได้ตั้งสมมติฐานและข้อจำกัด คือ ทดลองในของไหลชนิดเดียวกันและถือว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำมีน้อย ใช้ท้องน้ำแบบยึดแน่น (fixed bed) และใช้ขยะและผักตบชวาที่มีความหนาแน่นเดียวโดยประมาณ นอกจากนี้ อัตราการไหลของน้ำจะเปลี่ยนไปอยู่ในค่าของความลึกน้ำหน้าบาน ( $y_1$ ) ซึ่งจะสัมพันธ์กับระยะเปิดบาน ( $w$ ) ดังนั้นจะเหลือตัวแปรที่นำมาใช้พิจารณาความสัมพันธ์ได้แก่

1) การไหล ประกอบด้วย ความลึกการไหลหน้าบานประตู ( $y_1$ ) และระยะเปิดบานประตู ( $w$ )

2) ขยะลอยน้ำ ประกอบด้วย ระยะจมของขยะ ( $y_g$ ) ความยาวของปริมาณขยะ ( $L_g$ ) 3) ผักตบชวา ประกอบด้วย ระยะจมของผักตบชวา ( $y_{wh}$ ) ความยาวของปริมาณผักตบชวา ( $L_{wh}$ )

เมื่อพิจารณาตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (dimensional parameter) สามารถนำตัวแปรมาเขียนในรูปตัวแปรไร้มิติ ซึ่งในการศึกษาค่า  $n$  จะเปรียบเทียบกับกรณีที่มีและไม่มีขยะและผักตบชวา ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรได้ดังสมการที่ (6) และ (7) สำหรับขยะและผักตบชวา ตามลำดับ

$$\frac{n_g}{n_0} = f\left(\frac{y_g}{y_1}, \frac{L_g}{y_1}\right) \quad (6)$$

$$\frac{n_{wh}}{n_0} = f\left(\frac{y_{wh}}{y_1}, \frac{L_{wh}}{y_1}\right) \quad (7)$$

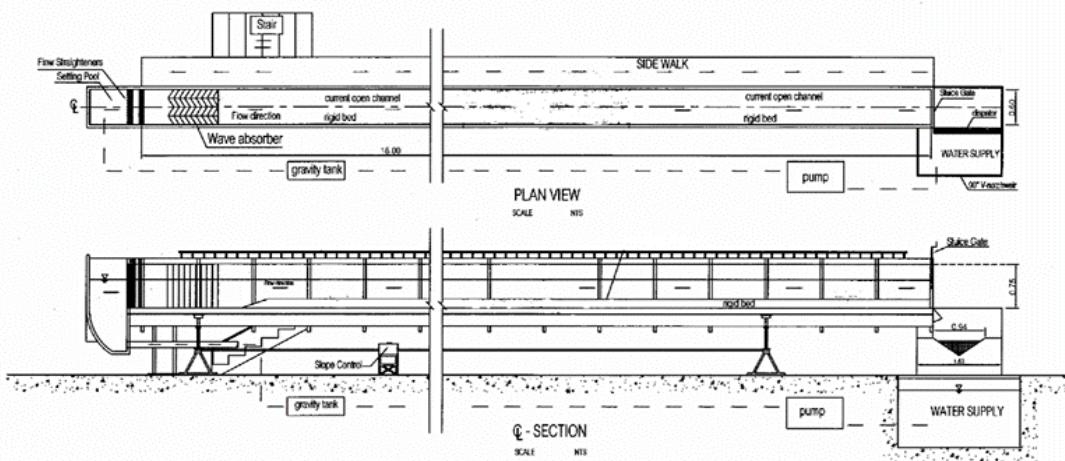
- $n_0$  คือ ค่า  $n$  กรณีไม่มีวัสดุลอยน้ำ
- $n_g$  คือ ค่า  $n$  กรณีขยะ
- $n_{wh}$  คือ ค่า  $n$  กรณีผักตบชวา
- $y_1$  คือ ความลึกการไหลหน้าบาน
- $y_g$  คือ ระยะจมของขยะ
- $y_{wh}$  คือ ระยะจมของผักตบชวา
- $L_g$  คือ ความยาวของปริมาณขยะ
- $L_{wh}$  คือ ความยาวของปริมาณผักตบชวา

### 3. วิธีการศึกษา

#### 3.1 แบบจำลองชลศาสตร์

การศึกษาค้นคว้าทดลองในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีองค์ประกอบ 3 ส่วน

1) แบบจำลองรางจำลองการไหลทางน้ำเปิด (flume) มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 0.60 เมตร ยาว 18 เมตร ลึก 0.75 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3 ผนังสองด้านข้างเป็นกระจกใส พื้นรางเป็นโลหะ ใช้ระบบน้ำหมุนเวียน โดยนำน้ำเข้าสู่รางเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 นิ้ว ต่อมาจากถังน้ำที่มีความจุประมาณ 30 ลูกบาศก์เมตร บนชั้นดาดฟ้าของตึกวิศวกรรม 5 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ทำयरางน้ำติดตั้งบานประตูแบบบานยก



รูปที่ 3 แบบจำลองรางจำลองการไหลทางน้ำเปิด (flume)

(vertical sluice gate) น้ำจะไหลจากรางจำลองลงสู่ถังรับน้ำซึ่งใช้วัดอัตราการไหลแบบฝายสันคมรูปตัววี (V-notch weir) แล้วปล่อยน้ำไปยังบ่อเก็บน้ำด้านล่างของรางและใช้เครื่องสูบน้ำสูบกลับขึ้นไปจนถึงที่ขึ้นลาดฟ้า

2) แบบจำลองวัสดุลอยน้ำ 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4 ได้แก่ กรณีขยะลอยน้ำ (garbage, G) ได้ใช้วัสดุจริง ประกอบด้วย กิ่งไม้ พลาสติก โฟม กระป๋องที่คละกัน และขวดน้ำ ในกรณีของผักตบชวา (water hyacinth, wh) ได้ใช้ผักตบจริงในธรรมชาติ โดยระยะจมของขยะ ( $y_g$ ) และผักตบชวา ( $y_{wh}$ ) เฉลี่ยประมาณ 8 เซนติเมตร และความยาวของปริมาณขยะ ( $L_g$ ) และผักตบชวา ( $L_{wh}$ ) ที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ของความยาวรางน้ำที่พิจารณา (12 เมตร) ทั้งนี้ความหนาแน่นของขยะจะใช้ความหนาแน่นเดียวโดยใส่ขยะกระจายสม่ำเสมอในรางน้ำ และในกรณีของผักตบชวาจะใช้ความหนาแน่นเดียวโดยใส่ผักตบชวากระจายสม่ำเสมอในรางน้ำ ทั้งนี้ความหนาแน่นของขยะและผักตบชวาไม่เท่ากันแม้ว่าระยะจมเฉลี่ยจะเท่ากันก็ตาม

3) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5 ประกอบด้วย เครื่องมือวัดระดับ (point gauge) ติดตั้งบนรางเลื่อนลูกกลิ้งวิ่งบนรางน้ำเปิด เพื่อใช้วัดระดับท้องน้ำและผิวหน้า ณ ตำแหน่งพื้นที่การทดลองที่ต้องการ และฝายสามเหลี่ยมสันคม (90° V-notch weir) ติดตั้งทางด้านท้ายน้ำของรางน้ำ เพื่อใช้วัดอัตราการไหลของน้ำ โดยการอ่านค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (H) ผ่านทางมานอมิเตอร์ (manometer) และนำไปคำนวณอัตราการไหลจากสมการ  $Q = 0.045H^{2.1}$  โดยที่ Q คือ อัตราการไหลในหน่วย ลิตรต่อวินาที และ H คือ ระดับน้ำเหนือสันฝายในหน่วย เซนติเมตร



ขยะ  
รูปที่ 4 แบบจำลองวัสดุลอยน้ำ 2 ชนิด



ผักตบชวา



Point gauge

รูปที่ 5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



ฝายสามเหลี่ยม

ในการออกแบบการทดลองได้พิจารณาถึงแบบจำลองวัสดุลอยน้ำ และสภาพการไหลของน้ำ โดยกรณีของขยะมีปริมาณ 4 ค่า (25%, 50%, 75% และ 100%) และกรณีไม่มีขยะ 1 กรณี สภาพการไหล 5 ค่า (อัตราการไหลอยู่ในช่วง 7.87-16.03 ลิตร/วินาที ระยะเปิดบาน (w) 0.9-1.4 เซนติเมตร) และความลาดชัน 3 ค่า รวม 75 การทดลอง ส่วนกรณีของผักตบชวามีปริมาณ 4 ค่า (25%, 50%, 75% และ 100%) และกรณีไม่มีผักตบชวา 1 กรณี สภาพการไหล 5 ค่า (อัตราการไหลอยู่ในช่วง 13.3-17.4 ลิตร/วินาที

ระยะเปิดบาน (w) 0.9-1.4 เซนติเมตร) และความลาดชัน 2 ค่า รวม 50 การทดลอง ความลึกการไหลอยู่ระหว่าง 0.45 เมตร ถึง 0.60 เมตร

ขั้นตอนของการทดลอง แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การเตรียมการก่อนการทดลอง และ การดำเนินการทดลอง ในการเตรียมการก่อนการทดลอง เริ่มต้นโดยติดตั้งเครื่องมือวัดระดับ (point gauge) เข้ากับลาดตลิ่งเลื่อนและที่รอง ที่ตำแหน่งจากประตูน้ำ 0.3, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 และ 12 เมตร ต่อมาทดสอบหาค่าความลาดเอียงของรางจำลอง หลังจากนั้นทดสอบหาค่าอัตราการไหล (Q) และระยะเปิดบานประตู (w) โดยเปิดวาล์วของรางน้ำเปิด ปล่อยน้ำเข้ารางน้ำเปิดอย่างช้าๆ จนได้อัตราการไหลที่ต้องการตามการคำนวณเบื้องต้นในแต่ละการทดลอง โดยใช้ฝายสันคมรูปตัววีวัดอัตราการไหลของน้ำ พร้อมทั้งปรับระดับยกบานประตูท้ายน้ำ ให้ได้ความลึกการไหลเข้าสู่แบบจำลองตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ และบันทึกค่า สูดท้ายต้องเตรียมขยะและผักตบชวาในปริมาณตามที่ได้คำนวณไว้ เพื่อให้เพียงพอกับพื้นที่ทดลองในรางน้ำยาว 12 เมตร

ในการดำเนินการทดลอง มีขั้นตอน คือ

- 1) ปรับค่าความลาดชันของท้องรางน้ำเปิด โดยเริ่มที่ความชันท้องน้ำ ( $S_0$ ) เท่ากับ 0 ( $S_0$ )
- 2) ชั่งน้ำในรางจำลองเพื่อกำหนดระดับอ้างอิงตลอดทั้งราง โดยใช้ระดับอ้างอิง +0.000 ที่ท้องน้ำบริเวณบานประตู และปรับระดับของเครื่องมือวัดระดับ (point gauge) ให้เป็น 0 ที่ระดับอ้างอิง ดังนั้นค่าระดับผิวหน้าและค่าระดับท้องน้ำในการทดลองจะอ้างอิงจากระดับอ้างอิงที่กำหนด และค่าอ้างอิงดังกล่าวจะต้องทำใหม่เมื่อเปลี่ยนความลาดชันท้องน้ำใหม่
- 3) วัดระดับท้องน้ำที่ตำแหน่งจากประตูน้ำ 0.3, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 และ 12 เมตร
- 4) ปล่อยน้ำตามเงื่อนไขการไหลที่ 1 โดยปรับอัตราการไหลของน้ำ (Q) และปรับระดับยกบานประตูท้ายน้ำ (w) ตามกำหนด
- 5) รอประมาณ 1 ชั่วโมง หรือจนกว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในรางน้ำ และวัดระดับผิวหน้าและระดับท้องน้ำที่ตำแหน่งจากประตูน้ำ 0.3, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 และ 12 เมตร กรณีไม่มีขยะ โดยอ่านค่าระดับอย่างน้อย 2 ครั้งเพื่อนำมาเฉลี่ย
- 6) ใส่ขยะเต็มพื้นที่ระยะห่างจากประตูน้ำ 3 เมตร (25%) รอประมาณ 30 นาที หรือจนกว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในรางน้ำ และวัดระดับผิวหน้าและระดับท้องน้ำที่ตำแหน่งจากประตูน้ำ 0.3, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 และ 12 เมตร กรณีมีขยะ โดยอ่านค่าระดับอย่างน้อย 2 ครั้งเพื่อนำมาเฉลี่ย
- 7) ทำซ้ำข้อ 6) โดยเปลี่ยนปริมาณขยะเป็น 50%, 75% และ 100%
- 8) ทำซ้ำข้อ 1) ถึง ข้อ 7) โดยเปลี่ยนเงื่อนไขการไหลของน้ำที่ 2, 3, 4 และ 5
- 9) ทำซ้ำข้อ 1) ถึง ข้อ 8) โดยเปลี่ยนความลาดชันท้องน้ำ เป็น 0.0001 ( $S_1$ ) และ 0.0002 ( $S_2$ ) และ

10) ทำซ้ำข้อ 1) ถึง ข้อ 9) โดยเปลี่ยนเป็นผักตบชวา โดยในการทดลอง 1 เงื่อนไขของการไหล จะต้องทดลองให้ครบในกรณีไม่มีขยะ และมีขยะ 25%, 50%, 75% และ 100% เนื่องจากต้องการให้เงื่อนไขการไหลเดียวกัน

### 3.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิเคราะห์ข้อมูล ประกอบด้วย

- 1) การหาค่าระดับน้ำ
  - 2) การคำนวณสัมประสิทธิ์ความขรุขระในทางน้ำเปิด (Manning's n)
  - 3) การวิเคราะห์ผลของวัสดุลอยน้ำต่อระดับน้ำ
  - 4) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่า n
- การหาค่าระดับน้ำจากข้อมูลการทดลองได้วัดระดับผิวหน้าที่ระยะ 0.3, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 และ 12 เมตรจากบานประตู พบว่าข้อมูลจากการวัดมี

ลักษณะชั้นลง โดยทั่วไประดับผิวน้ำที่หน้าบานประตูต้องมีระดับต่ำสุดและค่อยๆ เพิ่มระดับขึ้นไปทางเหนือน้ำ ดังนั้น เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะการไหลของน้ำจริง จึงต้องลากเส้นระดับผิวน้ำใหม่โดยพิจารณาจากเส้นผิวน้ำให้มีความใกล้เคียงข้อมูลจากการทดลอง เป็นตัวแทนค่าจากการวัด (observed data)

การคำนวณค่า  $n$  ซึ่งจะใช้สมการที่ (4) โดยใช้หลักการวิเคราะห์การไหลเปลี่ยนแปลงน้อยวิธีขั้นตอนโดยตรง (direct step method) ซึ่งต้องทดลองเปลี่ยนค่า  $n$  ที่ทำให้ระดับผิวน้ำจากการคำนวณ (computed data) เท่ากับหรือใกล้เคียงกับผิวน้ำจากการวัด (observed data) ซึ่งจะพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดและค่าจากการคำนวณจากค่า Mean Absolute Error (MAE) หากค่า  $n$  ใด ที่ทำให้ค่า MAE น้อยที่สุดแสดงว่าค่า  $n$  เหมาะสม

การวิเคราะห์ผลของวัสดุลอยน้ำต่อระดับน้ำจะเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำจากผลของขยะที่ปริมาณต่างๆ และการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำจากผลของผักตบชวาที่ปริมาณต่างๆ

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่า  $n$  สามารถศึกษาโดยพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ โดยจะศึกษาตามการวิเคราะห์ที่เป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (dimensional parameter) ดังสมการที่ (6) และ สมการที่ (7) สำหรับขยะและผักตบชวา ตามลำดับ เพื่อสร้างกราฟหรือสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ และนำผลของขยะและผักตบชวามาเปรียบเทียบกันเมื่อความลึกของวัสดุทั้ง 2 ที่มีค่าใกล้เคียงกันโดยระยะจมนประมาณ 8 เซนติเมตร

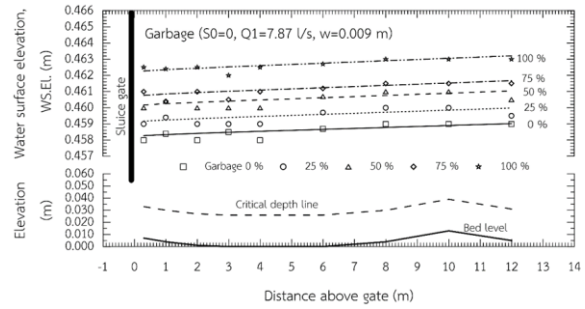
#### 4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

##### 4.1 ผลของขยะและผักตบชวาต่อระดับน้ำ

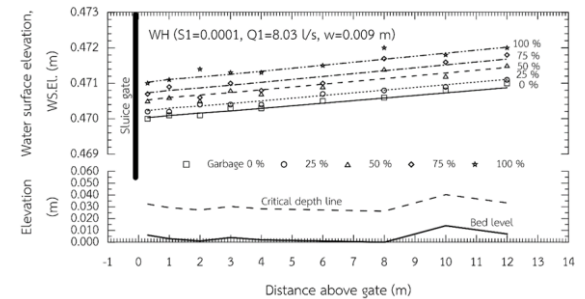
ในกรณีของขยะพบว่าที่ความลาดชันท้องน้ำต่างๆ และทุกลักษณะการไหลของน้ำให้ผลในลักษณะเดียวกัน ได้แสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 6 ก) ความลาดชันท้องน้ำ ( $S_0$ ) 0 อัตราการไหล (Q) 7.87 ลิตร/วินาที ระยะเปิดบาน ( $w$ ) 0.9 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาผลของขยะต่อระดับน้ำ พบว่า ระดับผิวน้ำในกรณีมีและไม่มีขยะสูงกว่าเส้นการไหลวิกฤติ ผิวน้ำจึงมีลักษณะเป็น H2 เมื่อท้องน้ำไม่มีความลาดชัน และผิวน้ำจึงมีลักษณะเป็น M1 เมื่อท้องน้ำมีความลาดชัน โดยระดับผิวน้ำสูงสุดด้านต้นน้ำ (ระยะ 12 เมตร) และระดับผิวน้ำค่อยๆ ลดลงจนระดับผิวน้ำต่ำสุดบริเวณหน้าบาน และยังพบว่าทุกการไหลของน้ำระดับผิวน้ำสูงขึ้นตามปริมาณขยะที่เพิ่มขึ้น

ในกรณีของผักตบชวาพบว่าที่ความลาดชันท้องน้ำต่างๆ และทุกลักษณะการไหลของน้ำให้ผลในลักษณะเดียวกัน ได้แสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 6 ข) ความลาดชันท้องน้ำ ( $S_0$ ) 0.0001 อัตราการไหล (Q) 8.03 ลิตร/วินาที ระยะเปิดบาน ( $w$ ) 0.9 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาผลของผักตบชวาต่อระดับน้ำ พบว่า ระดับผิวน้ำในกรณีมีและไม่มีขยะสูงกว่าเส้นการไหลวิกฤติ ผิวน้ำจึงมีลักษณะเป็น M1 เนื่องจากทดลองเฉพาะในกรณีท้องน้ำมีความลาดชัน โดยระดับผิวน้ำสูงสุดด้านต้นน้ำ (ระยะ 12 เมตร) และระดับผิวน้ำค่อยๆ ลดลงจนระดับผิวน้ำต่ำสุดบริเวณหน้าบาน และยังพบว่าทุกการไหลของน้ำระดับผิวน้ำสูงขึ้นตามปริมาณผักตบชวาที่เพิ่มขึ้น

ระดับน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณขยะและผักตบชวาเพิ่มขึ้นแสดงว่าขยะและผักตบชวาทำให้ทางน้ำมีความเสียดทานเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ได้พิจารณาทางน้ำบริเวณเหนือน้ำของประตูระบาย ดังนั้นระดับน้ำที่เพิ่มขึ้นอาจจะเกิดจากผลของขยะและผักตบชวาไปลดประสิทธิภาพการไหลผ่านบานประตู ซึ่งเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้ระดับน้ำเพิ่มขึ้น



ก) ขยะ



ข) ผักตบชวา

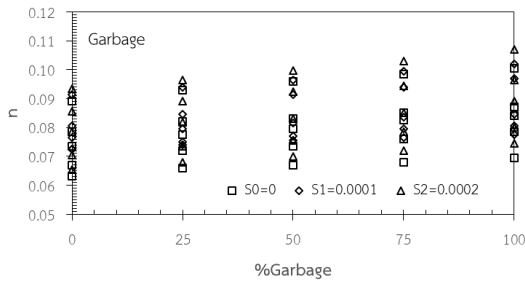
รูปที่ 6 ตัวอย่างระดับน้ำจากการทดลอง

##### 4.2 ผลของปริมาณขยะและผักตบชวาต่อค่า $n$

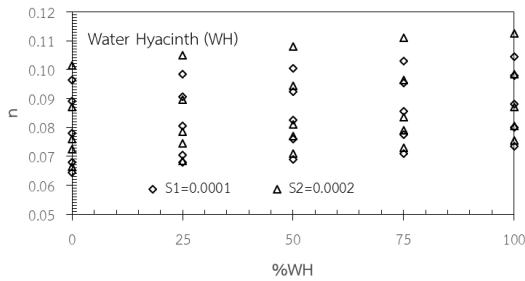
เมื่อพิจารณารูปภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $n$  กับปริมาณเปอร์เซ็นต์ของขยะ (%Garbage) จากรูปที่ 7 ก) พบว่า ค่า  $n$  ที่ปริมาณขยะต่างๆ มีความผันแปรค่อนข้างสูง และไม่มีความสัมพันธ์กับความลาดชันท้องน้ำ โดยค่า  $n$  อยู่ในช่วง 0.063-0.094, 0.066-0.097, 0.067-0.100, 0.068-0.103 และ 0.070-0.107 เฉลี่ย 0.077, 0.080, 0.083, 0.085 และ 0.087 เมื่อปริมาณขยะเป็น 0, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามค่า  $n$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเปอร์เซ็นต์ของขยะเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณารูปภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $n$  กับปริมาณเปอร์เซ็นต์ของผักตบชวา (%WH) จากรูปที่ 7 ข) พบว่า ค่า  $n$  ที่ปริมาณผักตบชวาต่างๆ มีความผันแปรค่อนข้างสูง และไม่มีความสัมพันธ์กับความลาดชันท้องน้ำ โดยค่า  $n$  อยู่ในช่วง 0.065-0.102, 0.068-0.105, 0.069-0.108, 0.071-0.111 และ 0.074-0.113 เฉลี่ย 0.080, 0.082, 0.085, 0.088 และ 0.090 เมื่อปริมาณผักตบชวาเป็น 0, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามค่า  $n$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเปอร์เซ็นต์ของขยะเพิ่มขึ้น

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ของขยะและผักตบชวาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $n$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากขยะและผักตบชวาเพิ่มความเสียดทานให้แก่ทางน้ำ อย่างไรก็ตามค่า  $n$  อาจจะมีค่าสูงกว่าปกติ ซึ่งอาจจะเป็นเพราะรางน้ำที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีอายุการใช้งานมานาน อาจจะมีการสึกกร่อนของโลหะท้องน้ำตามอายุที่อาจทำให้ค่า  $n$  มีค่ามากกว่าท้องน้ำที่เป็นโลหะใหม่ๆ อย่างไรก็ตามการศึกษานี้เป็นการศึกษาเชิงเปรียบเทียบ ค่า  $n$  ของทางน้ำที่มีขยะและผักตบชวากับทางน้ำที่ไม่มีขยะหรือผักตบชวา จึงไม่ส่งผลต่อการศึกษานี้



ก) ขยะ



ข) ผักตบชวา

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $n$  กับปริมาณเปอร์เซ็นต์ของขยะ (%Garbage) และผักตบชวา (%WH) ที่ความลาดชันต่างๆ

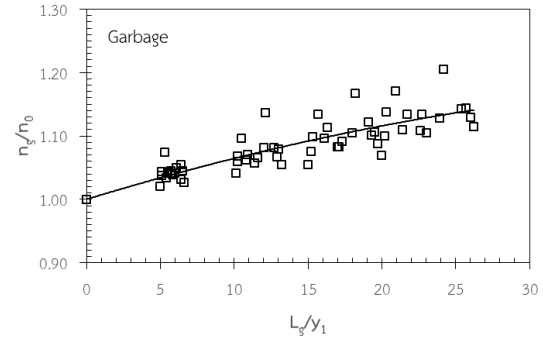
#### 4.3 ผลของความยาวของขยะและผักตบชวาต่อค่าสัดส่วนของค่า $n$ กรณีมีและไม่มีวัสดุลอยน้ำ

การศึกษาผลของความยาวของวัสดุลอยน้ำต่อค่า  $n$  ในกรณีของขยะได้พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนค่า  $n$  กรณีมีขยะต่อกรณีไม่มีขยะ ( $n_g/n_0$ ) กับค่าสัดส่วนระหว่างความยาวขยะต่อความลึกน้ำ ( $L_g/y_1$ ) ส่วนในกรณีของผักตบชวาได้พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนของค่า  $n$  กรณีมีผักตบชวาต่อกรณีมีผักตบชวา ( $n_{wh}/n_0$ ) กับค่าสัดส่วนระหว่างความยาวของผักตบชวาต่อความลึกน้ำ ( $L_{wh}/y_1$ ) หากค่า  $n_g/n_0$  และ  $n_{wh}/n_0$  เพิ่มขึ้น แสดงว่าประสิทธิภาพการไหลของน้ำลดลง ในทางกลับกันหากค่า  $n_g/n_0$  และ  $n_{wh}/n_0$  ลดลง แสดงว่าประสิทธิภาพการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของค่า  $L_g/y_1$  และ  $L_{wh}/y_1$  แสดงว่าปริมาณขยะหรือผักตบชวาเพิ่มขึ้น

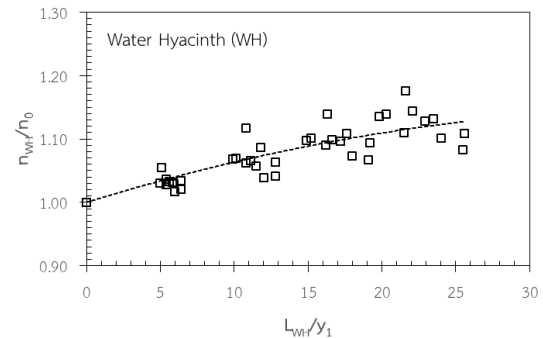
ผลการศึกษารณีของขยะจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $n_g/n_0$  กับค่า  $L_g/y_1$  โดยค่า  $L_g/y_1$  อยู่ในช่วง 0-26.2 และค่า  $n_g/n_0$  อยู่ในช่วง 1-1.205 ดังแสดงในรูปที่ 8 ก) แสดงให้เห็นว่า ค่า  $n_g/n_0$  เพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $L_g/y_1$  เพิ่มขึ้น โดยลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้ง แสดงว่า ค่า  $n_g/n_0$  เพิ่มขึ้นสูงในช่วงความยาวขยะน้อย และเมื่อความยาวขยะมากขึ้นอัตราการเพิ่มขึ้นลดลง ลักษณะดังกล่าวอาจเป็นไปได้ว่าเมื่อค่า  $L_g/y_1$  เพิ่มขึ้น จนถึงค่าหนึ่งจะทำให้ค่า  $n_g/n_0$  คงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจากค่าก่อนหน้านั้น

ผลการศึกษารณีของผักตบชวาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $n_{wh}/n_0$  กับค่า  $L_{wh}/y_1$  โดยค่า  $L_{wh}/y_1$  อยู่ในช่วง 0-25.6 และค่า  $n_{wh}/n_0$  อยู่ในช่วง 1-1.177 ดังแสดงในรูปที่ 8 ข) แสดงให้เห็นว่า ค่า  $n_{wh}/n_0$  เพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $L_{wh}/y_1$  เพิ่มขึ้น โดยลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้ง แสดงว่า ค่า  $n_{wh}/n_0$  เพิ่มขึ้นสูงในช่วงความยาวผักตบชวาน้อย และเมื่อความยาวผักตบชวามากขึ้นอัตราการเพิ่มขึ้นลดลง ลักษณะดังกล่าวอาจเป็นไปได้ว่าเมื่อค่า  $L_{wh}/y_1$  เพิ่มขึ้น จนถึงค่าหนึ่งจะทำให้ค่า  $n_{wh}/n_0$  คงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจากค่าก่อนหน้านั้น

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความยาวของขยะและผักตบชวาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $n_g/n_0$  และค่า  $n_{wh}/n_0$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากเนื่องจากขยะและผักตบชวาเพิ่มความเสียดทานให้แก่ทางน้ำ



ก) ขยะ



ข) ผักตบชวา

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $n_g/n_0$  กับ  $L_g/y_1$  กรณีขยะ และ  $n_{wh}/n_0$  กับ  $L_{wh}/y_1$  กรณีผักตบชวา

#### 4.4 ผลของระยะจมของขยะและผักตบชวาต่อค่าสัดส่วนของค่า $n$ กรณีมีและไม่มีวัสดุลอยน้ำ

การศึกษาผลของระยะจมของวัสดุลอยน้ำต่อค่า  $n$  ในกรณีของขยะลอยน้ำได้พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนของค่า  $n$  กรณีไม่มีขยะต่อกรณีมีขยะ ( $n_g/n_0$ ) กับค่าสัดส่วนระหว่างระยะจมของขยะต่อความลึกน้ำ ( $y_g/y_1$ ) ส่วนในกรณีของผักตบได้พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนของค่า  $n$  กรณีมีผักตบชวาต่อกรณีมีผักตบชวา ( $n_{wh}/n_{wh}$ ) กับค่าสัดส่วนระหว่างความยาวของผักตบชวาต่อความลึกน้ำ ( $y_{wh}/y_1$ ) หากค่า  $n_g/n_0$  หรือ  $n_{wh}/n_0$  เพิ่มขึ้น จะแสดงว่าประสิทธิภาพการไหลของน้ำลดลง ในทางกลับกันหากค่า  $n_g/n_0$  หรือ  $n_{wh}/n_0$  ลดลงแสดงว่าประสิทธิภาพการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของค่า  $y_g/y_1$  หรือ  $y_{wh}/y_1$  แสดงว่าระยะจมของขยะหรือผักตบชวาเพิ่มขึ้น

ผลการศึกษารณีของขยะจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $n_g/n_0$  กับค่า  $y_g/y_1$  โดยค่า  $y_g/y_1$  อยู่ในช่วง 0.134-0.176 อย่างไรก็ตามในกรณีไม่มีขยะ  $y_g/y_1$  จะเท่ากับ 0 จึงนำมาร่วมพิจารณา และค่า  $n_g/n_0$  อยู่ในช่วง 1-1.205 ดังแสดงในรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่า ค่า  $n_g/n_0$  เพิ่มขึ้น เมื่อค่า  $y_g/y_1$  เพิ่มขึ้น และอาจจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงขึ้นในลักษณะเอกซโพเนนเชียลเมื่อ  $y_g/y_1$  เป็น 1 หรือกรณีขยะจมตลอดความลึก

ผลการศึกษารณีของผักตบชวาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $n_{wh}/n_0$  กับค่า  $y_{wh}/y_1$  โดยค่า  $y_{wh}/y_1$  อยู่ในช่วง 0.132-0.172 อย่างไรก็ตามในกรณีไม่มีขยะ  $y_{wh}/y_1$  จะเท่ากับ 0 จึงนำมาร่วมพิจารณา และค่า  $n_{wh}/n_0$

อยู่ในช่วง 1-1.177 ดังแสดงในรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่า ค่า  $n_{wh}/n_0$  เพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $y_{wh}/y_1$  เพิ่มขึ้น และอาจจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงขึ้นในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อ  $y_{wh}/y_1$  เป็น 1 หรือกรณีขยะจมตลอดความลึก

ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าระยะจมของขยะและผักตบชวาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $n_g/n_0$  และค่า  $n_{wh}/n_0$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากขยะหรือผักตบชวาที่จมมากขึ้นจะไปขวางการไหลของน้ำมากขึ้นหรือเพิ่มความเสียดทานของทางน้ำ

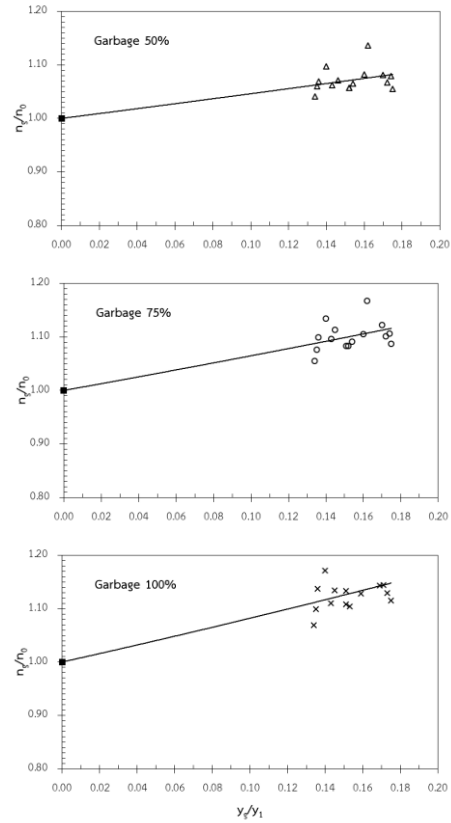
#### 4.5 การเปรียบเทียบผลของขยะและผักตบชวาต่อชลศาสตร์การไหลของทางน้ำเปิด

การเปรียบเทียบผลของขยะและผักตบชวาที่มีระยะจมประมาณ 8 เซนติเมตรต่อชลศาสตร์การไหลของทางน้ำเปิด ได้พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนค่า  $n$  กรณีมีขยะต่อกรณีไม่มีขยะ ( $n_g/n_0$ ) กับค่าสัดส่วนระหว่างความยาวขยะต่อความลึกน้ำ ( $L_g/y_1$ ) ส่วนในกรณีของผักตบชวาได้พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนของค่า  $n$  กรณีมีผักตบชวาต่อกรณีมีผักตบชวา ( $n_{wh}/n_0$ ) กับค่าสัดส่วนระหว่างความยาวของผักตบชวาต่อความลึกน้ำ ( $L_{wh}/y_1$ ) ดังแสดงในรูปที่ 10

เมื่อพิจารณารูปที่ 11 พบว่า ค่า  $n_g/n_0$  สูงกว่าค่า  $n_{wh}/n_0$  แสดงว่าขยะเพิ่มค่า  $n$  มากกว่าผักตบชวา โดยเฉพาะเมื่อความยาวของปริมาณขยะเพิ่มขึ้นยิ่งทำให้ค่า  $n$  เพิ่มมากกว่าผักตบชวาอย่างชัดเจน นั่นเป็นเพราะขยะเป็นวัสดุที่แข็งกว่า มีการอัดแน่นและจมเพิ่มขึ้นในบริเวณหน้าบานประตูเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจึงทำให้ทางน้ำมีความเสียดทานมากกว่าเมื่อความยาวของขยะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อขยะและผักตบชวามีปริมาณน้อย ขยะไม่มีการอัดตัวและลอยเท่ากับผักตบชวาจึงส่งผลให้ความเสียดทานที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกัน

### 5. สรุปผลการวิจัย

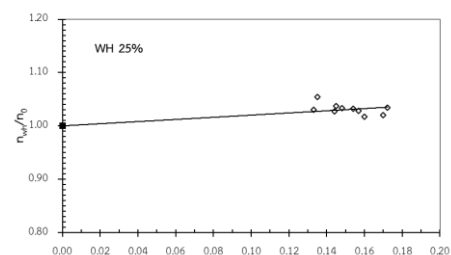
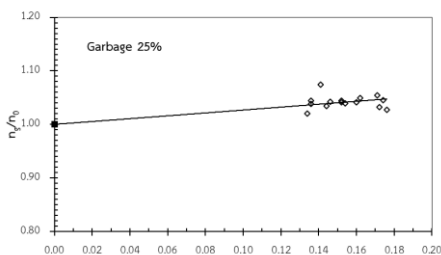
ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าขยะและผักตบชวาส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำในทางน้ำเปิด ค่า  $n$  เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณขยะและผักตบชวาเพิ่มขึ้น ความยาวของปริมาณขยะและผักตบชวาส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า  $n$  อย่างชัดเจน โดยมีลักษณะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงเมื่อปริมาณขยะหรือผักตบชวาเพิ่มขึ้น ในกรณีของขยะค่า  $n$  เพิ่มขึ้นถึง 20.5 เปอร์เซ็นต์จากกรณีไม่มีขยะ เมื่อความยาวขยะต่อความลึกน้ำ ( $L_g/y_1$ ) มากกว่า 20 หรือปริมาณขยะเต็มพื้นที่ และในกรณีของผักตบชวาเพิ่มขึ้นถึง 17.2 เปอร์เซ็นต์จากกรณีไม่มีผักตบชวา เมื่อความยาวผักตบชวาต่อความลึกน้ำ ( $L_{wh}/y_1$ ) มากกว่า 20 หรือปริมาณผักตบชวาเต็มพื้นที่

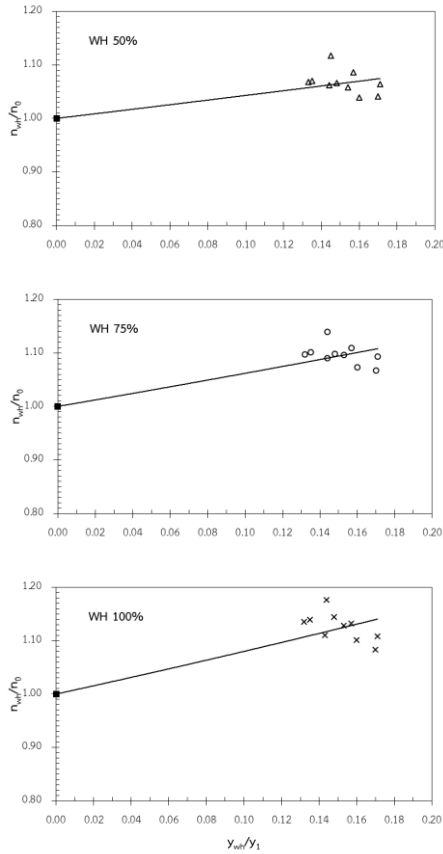


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $n_g/n_0$  กับ  $y_g/y_1$  กรณีขยะที่ 25%, 50%, 75% และ 100%

ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าระยะจมของขยะและผักตบชวาส่งผลให้ค่า  $n$  เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ได้ทดลองระยะจมของขยะและผักตบชวาต่อความลึกน้ำ ( $y_g/y_1$  และ  $y_{wh}/y_1$ ) ในช่วงที่แคบ 0.134-0.176 และ 0.132-0.172 สำหรับกรณีของขยะและผักตบชวา ตามลำดับ จึงทำให้เห็นแนวโน้มยังไม่ชัดเจน นอกจากนี้ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าขยะทำให้ประสิทธิภาพการไหลของน้ำลดลงมากกว่ากรณีของผักตบชวา

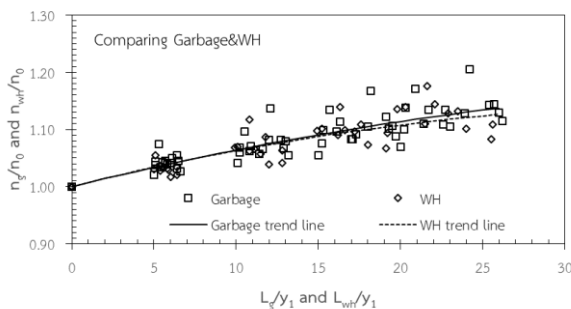
ผลจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $n_g/n_0$  กับ  $L_g/y_1$  กรณีขยะ และ  $n_{wh}/n_0$  กับ  $L_{wh}/y_1$  กรณีผักตบชวา ดังรูปที่ 8 สามารถนำไปใช้ในการปรับค่า  $n$  ในกรณีทางน้ำที่มีขยะและผักตบชวา อย่างไรก็ตามควรพิจารณาค่าระยะจมของขยะและผักตบชวาต่อความลึกน้ำ ( $y_g/y_1$  และ  $y_{wh}/y_1$ ) ในช่วง 0.13-0.17





รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $n_{wt}/n_0$  กับ  $y_{wt}/y_1$  กรณีผักตบชวาที่ 25%, 50%, 75% และ 100%

อย่างไรก็ตามการทดลองนี้ได้ให้ผลการศึกษาของการมีขยะและผักตบชวาบนมาบกับทางน้ำเปิดต่อค่า  $n$  ของทางน้ำอย่างชัดเจน ถึงแม้ว่าจะมีข้อจำกัดของการศึกษาของระยะของขยะและผักตบชวา และ ลักษณะการไหลในทางน้ำ ดังนั้นจึงควรจะมีการขยายการศึกษานี้ต่อไปเพื่อให้ได้คำตอบที่ครอบคลุมเงื่อนไขต่างๆ ที่เป็นสภาพจริง หรือใกล้เคียงที่เป็นจริง ตลอดจนการศึกษาสภาพจริงในสนาม และศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของผลของขยะและผักตบชวาต่อการไหลผ่านบานประตู ซึ่งจะต้องใช้เวลาและทุนในการศึกษาสูง ซึ่งการศึกษานี้จะเป็นไปไม่ได้ถ้าไม่ได้รับการสนับสนุนจากแหล่งทุนต่างๆ ที่เห็นประโยชน์ และความสำคัญในปัญหาดังกล่าว



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $n_g/n_0$  กับ  $L_g/y_1$  ในกรณีขยะ และ ค่า  $n_{wt}/n_0$  กับ  $L_{wt}/y_1$  ในกรณีผักตบชวา

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณ คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ที่ให้การช่วยเหลือสนับสนุน ทั้งกำลังกาย กำลังใจ และให้คำปรึกษาในการทำวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ภาณุสิทธิ์ ดวงศรี, สุวิภา กุศลจง, เสรี จันทโรยธา และ อนุรักษ ศรี อริยวัฒน์. (2559). การไหลของคลองระบายน้ำที่มีขยะปน. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21*, สงขลา, 28-30 มิถุนายน 2559, หน้า 2135-2143.
- [2] Muhammed, M.M., Yusof, K.W., Mustafa, M.R.U., and Ghani, A.A. (2015). Vegetated open channel flow for urban stormwater management: A review. *E-proceedings of the 36<sup>th</sup> IAHR World Congress*, The Hague, the Netherlands, 28<sup>th</sup> June-3<sup>rd</sup> July 2015, pp.1-8.
- [3] Stucksmith, J.D., Boxall, J.B., and Guymmer, I. (2010). Effects of emergent and submerged natural vegetation on longitudinal mixing in open channel flow. *Water Resources Research*, 46(W04504), pp. 1-14.
- [4] Wu, F.C., Shen, H.W., and Chou, Y.J. (1999). Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(9), pp. 934-942.
- [5] สุวิภา กุศลจง, ภาณุสิทธิ์ ดวงศรี, เสรี จันทโรยธา, และ อนุรักษ ศรี อริยวัฒน์. (2560). สัมประสิทธิ์อัตราการไหลของฝายโอ๊กในทางน้ำที่มีขยะปน. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 22*, สงขลา, 18-20 กรกฎาคม 2560, หน้า 450-457.
- [6] Chow, V.T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. The McGraw-Hill Companies, Inc., pp.89-347.
- [7] Henderson, F.M. (1966). *Open Channel Flow*. McMillan Publishing Co., Inc., pp.125-162.
- [8] Sturm, T.W. (2001). *Open Channel Hydraulics*. The McGraw-Hill Companies, Inc., pp.97-200.
- [9] เสรี จันทโรยธา และ ชัยพันธุ์ รักริวิจัย (2556). *ชลศาสตร์การไหลในทางน้ำเปิดขั้นพื้นฐาน*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 129-290.
- [10] Rouse, H. (1978). *Elementary Mechanics of Fluids*. Dover Publications, Inc., N.Y., U.S.A., pp.1-300.
- [11] Daugherty, R.L., and Franzini, J.B. (1989). *Fluid Mechanics with Engineering Application*, SI Metric Edition. McGraw-Hill Book Co., N.Y., U.S.A., pp.1-800.