

โครงการวิศวกรรมชลประทาน

(02207499)

ที่ 8/2562

เรื่อง

การศึกษาหาอัตราการไหลและการสลายพลังงานของการไหลผ่านฝายกล่องตาข่าย

A study of flow rate and energy dissipater of flow through gabion weir

โดย

นายทัตพงศ์ สุทธิวิธา

นายพงศธร แสงวิรุณทร

นายศักรินทร์ คำเจริญ

เสนอ

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา-ชลประทาน)

พุทธศักราช 2562

(ชื่อภาษาไทย) การศึกษาหาอัตราการไหลและการสลายพลังงานของ
การไหลผ่านฝายกล่องตาข่าย

(ชื่อภาษาอังกฤษ) A study of flow rate and energy dissipater of flow
through gabion weir

โดย

ทัตพงศ์	สุทธิวรา	5920500352
พงศธร	แสงวิรุณทร	5920500468
ศักรินทร์	คำเจริญ	5920503262

โครงการวิศวกรรมชลประทาน
ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมชลประทาน

ใบรับรองโครงการวิศวกรรมชลประทาน

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เรื่อง : การศึกษาหาอัตราการไหลและการสลายพลังงานของการไหลผ่านฝายกล่องตาข่าย

Title : A study of flow rate and energy dissipater of flow through gabion weir

นามผู้จัดทำ

นายทัตพงศ์ สุทธิวิชา

นายพงศธร แสงวิภูณทร

นายศักรินทร์ คำเจริญ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ



.....
(รศ.ดร.สมชาย ดอนเจตย์)

กรรมการ



.....
(อ.ดร.ทองศักดิ์ ภัทรภาวุฒิชัย)

กรรมการ



.....
(อ.ดร.เอกศวรา สิทธิโชค)

หัวหน้าภาควิชา

.....
(ผศ.นิมิตร เด็ดฉันทพิพัฒน์)

.....

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การศึกษาหาอัตราการไหลและการสูญเสียพลังงานของการไหลผ่านฝายกล่องตาข่าย

โดย : นายทัตพงศ์ สุทธิวิธา

นายพงศธร แสงวิรุณทอ

นายศักรินทร์ คำเจริญ

อาจารย์ที่ปรึกษา :



(รศ.ดร.สมชาย ดอนเจดีย์)

...../...../.....

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราการไหลและการสูญเสียพลังงานของการไหลผ่านฝายกล่องตาข่าย โดยได้ทำการทดลองโดยใช้รางทดลองที่มีความยาว 38 m กว้าง 1.2 m ลึก 1.2 m กล่องตาข่ายขนาด กว้าง x สูง x ยาว เท่ากับ $20 \times 20 \times 120 \text{ cm}^3$ และหินผิวขรุขระที่มีขนาดความกว้าง 5.506 cm ความยาว 7.765 cm ความหนา 3.751 cm ซึ่งมี shape factor คือ 6.511 cm ได้ถูกนำมาใช้ทำเป็นฝาย ฝายกล่องตาข่ายที่มีความหนา 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 m และความสูง 12, 15, 20 และ 21 cm ได้ถูกนำมาทดสอบในครั้งนี้ จากการศึกษาพบว่าอัตราการไหลผ่านฝายมีค่าลดลงเมื่อความสูงหรือความหนาของฝายเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การสูญเสียพลังงานสัมพัทธ์มีค่าลดลงเมื่อค่าฟรูดนัมเบอร์ด้านหน้าฝายมีค่าเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: กล่องตาข่าย; ฝาย; อัตราการไหล; การสูญเสียพลังงาน; ฟรูดนัมเบอร์

เลขที่เอกสารอ้างอิงภาควิชา E4008-SCD-3-2563

Abstract

Title : A study of flow rate and energy dissipater of flow through gabion weir

By : Thatpong Suttiwara

Pongsathorn Seangvirunthorn

Sakarin Khajaroen

Project Adviser :



.....
(Assoc Prof. Somchai Donjadee)

...../...../.....

The objective of this research is to investigate the flow rate and energy loss of the water flow through the gabion weir. The experiments were conducted in a 38 m long rectangular concrete flume with 1.2 m wide, and 1.2 m deep. The mesh boxes with 20 cm wide, 20 cm high and 120 cm long, the rough surface stone with the width 5.506 cm, length 7.765 cm and thickness 3.751 cm, which had the shape factor of 6.51 cm, were used to make gabion weir. The weir boxes with the widths of 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0 m and the heights of 12, 15, 20 and 21 cm were tested in this study. It was found that the flow rate decreased when the height or thickness of the weir increased. In addition, decreasing the relative energy loss was presented with higher Froude number.

Keywords: Gabion boxes; Weir; Discharge; Energy loss; Froude Number

Department Reference No E4008-SCD-3-2020

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.สมชาย ดอนเจดีย์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และได้อนุเคราะห์สนับสนุนทุนในการทำวิจัยโครงการวิศวกรรมชลประทานในครั้งนี้นั้นสำเร็จผล

ขอขอบคุณภาควิชาชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ ตลอดจนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำงาน ซึ่งทำให้โครงการวิจัยในครั้งนี้นั้นสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ทัตพงศ์ สุทธิวรา

พงศธร แสงวิรุณทร

ศักรินทร์ คำเจริญ

ผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

สารบัญ.....	VII
สารบัญภาพ.....	IX
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญภาพผนวก.....	XI
สารบัญตารางผนวก.....	XII
1 บทนำ.....	1
1.1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.1.1. วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.2. ขอบเขตของโครงการ.....	2
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1. ทฤษฎี.....	3
2.1.1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1.2. การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายทดน้ำ และทางระบายน้ำล้น (ไม่มีการควบคุม).....	3
2.1.3. ฝายเกเบียน.....	4
2.1.4. การวิเคราะห์หิมิตี และความคล้ายคลึงทางชลศาสตร์.....	5
2.1.5. อัตราส่วนของช่องว่าง (Void Ratio, e).....	9
3 เครื่องมือที่ใช้ในการทำโครงการ.....	10
3.1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	20
3.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	20
4 วิธีการดำเนินโครงการ.....	12
4.1. การเตรียมกล่องตาข่าย.....	22
4.2. การทดสอบหาอัตราส่วนช่องว่างของหิน.....	22
4.3. การทดลองหาอัตราการไหลผ่านฝายกล่องตาข่าย.....	22
5 ผลการดำเนินโครงการและวิจารณ์.....	15
6 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ.....	18
7 บรรณานุกรม.....	19
8 ภาคผนวก.....	20
8.1. ภาคผนวก ก.....	20
8.2. ภาคผนวก ข.....	23
8.3. ภาคผนวกตาราง.....	26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ประวัตินิสัย.....	39
-------------------	----

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1 ฝ่ายเกเบียน.....	5
รูปที่ 2 แผนภูมิความเชื่อมโยงระหว่างแบบจำลองกับต้นแบบ.....	5
รูปที่ 3 สัดส่วนมวลดิน 3 ส่วน.....	9
รูปที่ 4 รางทดลอง.....	10
รูปที่ 5 เครื่องสูบน้ำ.....	10
รูปที่ 6 มิเตอร์วัดอัตราการไหล.....	11
รูปที่ 7 กล้องตาข่ายเกเบียน.....	11
รูปที่ 8 เครื่องวัดระดับน้ำ.....	11
รูปที่ 9 การทดสอบหาอัตราส่วนช่องว่าง.....	12
รูปที่ 10 กล้องตาข่ายที่ติดตั้งในรางทดลอง.....	13
รูปที่ 11 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ.....	14
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลผ่านฝายกับความลึกของน้ำด้านหน้าฝาย.....	15
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียพลังงานสัมพันธ์กับค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหลทางด้านหน้าของกล้องตาข่าย.....	17

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ตัวอย่างมิติ และหน่วยของตัวแปรต่างๆ.....	7
ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบอัตราการไหล เมื่อความหนาผ่ายเปลี่ยนไป.....	16

สารบัญภาพผนวก

หน้า

รูปผนวกที่ ก1 หินที่ใช้ในการทดลอง.....	20
รูปผนวกที่ ก2 เครื่องสูบน้ำ.....	20
รูปผนวกที่ ก3 มิเตอร์วัดอัตราการไหล.....	20
รูปผนวกที่ ก4 เครื่องวัดระดับน้ำ.....	20
รูปผนวกที่ ก5 วัดขนาดกล่องตาข่าย.....	21
รูปผนวกที่ ก6 ตัดเหล็กตามความยาวที่วัด.....	21
รูปผนวกที่ ก7 เชื่อมเหล็กให้เป็นกล่อง.....	21
รูปผนวกที่ ก8 ห่อหุ้มตาข่ายรอบกล่อง.....	21
รูปผนวกที่ ก9 เจาะรูอ่างทดลองอัตราส่วนช่องว่าง.....	22
รูปผนวกที่ ก10 ชั่งน้ำหนักน้ำเพื่อหาอัตราส่วนช่องว่าง.....	22
รูปผนวกที่ ก11 เปลี่ยนความสูงหินที่ทดลอง.....	22
รูปผนวกที่ ก12 เปลี่ยนความหนากล่องตาข่าย.....	22
รูปผนวกที่ ข1 ทดลองอัตราการไหลผ่านฝายกล่องตาข่ายหนา 0.2 m ที่ความสูงของหิน 20 cm.....	23
รูปผนวกที่ ข2 ทดลองอัตราการไหลผ่านฝายกล่องตาข่ายหนา 0.4 m ที่ความสูงของหิน 20 cm.....	23
รูปผนวกที่ ข3 ทดลองอัตราการไหลผ่านฝายกล่องตาข่ายหนา 0.6 m ที่ความสูงของหิน 21 cm.....	24
รูปผนวกที่ ข4 ทดลองอัตราการไหลผ่านฝายกล่องตาข่ายหนา 0.8 m ที่ความสูงของหิน 21 cm.....	24
รูปผนวกที่ ข5 ทดลองอัตราการไหลผ่านฝายกล่องตาข่ายหนา 1.0 m ที่ความสูงของหิน 21 cm.....	25

สารบัญตารางผนวก

หน้า

ตารางผนวกที่ 1	เปรียบเทียบการสูญเสียพลังงานสัมพัทธ์ เมื่อความหนาฝายเปลี่ยนไป.....	26
ตารางผนวกที่ 2	ปริมาตรโครงกล่อรวมหิน ปริมาตรช่องว่างและอัตราส่วนช่องว่าง.....	26
ตารางผนวกที่ 3	ค่า Shape length ของชุดที่ 1 – 6 โดยสุ่มหินมาชุดละ 10 ก้อน.....	27
ตารางผนวกที่ 4	ค่า Shape length ของชุดที่ 7 – 12 โดยสุ่มหินมาชุดละ 10 ก้อน.....	28
ตารางผนวกที่ 5	ค่า Shape factor ค่าเฉลี่ยของ Shape length และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	29
ตารางผนวกที่ 6	ค่าอัตราการไหลเฉลี่ย และระดับน้ำเฉลี่ย ณ จุดวัดต่างๆ ที่ความหนาฝาย 0.2 m.....	29
ตารางผนวกที่ 7	ค่าอัตราการไหลเฉลี่ย และระดับน้ำเฉลี่ย ณ จุดวัดต่างๆ ที่ความหนาฝาย 0.4 m.....	30
ตารางผนวกที่ 8	ค่าอัตราการไหลเฉลี่ย และระดับน้ำเฉลี่ย ณ จุดวัดต่างๆ ที่ความหนาฝาย 0.6 m.....	31
ตารางผนวกที่ 9	ค่าอัตราการไหลเฉลี่ย และระดับน้ำเฉลี่ย ณ จุดวัดต่างๆ ที่ความหนาฝาย 0.8 m.....	32
ตารางผนวกที่ 10	ค่าอัตราการไหลเฉลี่ย และระดับน้ำเฉลี่ย ณ จุดวัดต่างๆ ที่ความหนาฝาย 1.0 m.....	33
ตารางผนวกที่ 11	ค่าการสูญเสียพลังงานสัมพัทธ์ (E_L/E_1) กับค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหลทางด้าน หน้าของกล่อตาข่าย (Fr_1) ที่ความหนาถ่อ 0.2 m.....	34
ตารางผนวกที่ 12	ค่าการสูญเสียพลังงานสัมพัทธ์ (E_L/E_1) กับค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหลทางด้าน หน้าของกล่อตาข่าย (Fr_1) ที่ความหนาถ่อ 0.4 m.....	35
ตารางผนวกที่ 13	ค่าการสูญเสียพลังงานสัมพัทธ์ (E_L/E_1) กับค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหลทางด้าน หน้าของกล่อตาข่าย (Fr_1) ที่ความหนาถ่อ 0.6 m.....	36
ตารางผนวกที่ 14	ค่าการสูญเสียพลังงานสัมพัทธ์ (E_L/E_1) กับค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหลทางด้าน หน้าของกล่อตาข่าย (Fr_1) ที่ความหนาถ่อ 0.8 m.....	37
ตารางผนวกที่ 15	ค่าการสูญเสียพลังงานสัมพัทธ์ (E_L/E_1) กับค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหลทางด้าน หน้าของกล่อตาข่าย (Fr_1) ที่ความหนาถ่อ 1.0 m.....	38

1 บทนำ

1.1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์และยังเป็นแหล่งกำเนิดของพืชและสัตว์น้ำ น้ำทำให้เกิดความอุดมสมบูรณ์แก่สิ่งมีชีวิตต่างๆ เราใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค เกษตรกรรม และอุตสาหกรรม (จันทวัน, 2563) ดังนั้นการบริหารจัดการน้ำจึงมีความสำคัญมากโดยต้องมีการบริหารจัดการน้ำทั้งระบบ ตั้งแต่ต้นน้ำไปจนถึงปลายน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของต้นน้ำ เนื่องจากเป็นต้นกำเนิดของลำธาร (กรีธาทัพ, 2560) และเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตมากมาย อีกทั้งยังมีส่วนช่วยในการชะลอการไหลของน้ำ เพื่อลดการพังทลายของหน้าดินในช่วงฤดูน้ำหลาก

ปัจจุบันในหลายพื้นที่ของประเทศไทยต้องประสบปัญหาผลกระทบจากน้ำที่สำคัญ 3 ประการ ซึ่งสร้างความเสียหายแก่ประชาชน รวมทั้งสิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่อาศัยอยู่ในพื้นที่เป็นอย่างมาก ประการแรกคือปัญหาอุทกภัย สาเหตุเนื่องจากสภาพพื้นที่ป่าต้นน้ำถูกบุกรุกเป็นจำนวนมาก เมื่อฝนตกหนักน้ำจะไหลบ่าลงสู่ลำธารอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดเป็นน้ำป่าไหลหลาก รวมทั้งเกิดการชะล้างดินจากพื้นที่ตอนบน จนเกิดการทับถมของตะกอนในพื้นที่ตอนล่างและเกิดเป็นอุทกภัยในที่สุด (ชลาทพร และคณะ, 2558) ประการที่สองคือปัญหาการขาดแคลนน้ำ เกิดจากฝนตกน้อยหรือฝนตกไม่ถูกต้องตามฤดูกาล เกิดฝนทิ้งช่วง ทำให้ปริมาณน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินมีปริมาณลดลง จึงไม่เพียงพอต่อการอุปโภค บริโภค และเกษตรกรรมจนเกิดเป็นปัญหาภัยแล้ง และปัญหาประการที่สาม คือการเกิดน้ำเสียและคุณภาพน้ำไม่เหมาะสม ซึ่งปัญหานี้ส่งผลให้เกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำดังกล่าวแล้วข้างต้น (ปราโมทย์, 2554)

จากปัญหาดังกล่าวการสร้างฝายชะลอน้ำ จะช่วยบรรเทาปัญหาและลดผลกระทบที่เกิดขึ้น ในการก่อสร้างฝายชะลอน้ำนั้น โดยปกติแล้วจะใช้วัสดุที่มีและหาง่ายในแหล่งพื้นที่ แต่มักประสบปัญหาเรื่องความคงทน ถ้าก่อสร้างด้วยคอนกรีตซึ่งมีความคงทนสูง ก็จะมีประสบปัญหาด้านค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง (สัณหพจน์, 2548) การสร้างฝายเกเบียน จึงเป็นทางเลือกที่ดีทางเลือกหนึ่งในการสร้างฝายเนื่องจากก่อสร้างง่ายและรวดเร็ว โดยการนำกล่องลวดตาข่าย ภายในบรรจุด้วยหินมาวางเรียงซ้อนกันตามรูปแบบที่ต้องการทดน้ำ อีกทั้งยังใช้วัสดุในพื้นที่มาประกอบการสร้างฝายได้ด้วย

การสร้างฝายเกเบียน ยังขาดการศึกษาเกี่ยวกับชนิดและขนาดหินของหินที่ใช้บรรจุในกล่องตาข่าย ดังนั้นการศึกษาหาอัตราการใช้ของน้ำผ่านกล่องตาข่าย จึงเป็นสิ่งจำเป็นและมีความสำคัญมาก เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิจัยและออกแบบฝายกล่องตาข่ายต่อไป

1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

วัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัยนี้คือเพื่อหาอัตราการไหลและการสูญเสียพลังงานของการไหลผ่านฝายกล่องตาข่าย เมื่อความหนาของฝายและความสูงของหินเปลี่ยนไป

1.3. ขอบเขตของโครงการ

1.2.1. การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้ฝายกล่องตาข่ายที่มีความหนาต่างกันห้าขนาด และความสูงหินต่างกันสี่ระดับ

1.2.2. ศึกษาอัตราการไหลและการสลายพลังงานผ่านฝายกล่องตาข่ายทั้งห้าขนาด และความสูงหินต่างกันสี่ระดับ

1.2.3. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรในเทอมไร้มิติที่มีอิทธิพลต่อการไหลของน้ำผ่านฝายกล่องตาข่าย

2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กรีธาทัพ (2560) ได้ศึกษาลักษณะการไหลทางชลศาสตร์ที่มีผลกระทบต่อ การเคลื่อนที่ของ ตะกอนผ่านฝายเกเบียน โดยใช้แบบจำลองฝายเกเบียนแบบ vertical weir, stepped weir, battered weir และฝายต้นน้ำลำธารแบบมาตรฐาน 2 ขนาด คือ 0.15 m และ 0.25 m พบว่า ฝายที่มีประสิทธิภาพในการ ดักตะกอนสูงสุดคือฝายต้นน้ำลำธารแบบมาตรฐาน ขนาด 0.25 m มีค่า 90.38 - 96.01 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ ฝายเกเบียนที่มีประสิทธิภาพการดักตะกอนสูงสุด คือ ฝายเกเบียน แบบ vertical ขนาด 0.25 m มีค่า 80.68 - 94.46 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ประสิทธิภาพการดักตะกอนของฝายแต่ละลักษณะมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความทึบน้ำของฝาย โดยประสิทธิภาพการดักตะกอนจะลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ชัยยุทธ และคณะ (2547) ได้ศึกษาความดันบนพื้นรางและความลึกของการไหลบนรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย ซึ่งพบว่ารางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายช่วยลดแรงดันของน้ำบนชั้นบันไดได้ 27 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับรางชั้นบันไดแบบพื้นราบ ความลึกในรางแบบกล่องตาข่ายมีแนวโน้มน้อยกว่าเนื่องจากกล่องตาข่าย ยอมให้มีการไหลผ่านช่องหินได้บางส่วน สัตหพจน์ (2548) ได้ศึกษาแบบจำลองทางชลศาสตร์ของอ่าง สลายพลังงานด้วยกล่องตาข่ายแบบเกเบียน โดยได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายพลังงาน ความเร็ว ด้านท้ายน้ำ ความยาวและความสูงของไฮโดรลิกจัม พบว่า ประสิทธิภาพการสลายพลังงานเพิ่มขึ้น เมื่อพ รุذنัมเบอร์มีค่าสูงขึ้น และเมื่ออัตราส่วนความสูงของเกเบียนต่อความสูงของขอบท้ายอ่างเพิ่มขึ้นจะช่วยให้ การสลายพลังงานดีขึ้น สำหรับตำแหน่งเกเบียนที่วางที่ระยะ $1/3$ ของความยาวอ่าง ความสามารถสลาย พลังงานมีประสิทธิภาพมากกว่าการวางเกเบียนที่ระยะ $2/3$ ของความยาวอ่าง ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ และ เกเบียน 2 กล่อง สามารถช่วยสลายพลังงานได้ดีกว่าเกเบียน 1 กล่องประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของ Hasson (2553) ทำการศึกษาการไหลของน้ำข้ามฝายเกเบียน โดยนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับฝาย สันกว้าง พบว่า ลักษณะของการไหลผ่านฝายเกเบียนนั้นมีความแตกต่างจากฝายสันกว้าง เมื่อแบ่งการไหล ออกเป็น 2 ส่วนคือ การไหลเหนือฝายและการไหลผ่านฝาย เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลผ่านฝายเท่ากัน เสดเหนือฝายเกเบียนมีค่าน้อยกว่าฝายสันกว้าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำฝายเกเบียน และ Hasson ยัง แนะนำว่าเมื่อใช้สมการของฝายสันกว้างในการคำนวณอัตราการไหลของฝายเกเบียน อาจทำให้เกิดความ ผิดพลาดในการคำนวณได้

2.1.2. การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายทดน้ำ และทางระบายน้ำล้น (ไม่มีการควบคุม)

ฝายทดน้ำ ฝายน้ำล้น ฝายระบายน้ำหรือทางระบายน้ำล้น ในที่นี้ต่อไปจะเรียกว่าฝาย ฝาย เป็นอาคารที่สร้างขึ้นเพื่อยกระดับน้ำให้สูงขึ้น จนสามารถส่งเข้าคลองส่งน้ำที่ด้านหน้าฝายได้ เพื่อให้กับ

พื้นที่เพาะปลูกที่ด้านท้ายน้ำ การคำนวณปริมาณน้ำผ่านฝายที่ไม่มีการควบคุม มีหลักการเหมือนๆ กัน จึงสรุปหลักการดังนี้

1) การออกแบบฝายที่สร้างในทางน้ำมักออกแบบให้การไหลเป็นแบบ Free flow และจะหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการไหลแบบ Submerged flow หรือน้ำด้านท้ายสูงกว่าระดับสันฝายไม่ได้ จะมีวิธีคำนวณโดยเฉพาะ

2) การคำนวณปริมาณการไหลผ่านฝายทุกประเภทใช้สมการพื้นฐานเหมือนกัน คือ

$$Q = CLH^{3/2}$$

3) การคำนวณความยาวสันฝาย (L) เป็นความยาวที่น้ำไหลผ่านได้จริง (Effective length) ถ้ามีตอม่อและกำแพงข้างตัวฝายจะไม่คิดความหนาของตอม่อ และต้องหักค่าการบีบตัวของน้ำด้วย

4) การคำนวณความลึกที่ไหลผ่านฝาย (H) คือ ความลึกของน้ำเทียบกับสันฝาย จะวัดระดับน้ำด้านหน้าฝายห่างจากสันฝาย มากกว่า 3 เท่าของความลึกสูงสุดที่น้ำไหลข้ามฝาย

5) ประเภทฝายต่างกันที่หน้าตัด และรูปร่างแนวสันฝายที่ต่างกัน

6) ทางทฤษฎีฝายที่มีลักษณะเหมือนกันจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การไหล (C) เดียวกัน แต่ในทางปฏิบัติต้องทำการทดสอบเทียบ (Calibrate) เท่านั้น เพราะว่าเป็นค่าเฉพาะตัว

7) ค่าสัมประสิทธิ์การไหลผ่านฝาย (C) จะสัมพันธ์การหน้าตัดฝาย โดยทั่วไปจะถือว่าเหมือนแนวตรง

2.1.3. ฝายเกเบียน

Gabion มาจากภาษาอิตาลีเลียน คือ Gabbione หมายถึง กล่องลวดตาข่ายขนาดใหญ่ที่บรรจุหินไว้ภายใน โดยมีการใช้ตะกร้าบรรจุหินเพื่อป้องกันการกัดเซาะแม่น้ำไนล์โดยชาวอียิปต์ตั้งแต่ 2,000 กว่าปีมาแล้ว ส่วนการใช้งานในยุคใหม่ ได้ประยุกต์นำ Gabion มาก่อสร้างใช้เป็นกำแพงกันดิน ใช้ป้องกันตลิ่ง ป้องกันการกัดเซาะในทางน้ำ ก่อสร้างทำนบ ฝายทดน้ำ และอื่นๆ

กรมชลประทาน (2553) ได้ให้ความหมายของ Gabion ว่า Gabion คือ กล่องทำด้วยลวดถักบรรจุด้วยหินและกรวดขนาดใหญ่ใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น วางบนพื้นหรือตลิ่งเพื่อป้องกันการกัดเซาะ วางในลำน้ำหรือริมทะเลเพื่อป้องกันคลื่น วางซ้อนกันหลายๆ ชั้นเพื่อทำเป็นฝายหรือกำแพงกันดินบริเวณลาดไหล่เขา เป็นต้น หรือเรียกอีกอย่างว่า stone mesh หรือถ้ากล่องหนาน้อยกว่า 30 เซนติเมตรจะเรียกว่า mattress

ฝายเกเบียน (Gabion weir) เป็นการนำ Gabion มาวางเรียงซ้อนกันตามรูปแบบที่ต้องการดังรูปที่ 1 เพื่อทดน้ำให้มีระดับสูงขึ้น เหมาะกับพื้นที่ซึ่งการขนส่งวัสดุเพื่อการก่อสร้างฝายประเภท

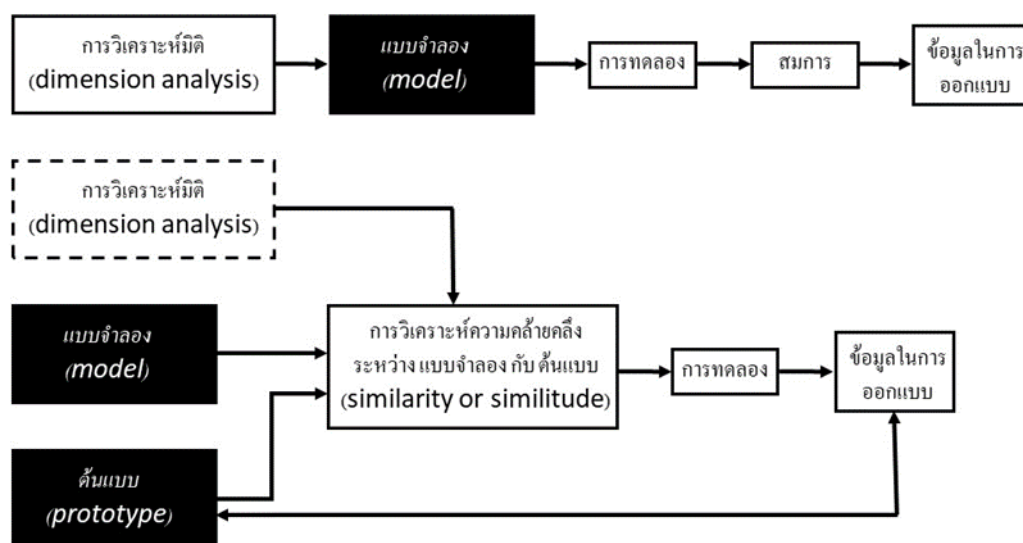
อื่นๆ ทำได้ไม่สะดวก ต้องเสียค่าขนส่งสูงมาก และพื้นที่นั้นมีหินเพียงพอที่จะนำมาใช้ประโยชน์มีสภาพของ
ฐานรากค่อนข้างมั่นคงแข็งแรง อีกทั้งการสร้างฝายเกเบียนนั้นง่ายและรวดเร็วกว่าการสร้างฝายประเภท
อื่นๆ มาก



รูปที่ 1 ฝายเกเบียน

2.1.4. การวิเคราะห์มิติ และความคล้ายคลึงทางชลศาสตร์

หลักการทางฟิสิกส์และคณิตศาสตร์อธิบายการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการไหลของของ
ไหลได้ยาก จึงมีการจำลองสถานการณ์เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการแก้ปัญหา จะวิเคราะห์ตัวแปรในเชิงมิติ การ
จำลองสถานการณ์กับความเป็นจริงเป็นความสัมพันธ์ของตัวแปรในสองลักษณะคือ การวิเคราะห์มิติ
(Dimension analysis) และการวิเคราะห์ความคล้ายคลึง (Similarity or Similitude) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภูมิความเชื่อมโยงระหว่างแบบจำลองกับต้นแบบ

ที่มา: ธีฎดร ออกระลา (2553)

การวิเคราะห์มิติ (Dimension analysis) เป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ ใช้ศึกษาเกี่ยวกับมิติและหน่วยของตัวแปรต่างๆ เนื่องจากบางปัญหาอธิบายได้ยากการวิเคราะห์มิติสามารถหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในรูปแบบไร้มิติ เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทำการทดลองมาวิเคราะห์ จะสรุปมาเป็นสมการทั่วไปได้และสามารถจำลองตัวต้นแบบทางชลศาสตร์ ได้อีกด้วย

1) มิติ (Dimension) มิติ หมายถึง คุณสมบัติทางกายภาพของสสาร เช่น ความยาว น้ำหนัก มวล แรง ฯลฯ เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1.1) มิติปฐมภูมิ หรือ มิติพื้นฐาน (Primary Dimensions or Basic Dimensions) หมายถึง มิติของตัวแปรพื้นฐานที่ไม่สามารถแยกเป็นมิติอื่นได้อีก ใช้มิติพื้นฐาน 4 ตัว ดังนี้

มวล (Mass)	สัญลักษณ์ที่ใช้ คือ M
ความยาว (Length)	สัญลักษณ์ที่ใช้ คือ L
เวลา (Time)	สัญลักษณ์ที่ใช้ คือ T
อุณหภูมิ (Temperature)	สัญลักษณ์ที่ใช้ คือ θ

1.2) มิติทุติยภูมิ (Secondary Dimensions) เป็นมิติที่เกิดจากการรวมกันของมิติปฐมภูมิ เช่น ปริมาตร เกิดจากความกว้าง (L) x ความยาว (L) x ความสูง (L) จึงมีมิติเป็น L^3 เป็นต้น

2) หน่วย หมายถึง ลักษณะนามของมิติ มีการกำหนดระบบใช้อย่างสากล และนิยมใช้มากที่สุดมี 2 ระบบ คือ

2.1) System International Unit หรือที่เรียกว่า “ระบบ SI” ตัวย่อ SI ซึ่งสำหรับมิติพื้นฐาน มีหน่วยดังนี้

มวล (Mass)	หน่วย คือ กิโลกรัม (kg)
ความยาว (Length)	หน่วย คือ เมตร (m)
เวลา (Time)	หน่วย คือ วินาที (s)
อุณหภูมิ (Temperature)	หน่วย คือ เคลวิน (K)

2.2) British Gravitational System หรือที่เรียกว่า “ระบบอังกฤษ” ตัวย่อ BG ซึ่งสำหรับมิติพื้นฐาน จะมีหน่วยดังนี้

มวล (Mass)	หน่วย คือ สลัก (Slug)
ความยาว (Length)	หน่วย คือ ฟุต (ft)
เวลา (Time)	หน่วย คือ วินาที (sec)
อุณหภูมิ (Temperature)	หน่วย คือ แรนไคน์ (R)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างมิติ และหน่วยของตัวแปรต่างๆ

Quantity	Symbol	Dimension	
		M-L-T	F-L-T
Fundamental Quantities			
Mass	M	M	$FL^{-1}T^{-2}$
Length	L	L	L
Time	T	T	T
Force	F	MLT^{-2}	F
Geometric Quantities			
Area	A	L^2	L^2
Volume	V	L^3	L^3
Kinematic Quantities			
Velocity	v	LT^{-1}	LT^{-1}
Acceleration	a	LT^{-2}	LT^{-2}
Discharge	Q	L^3T^{-1}	L^3T^{-1}
Kinematic Quantities			
Gravity	g	LT^{-2}	LT^{-2}
Kinematic viscosity	ν	L^2T^{-1}	L^2T^{-1}
Dynamic Quantities			
Density	ρ	ML^{-3}	$FL^{-3}T^2$
Specific weight	γ	$ML^{-2}T^{-2}$	FL^{-3}
Dynamic viscosity	μ	$ML^{-1}T^{-1}$	$FL^{-2}T$
Pressure intensity	p	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
Surface tension	σ	MT^{-2}	FL^{-1}
Modulus of elasticity	E	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
Power	P	ML^2T^{-3}	FLT^{-1}
Work, Energy	W	ML^2T^{-2}	FL

ที่มา: การุณ (2538)

3) การวิเคราะห์มิติโดยวิธี บักกิงแฮมพาย (Dimension analysis by Buckingham Pi Theory) เป็นทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์พจน์ของตัวแปรไร้มิติ โดยใช้สัญลักษณ์ π (Pi) แทนพจน์ของตัวแปรไร้มิติ โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังนี้

3.1) รวบรวมตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปัญหาทั้งหมด จำแนกตัวแปรออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

กลุ่มตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับขนาด และรูปร่าง เช่น ความยาว (l) เส้นผ่าศูนย์กลาง(D) ความกว้าง (B) ความสูง (h) พื้นที่หน้าตัด (A) ปริมาตร (V) เป็นต้น

กลุ่มตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของของไหล เช่น ความหนาแน่น (ρ) ความหนืด (μ) ตัวแปรที่รวมกันจะต้องไม่มากจากตัวแปรอื่น เช่น น้ำหนักจำเพาะ (γ) เกิดจากผลคูณระหว่างความหนาแน่น (ρ) กับ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (g) เป็นต้น

กลุ่มตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลภายนอกที่เกี่ยวข้องกับการไหล เช่น ความดัน (P) ความเร่ง เนื่องจากแรงโน้มถ่วง (g) ความเร็ว (V) แรงกระทำ (F) เป็นต้น

3.2) วิเคราะห์มิติของตัวแปรโดยใช้ระบบ FLT θ หรือ MLT θ

ตัวอย่างเช่น ปัญหาประกอบด้วยตัวแปรดังต่อไปนี้ โดยใช้ระบบ MLT θ

เส้นผ่าศูนย์กลาง (D) มิติ คือ L^1

ความเร็ว (V) มิติ คือ $L^1 T^{-1}$

ความดัน (P) มิติ คือ $M^1 L^{-1} T^{-2}$

ตัวแปรทั้งหมดประกอบขึ้นจากมิติอ้างอิงคือ M L และ T ซึ่งเท่ากับ 3 ตัว ($r = 3$)

3.3) เลือกตัวแปรซ้ำ (Repeating variable) ให้เท่ากับจำนวนมิติอ้างอิง ถ้านำมิติทั้งหมดมารวมกันต้องมีองค์ประกอบของมิติอ้างอิงครบทุกตัว

3.4) สร้างพจน์ของตัวแปรไร้มิติ หรือ พายเทอม (π -term) โดยการผสมตัวแปรซ้ำทุกตัวกับตัวแปรที่เหลืออยู่ และจะต้องทำให้มิติของ π - term เท่ากับ 1 คือไม่มีมิติ

3.5) เราสามารถปรับรูปแบบตัวแปรให้เหมาะกับการทดลอง การเก็บข้อมูล หรือรูปแบบพจน์ที่เราคุ้นเคย

3.6) หาความสัมพันธ์ระหว่างพจน์ตัวแปรไร้มิติ ซึ่งความสัมพันธ์จะได้จากการเก็บข้อมูลจากการทดลอง $\phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n) = 0$

การวิเคราะห์ความคล้ายคลึง (Similarity analysis) การที่จะบอกได้ว่าแบบจำลองมีความคล้ายกับต้นแบบ ต้องประกอบด้วยความคล้ายคลึงทั้ง 3 ประการ ดังนี้

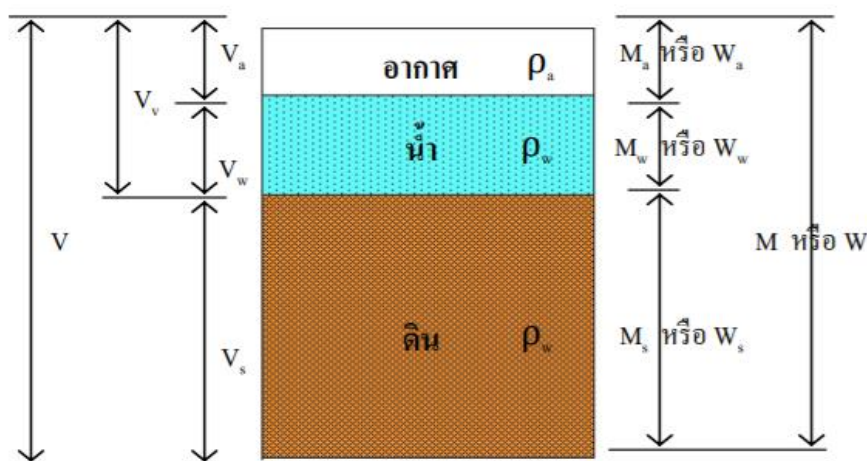
1) ความคล้ายคลึงทางเรขาคณิต (Geometric Similarity) แบบจำลองจะต้องมีสัดส่วนเท่ากันหรือมีรูปร่างเหมือนกับต้นแบบ กล่าวคือ อัตราส่วนมิติความยาว ระหว่างแบบจำลองกับต้นแบบ จะต้องคงที่

2) ความคล้ายคลึงทางจลศาสตร์ (Kinematic Similarity) ต้นแบบและแบบจำลองจะต้องมีลักษณะการเคลื่อนที่ที่เหมือนกัน กล่าวคือ อัตราส่วนระหว่างความเร็ว ความเร่ง หรืออัตราไหล จะต้องสอดคล้องกัน

3) ความคล้ายคลึงทางพลศาสตร์ (Dynamic Similarity) โดยแบบจำลอง และต้นแบบจะมีความคล้ายคลึงกันได้นั้น อัตราส่วนของแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะเท่ากันเสมอ

2.1.5. อัตราส่วนของช่องว่าง (Void Ratio, e)

คือ อัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่าง (V_v) ต่อปริมาตรเม็ดดิน (V_s) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 สัดส่วนมวลดิน 3 ส่วน

ที่มา: มานิต ช่างงาน (2554)

3 เครื่องมือที่ใช้ในการทำโครงการ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการในรางทดลองบริเวณแปลงทดลองของภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน

3.1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1. หินผิวยูเรทที่มีขนาดความกว้าง 5.506 cm ความยาว 7.765 cm ความหนา 3.751 cm ซึ่งมี shape factor คือ 6.511 cm มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ 0.442

3.1.2. น้ำสะอาด

3.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1. รางทดลองมีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด กว้าง 1.2 m สูง 1.2 m และความยาวรางทดลอง 38 m ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 รางทดลอง

3.2.2. เครื่องสูบน้ำ



รูปที่ 5 เครื่องสูบน้ำ

3.2.3. มิเตอร์วัดอัตราการไหล



รูปที่ 6 มิเตอร์วัดอัตราการไหล

3.2.4. ก่อสร้างข่ายเกเบียน ที่มีขนาดความกว้าง 0.2 m ความยาว 1.20 m ความหนา 0.2 m



รูปที่ 7 ก่อสร้างข่ายเกเบียน

3.2.5. เครื่องวัดระดับน้ำ (hook gage water)



รูปที่ 8 เครื่องวัดระดับน้ำ

4 วิธีการดำเนินโครงการ

4.1. การเตรียมกล่องตาข่าย

ในการทดลองครั้งนี้เริ่มจากการดำเนินการจัดทำกล่องตาข่าย ความสูง 0.2 m ความหนา 0.2 m และความยาว 1.2 m โดยใช้เหล็กในการทำกล่องตาข่าย และจากนั้นใช้ลวดตาข่ายห่อหุ้มกล่องเอาไว้เพื่อใช้บรรจุหิน

4.2. การทดสอบหาอัตราส่วนความช่องว่างของหิน

กล่องตาข่ายที่บรรจุหิน ถูกนำมาทำการทดลองหาอัตราส่วนความพรุนของหินที่อยู่ในกล่องตาข่าย ดังรูปที่ 9 ก่อนนำไปทดลองหาอัตราการไหลผ่านกล่องตาข่าย พบว่ากล่องตาข่ายมีอัตราส่วนความพรุนเฉลี่ย คือ 0.512 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ 0.013



รูปที่ 9 การทดสอบหาอัตราส่วนช่องว่าง

4.3. การทดลองหาอัตราการไหลผ่านฝายกล่องตาข่าย

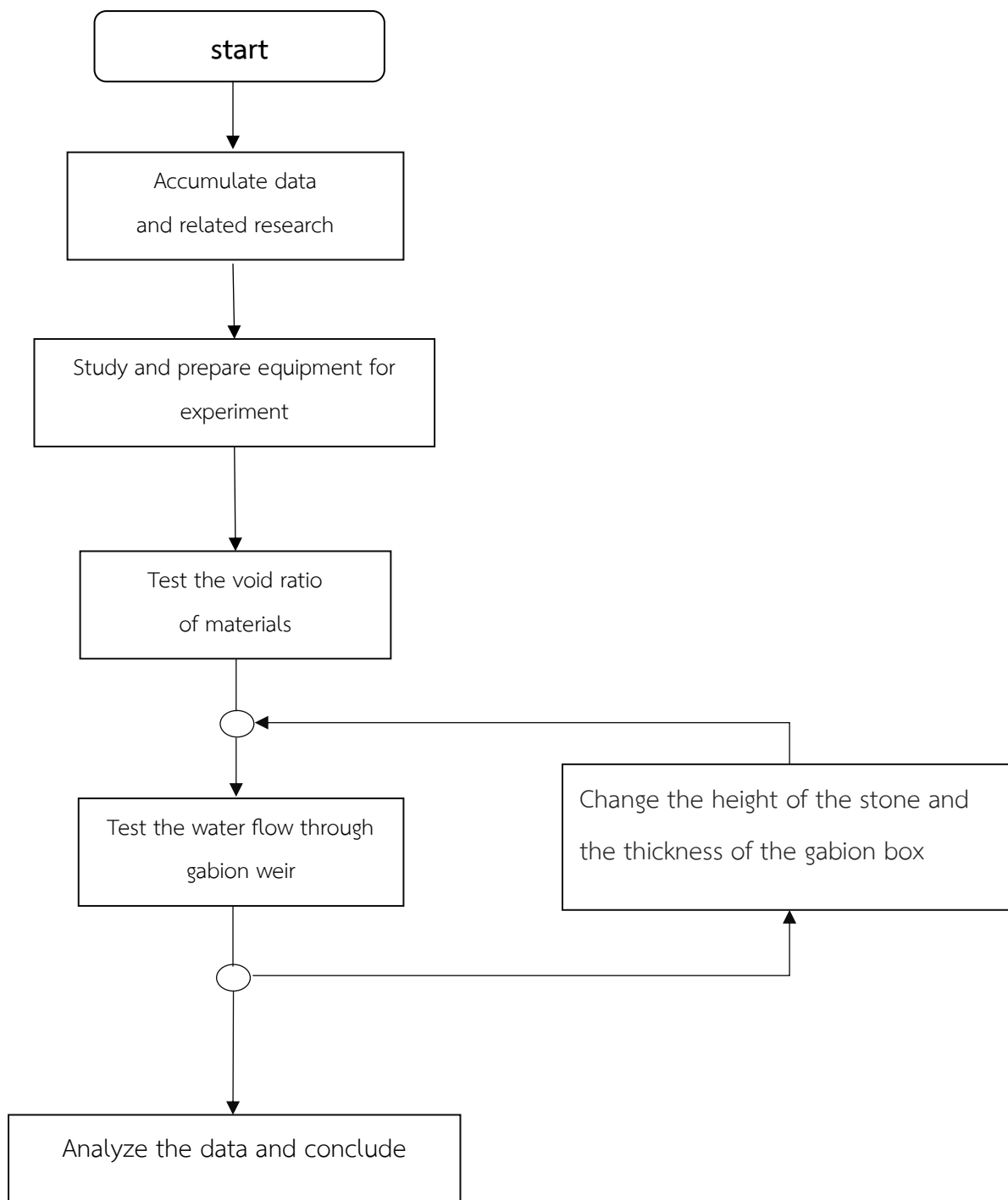
4.3.1. นำกล่องตาข่ายไปติดตั้งในรางทดลองดังรูปที่ 10 เริ่มโดยการสูบน้ำจากบ่อพักน้ำขนาดใหญ่เข้าสู่รางทดลองที่มีกล่องตาข่ายติดตั้งอยู่ โดยผ่านท่อซึ่งได้ติดตั้งมิเตอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ เมื่อการไหลเป็นแบบคงที่ (steady flow) จะดำเนินการวัดอัตราการไหลของน้ำจากมิเตอร์วัดน้ำ และความลึกของน้ำโดยแปรผันอัตราการไหลในแต่ละกรณีเท่ากับ 5 อัตราไหล



รูปที่ 10 ก่องตาข่ายที่ติดตั้งในรางทดลอง

4.3.2. วัดความลึกของน้ำที่ไหลผ่านก่องตาข่าย ทำการวัด 4 ตำแหน่ง คือ บริเวณด้านเหนือน้ำ ณ ตำแหน่งก่อนที่น้ำจะไหลผ่านก่อง บริเวณด้านหน้าก่อง บริเวณด้านหลังก่อง และบริเวณด้านท้ายน้ำ ณ ตำแหน่งที่น้ำไหลออกจากก่อง

4.3.3. ทดสอบหาอัตราการไหลของน้ำผ่านก่องตาข่าย โดยเริ่มต้นใช้ก่องตาข่ายในรางทดสอบที่มีความหนา 1.0 m ทำการทดสอบที่ความสูงของหินในก่องตาข่าย 4 ระดับคือ 12 , 15 , 20 และ 21 cm ตามลำดับ เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้วจึงเปลี่ยนความหนาของก่อง แล้วทำการทดสอบซ้ำจนเหลือก่องตาข่ายที่มีความหนา 0.2 m และความสูงของหินทั้ง 4 ระดับ



รูปที่ 11 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

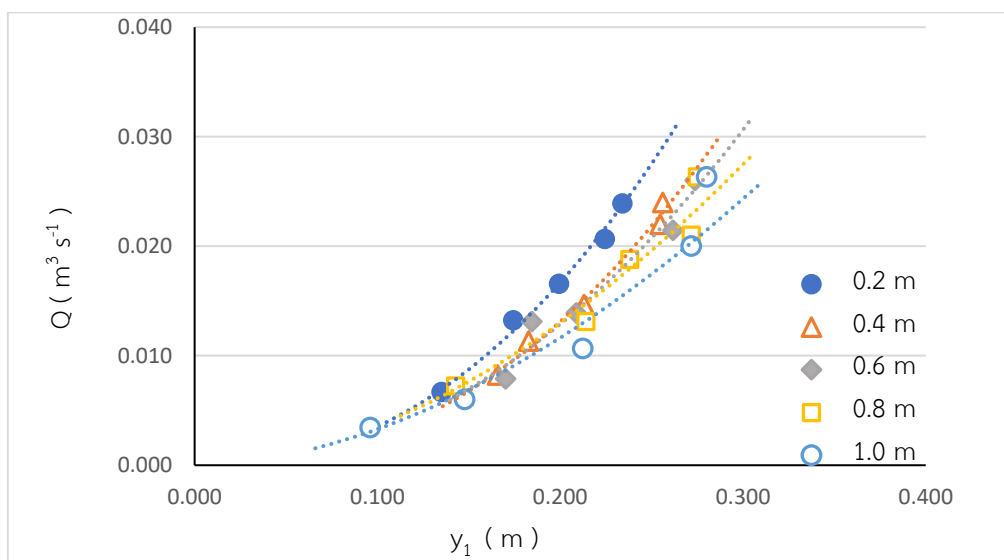
5 ผลการดำเนินงานโครงการและวิจารณ์

การหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการไหลของน้ำผ่านกล่องตาข่าย ได้ใช้วิธีวิเคราะห์มิติของ Buckingham- π สามารถสรุปตัวแปรไร้มิติที่สำคัญ ได้ดังนี้

$$\text{การสูญเสียพลังงานสัมพัทธ์} \quad \frac{E_L}{E_1} = f\left(\frac{v_1}{\sqrt{gy_1}}\right)$$

เมื่อ E_L คือ การสูญเสียพลังงานของการไหลผ่านฝายกล่องตาข่าย (m) เท่ากับ $E_1 - E_2$, E_1 คือ พลังงานด้านเหนือน้ำ (m), E_2 คือ พลังงานด้านท้ายน้ำ (m), V คือ ความเร็วของน้ำบริเวณเหนือน้ำ (m s^{-1}), g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m s^{-2}), y_1 คือ ความลึกของน้ำบริเวณเหนือน้ำ (m) จากการวิเคราะห์จะได้ความหมายของเทอมไร้มิติต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง คือ E_L/E_1 หมายถึงการสูญเสียพลังงานสัมพัทธ์ และ $Fr_1 = v_1/\sqrt{gy_1}$ หมายถึงค่า ฟรูดนัมเบอร์ (Froude Number) ของการไหลที่กำลังพิจารณา

การศึกษาค้นคว้าอัตราการไหลและการสลายพลังงานของการไหลผ่านฝายกล่องตาข่ายบรรจุหินที่มีขนาดความกว้าง 5.506 cm ความยาว 7.765 cm ความหนา 3.751 cm ซึ่งมี shape factor คือ 6.511 cm มีค่าส่วนเปียกเบนมาตรฐาน คือ 0.442 cm จะเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้คำนวณหาอัตราการไหลผ่านฝายกล่องตาข่าย จากการทดลองพบว่าอัตราการไหลผ่านฝายมีความสัมพันธ์กับความลึกของน้ำด้านหน้าฝาย โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 12



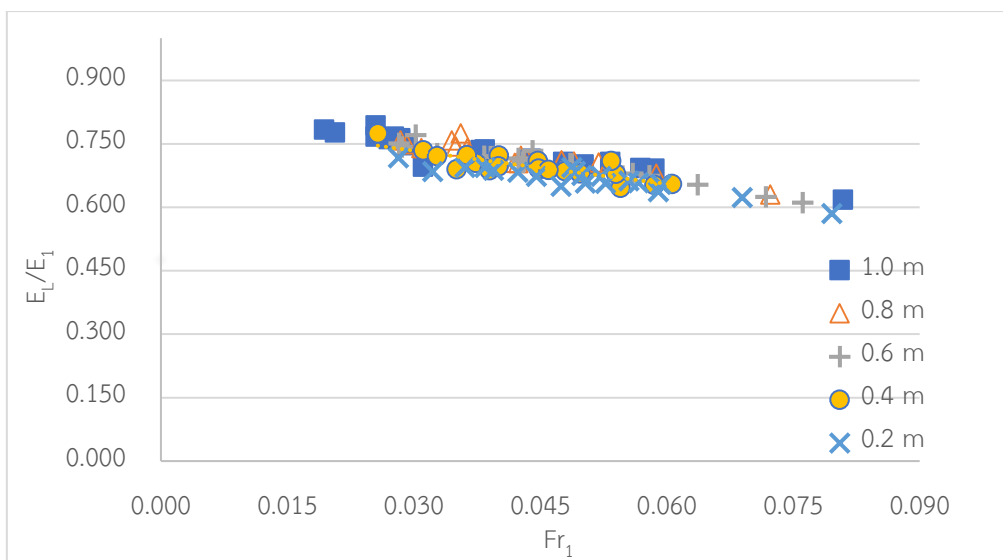
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลผ่านฝายกับความลึกของน้ำด้านหน้าฝาย

จากผลการทดลองใน รูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่า เมื่อความลึกของน้ำหน้ากล่องตาข่ายเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถหาอัตราการไหลได้จากสมการ $Q = a \times y_1^b$ เมื่อ Q คือ อัตราการไหล ($m^3 s^{-1}$) , y_1 คือ ความลึกของน้ำด้านหน้ากล่อง (m) , a และ b คือสัมประสิทธิ์ของสมการ ดังแสดงในตารางที่ 2 จากการทดลองพบว่า ณ ความลึกของน้ำหน้ากล่องตาข่ายเดียวกัน อัตราการไหลผ่านกล่องตาข่ายที่ความหนาน้อยกว่าจะมีค่าอัตราการไหลมากกว่า เช่น ณ ความลึกของน้ำหน้ากล่องตาข่าย 0.2 m อัตราการไหลผ่านกล่องตาข่ายที่ความหนา 0.2 m และ 1.0 m มีค่าเท่ากับ 0.016 และ 0.012 ($m^3 s^{-1}$) ตามลำดับ ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบอัตราการไหล เมื่อความหนาฝ่ายเปลี่ยนไป

Thicknesses (m)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
a	0.616	0.523	0.400	0.253	0.217
b	2.242	2.291	2.134	1.844	1.818
r^2	0.991	0.988	0.927	0.962	0.962

จากการทดลองยังพบว่า เมื่อความลึกของน้ำหน้ากล่องตาข่ายเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้น โดยพบว่า ณ ความลึกของน้ำหน้ากล่องตาข่ายเดียวกันอัตราการไหลผ่านกล่องตาข่ายที่ความสูงหินต่ำกว่า จะมีอัตราการไหลที่มากกว่า เช่น ณ ความลึกของน้ำหน้ากล่องตาข่าย 0.15 m อัตราการไหลผ่านกล่องตาข่ายที่ความสูงหิน 12 และ 21 cm จะมีค่าอัตราการไหลเท่ากับ 0.013 และ 0.009 ($m^3 s^{-1}$) ตามลำดับ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพการสลายพลังงานของกล่องตาข่ายโดยแสดงในรูปของตัวแปรไร้มิติ ระหว่างการสูญเสียพลังงานสัมพัทธ์ (E_L/E_1) กับค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหลทางด้านหน้าของกล่องตาข่าย (Fr_1) ดังผลการทดลองใน รูปที่ 13



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียพลังงานสัมพันธ์กับค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหลทางด้านหน้าของกล่องตาข่าย

จากผลการทดลองใน รูปที่ 13 แสดงให้เห็นว่า E_L/E_T แปรผกผันตามค่า Fr_1 คือ เมื่อ Fr_1 มีค่าเพิ่มขึ้น E_L/E_T จะมีค่าลดลง เช่น ณ ความหนากล่องตาข่าย 1.0 m ที่ค่า Fr_1 เท่ากับ 0.019 มี E_L/E_T เท่ากับ 0.784 เมื่อค่า Fr_1 เพิ่มขึ้นเป็น 0.021 E_L/E_T จะมีค่าเท่ากับ 0.777 และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง E_L/E_T กับ ความหนากล่องตาข่าย พบว่า ความหนากล่องตาข่าย 1.0 m มีค่า E_L/E_T มากที่สุด รองลงมาเป็นความหนากล่องตาข่ายที่ 0.8, 0.6, 0.4 และ 0.2 m ตามลำดับ เช่น ที่ค่า Fr_1 เท่ากัน คือ 0.028 ค่าของ E_L/E_T ที่ความหนากล่องตาข่าย 1.0, 0.8, 0.6, 0.4 และ 0.2 m มีค่าเท่ากับ 0.767, 0.758, 0.751, 0.740 และ 0.717 ตามลำดับ

6 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

6.1. สรุปผลการทดลอง

การหาสมการอัตราการไหลผ่านฝายกล่องตาข่ายเมื่อความสูงและความหนาของฝายเปลี่ยนแปลง พบว่าอัตราการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกการไหลด้านหน้าฝายเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ $Q = a \times y_1^b$ เมื่อ Q คือ อัตราการไหล ($m^3 s^{-1}$) , y_1 คือความลึกของน้ำด้านหน้ากล่อง (m) , a และ b คือสัมประสิทธิ์ของสมการ โดยสัมประสิทธิ์ a และ b มีค่าลดลงเมื่อความหนาของฝายเพิ่มขึ้น โดยสัมประสิทธิ์ a มีค่าประมาณ 0.616 ที่ความหนาฝาย 0.2 m และ ลดลงเหลือ 0.217 เมื่อความหนาฝายเพิ่มขึ้นเป็น 1.0 m ในขณะที่ สัมประสิทธิ์ b มีค่าประมาณ 2.242 ที่ความหนาฝาย 0.2 m และ ลดลงเหลือ 1.818 เมื่อความหนาฝายเพิ่มขึ้นเป็น 1.0 m การสูญเสียพลังงานการไหลแสดงในรูปการสูญเสียพลังงานสัมพัทธ์ (E_L/E_1) ซึ่งพบว่าการสูญเสียพลังงานสัมพัทธ์มีค่าลดลงเมื่อค่าฟรูดนัมเบอร์ด้านหน้าฝายเพิ่มขึ้น

6.2. ข้อเสนอแนะ

- 6.2.1. ควรศึกษาชนิดและขนาดของหินอื่นเพิ่มเติม
- 6.2.2. ควรมีการสอบเทียบมิเตอร์วัดอัตราการไหล เพื่อให้ได้ค่าอัตราการไหลที่มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น
- 6.2.3. จากการทดลองครั้งนี้ได้ศึกษาอัตราการไหลผ่านฝายเกเบียนที่ระดับความสูงหินสูงสุด 21 เซนติเมตร ดังนั้นงานวิจัยครั้งต่อไปควรศึกษาอัตราการไหลผ่านฝายเกเบียนที่ระดับความสูงหินมากกว่า 21 เซนติเมตรขึ้นไป

7 บรรณานุกรม

- กรมชลประทาน. **อภิธานศัพท์เทคนิค ด้านการชลประทานและการระบายน้ำ ฉบับปรับปรุง พุทธศักราช 2553**. พิมพ์ครั้งที่4. กรุงเทพมหานคร: บริษัท อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชิ่ง จำกัด (มหาชน), 2553.
- กรีธาทัพ บุญยศรีศิริไท. **ลักษณะการไหลทางชลศาสตร์ที่มีผลกระทบต่ออาคารเคลื่อนที่ของตะกอน ผ่านฝายเกเบียน**. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมชลประทาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน,มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2560.
- จันทวัน เบ็ญจวรรณ์. 2563. **ทรัพยากรน้ำ** (Online). www.human.tru.ac.th, 16 เมษายน 2563.
- ชัยยุทธ ชินณะราศรี, สมชาย ดอนเจดีย์ และ อุดมศักดิ์ อิศรางกูร ณ อยุธยา. 2547. การไหลผ่านทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร**. 27 (1): 81-93.
- ธัญธร ออกวะลา. 2553. **กลศาสตร์ของไหล**. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม
- ปราโมท พลพณะนาวี. 2554. **หลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทาน** (Online). www.kmcenter.rid.go.th, 16 เมษายน 2563.
- มานิต ช่วยงาน. 2554. **ปฏิพิกลศาสตร์ SOIL MECHANICS** (Online). www.krumanit.cmtc.ac.th, 16 เมษายน 2563.
- สัณห์พจน์ นันทิพรภ. **การศึกษาแบบจำลองทางชลศาสตร์ของอ่างสลายพลังงานด้วยกล่องตาข่ายแบบเกเบียน**. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548.
- Hassan I.M. 2010. **FlowoverGabionWeirs** (Online), 21 September 2019.

8 ภาคผนวก

8.1 ภาคผนวก ก



รูปผนวกที่ ก1 หินที่ใช้ในการทดลอง



รูปผนวกที่ ก2 เครื่องสูบน้ำ



รูปผนวกที่ ก3 มิเตอร์วัดอัตราการไหล



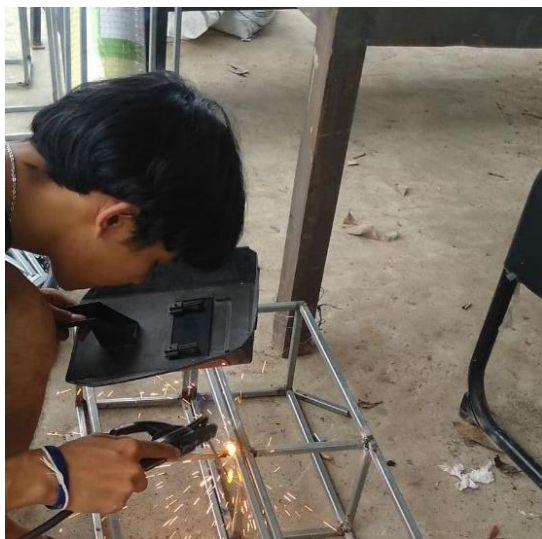
รูปผนวกที่ ก4 เครื่องวัดระดับน้ำ



รูปผนวกที่ ก5 วัดขนาดกล่องตาข่าย



รูปผนวกที่ ก6 ตัดเหล็กตามความยาวที่วัด



รูปผนวกที่ ก7 เชื่อมเหล็กให้เป็นกล่อง



รูปผนวกที่ ก8 ห่อหุ้มตาข่ายรอบกล่อง



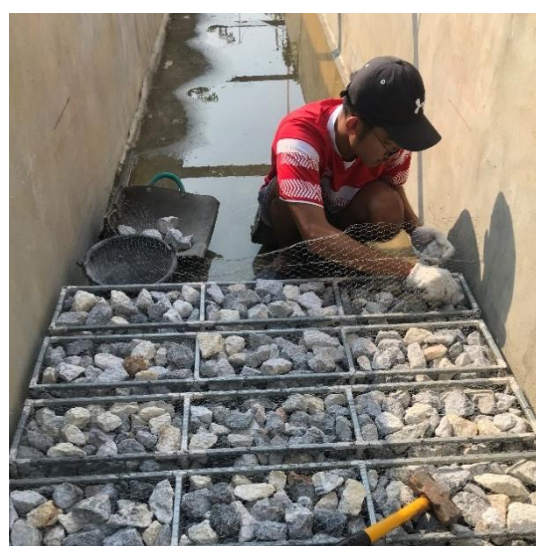
รูปผนวกที่ ก9 เจาะรูอ่างทดลองอัตราส่วนช่องว่าง



รูปผนวกที่ ก10 ชั่งน้ำหนักน้ำเพื่อหาอัตราส่วนช่องว่าง



รูปผนวกที่ ก11 เปลี่ยนความสูงหินที่ทดลอง



รูปผนวกที่ ก12 เปลี่ยนความหนากล่องตาข่าย

8.2 ภาคผนวก ข



รูปผนวกที่ ข1 ทดลองอัตราการไหลผ่านฝายกล่องตาข่ายหนา 0.2 m ที่ความสูงของหิน 20 cm



รูปผนวกที่ ข2 ทดลองอัตราการไหลผ่านฝายกล่องตาข่ายหนา 0.4 m ที่ความสูงของหิน 20 cm



รูปผนวกที่ ข3 ทดลองอัตราการไหลผ่านฝายกล่องตาข่ายหนา 0.6 m ที่ความสูงของหิน 21 cm



รูปผนวกที่ ข4 ทดลองอัตราการไหลผ่านฝายกล่องตาข่ายหนา 0.8 m ที่ความสูงของหิน 21 cm



รูปผนวกที่ ข5 ทดลองอัตราการไหลผ่านฝายกล่องตาข่ายหนา 1.0 m ที่ความสูงของหิน 21 cm

8.3 ภาคผนวกตาราง

ตารางผนวกที่ 1 เปรียบเทียบการสูญเสียพลังงานสัมพันธ์ เมื่อความหนาฝายเปลี่ยนไป

Thicknesses (m)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
a	0.413	0.419	0.413	0.421	0.456
b	-0.158	-0.161	-0.190	-0.168	-0.141
r ²	0.755	0.723	0.880	0.799	0.833

หมายเหตุ สมการที่ใช้คำนวณ การสูญเสียพลังงานสัมพันธ์ คือ $E_L/E_1 = a \times F_r^b$

ตารางผนวกที่ 2 ปริมาตรโครงกลองรวมหิน ปริมาตรช่องว่างและอัตราส่วนช่องว่าง

หมายเลขกลอง	นน.กลองเปล่า (kg)	ปริมาตรโครงกลองรวมหิน (m ³)	ปริมาตรช่องว่าง (m ³)	อัตราส่วนช่องว่าง
1	3.300	24310	12512	0.515
2	3.295	24185	12637	0.523
3	3.275	24185	12637	0.523
4	3.300	24260	12562	0.518
5	3.320	24210	12612	0.521
6	3.300	24035	12787	0.532
7	3.300	24285	12537	0.516
8	3.300	24435	12387	0.507
9	3.300	24460	12362	0.505
10	3.260	24235	12587	0.519
11	3.300	24735	12087	0.489
12	3.260	24735	12087	0.489
13	3.290	24685	12137	0.492
14	3.250	24285	12537	0.516
15	3.270	24385	12437	0.510
			Average	0.512
			SD	0.013

ตารางผนวกที่ 3 ค่า Shape length ของชุดที่ 1 – 6 โดยสุ่มหินมาชุดละ 10 ก้อน

ชุดที่		ก้อนที่										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	avg
1	a	9.200	8.960	7.300	6.770	7.500	10.110	8.300	8.300	9.070	7.940	8.345
	b	4.980	5.810	5.765	5.755	5.500	4.090	3.955	5.580	5.200	5.380	5.202
	c	3.020	3.705	3.025	4.255	4.130	5.470	2.140	3.790	2.470	3.790	3.580
2	a	5.000	8.190	6.800	6.740	7.860	9.000	8.230	8.190	6.000	7.190	7.320
	b	4.610	4.880	5.500	5.040	6.330	5.690	5.370	6.140	5.660	4.630	5.385
	c	3.900	3.430	3.560	2.890	3.400	3.200	3.060	3.700	4.100	3.370	3.461
3	a	8.760	8.600	6.890	9.130	6.150	4.990	5.450	6.270	5.800	11.520	7.356
	b	6.800	7.530	5.940	5.400	3.970	4.500	4.630	4.810	4.790	6.100	5.447
	c	3.660	4.790	3.060	4.095	2.940	3.660	2.710	3.500	3.360	4.000	3.578
4	a	9.860	8.720	6.830	6.600	8.000	6.460	8.750	7.530	8.580	10.560	8.189
	b	4.570	5.640	6.550	5.510	5.390	5.300	4.910	5.700	6.165	5.150	5.489
	c	4.150	4.830	3.390	3.900	3.970	4.590	4.590	3.120	4.100	4.790	4.143
5	a	8.780	7.200	7.290	8.650	8.200	8.400	6.990	7.660	9.780	8.450	8.140
	b	5.670	6.880	7.000	5.350	5.210	5.720	6.170	5.970	6.200	4.880	5.905
	c	4.650	4.580	5.860	4.650	2.710	3.390	3.400	3.230	4.250	5.040	4.176
6	a	7.530	5.820	9.400	6.450	7.610	6.600	6.095	5.670	6.870	7.830	6.988
	b	4.990	4.700	5.700	5.110	6.270	5.390	5.680	5.500	5.460	6.460	5.526
	c	4.200	3.995	3.410	4.140	4.100	3.450	5.200	4.260	3.340	5.190	4.129

ตารางผนวกที่ 4 ค่า Shape length ของชุดที่ 7 – 12 โดยสุ่มหินมาชุดละ 10 ก้อน

ชุดที่		ก้อนที่										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	avg
7	a	7.640	8.500	7.760	6.980	9.400	7.960	8.690	10.130	6.740	7.190	8.099
	b	5.500	5.300	6.880	3.850	5.100	6.150	5.200	5.940	4.400	4.650	5.297
	c	3.730	3.780	4.530	3.250	2.940	3.500	1.910	4.660	3.860	4.240	3.640
8	a	8.000	8.520	8.330	8.100	7.340	6.400	7.350	10.300	7.950	8.400	8.069
	b	5.550	4.480	6.120	5.270	5.220	5.700	5.300	5.380	5.260	4.000	5.228
	c	4.230	4.640	4.480	4.130	2.700	3.990	3.270	2.960	2.170	4.040	3.661
9	a	7.260	7.100	9.360	8.130	6.090	6.710	8.300	6.100	7.520	7.250	7.382
	b	5.400	5.570	5.700	5.510	5.960	6.530	3.640	5.570	6.160	5.660	5.570
	c	2.400	3.480	4.510	2.540	4.620	4.270	2.400	3.340	5.080	2.780	3.542
10	a	6.240	6.300	7.600	6.320	7.570	7.890	6.900	9.090	7.100	7.510	7.252
	b	6.030	4.200	3.180	5.380	4.850	5.280	6.230	3.780	5.970	5.070	4.997
	c	5.000	4.240	3.050	3.740	4.180	5.300	3.570	3.200	2.400	2.850	3.753
11	a	7.700	11.090	8.150	7.900	8.760	9.400	8.950	7.670	7.290	9.750	8.666
	b	5.930	6.580	6.900	6.220	5.100	6.300	7.000	6.360	6.300	5.400	6.209
	c	3.830	3.080	4.570	3.000	3.430	4.060	4.220	3.270	3.150	4.860	3.747
12	a	7.550	6.800	8.380	8.810	7.100	7.620	8.930	6.000	6.400	6.200	7.379
	b	6.840	5.600	6.750	6.090	4.700	5.100	6.500	4.990	6.100	5.560	5.823
	c	3.250	4.090	3.620	4.700	3.500	4.000	2.730	3.860	3.940	2.300	3.599

ตารางผนวกที่ 5 ค่า Shape factor ค่าเฉลี่ยของ Shape length และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

	a	b	c	Shape factor
Average	7.765	5.506	3.751	6.511
SD	0.539	0.337	0.254	0.442

ตารางผนวกที่ 6 ค่าอัตราการไหลเฉลี่ย และระดับน้ำเฉลี่ย ณ จุดวัดต่างๆ ที่ความหนาฝาย 0.2 m

ความหนาฝาย (m)	ระดับน้ำ ที่ทำกรวัด (cm)	ระดับน้ำเหนือฝาย เฉลี่ย (cm)	ระดับน้ำหน้ากล่อง เฉลี่ย (cm)	ระดับน้ำหลังกล่อง เฉลี่ย (cm)	ระดับน้ำท้ายฝาย เฉลี่ย (cm)	อัตราการไหลเฉลี่ย (cms)	อัตราการไหลเฉลี่ย (l/s)
0.2	5	5.300	5.500	3.033	2.583	0.003	2.833
	10	10.033	10.533	4.533	4.133	0.008	7.556
	15	14.867	15.167	5.567	5.133	0.012	12.333
	ขอบบนด้าน หน้ากล่อง	19.533	19.867	7.333	6.900	0.019	19.222
	ขอบบนด้าน หลังกล่อง	21.467	21.467	8.200	7.833	0.021	20.722

ตารางผนวกที่ 7 ค่าอัตราการไหลเฉลี่ย และระดับน้ำเฉลี่ย ณ จุดวัดต่างๆ ที่ความหนาฝาย 0.4 m

ความหนาฝาย (m)	ระดับน้ำ ที่ทำกรวด (cm)	ระดับน้ำเหนือฝาย เฉลี่ย (cm)	ระดับน้ำหน้ากล่อง เฉลี่ย (cm)	ระดับน้ำหลังกล่อง เฉลี่ย (cm)	ระดับน้ำท้ายฝาย เฉลี่ย (cm)	อัตราการไหลเฉลี่ย (cms)	อัตราการไหลเฉลี่ย (l/s)
0.4	5	5.133	5.533	2.533	2.033	0.003	2.611
	10	10.533	10.933	3.933	3.167	0.007	7.056
	15	15.700	15.967	4.567	4.767	0.011	11.333
	ขอบบนด้าน หน้ากล่อง	20.067	20.467	6.000	6.500	0.018	17.889
	ขอบบนด้าน หลังกล่อง	22.267	22.467	7.100	7.667	0.026	26.111

ตารางผนวกที่ 8 ค่าอัตราการไหลเฉลี่ย และระดับน้ำเฉลี่ย ณ จุดวัดต่างๆ ที่ความหนาฝาย 0.6 m

ความหนาฝาย (m)	ระดับน้ำ ที่ทำกรวด (cm)	ระดับน้ำเหนือฝาย เฉลี่ย (cm)	ระดับน้ำหน้ากล่อง เฉลี่ย (cm)	ระดับน้ำหลังกล่อง เฉลี่ย (cm)	ระดับน้ำท้ายฝาย เฉลี่ย (cm)	อัตราการไหลเฉลี่ย (cms)	อัตราการไหลเฉลี่ย (l/s)
0.6	5	5.233	5.533	2.500	2.300	0.001	1.389
	10	9.767	9.900	3.433	3.067	0.003	3.278
	15	15.000	15.233	3.967	4.467	0.008	7.556
	ขอบบนด้าน หน้ากล่อง	20.000	20.133	5.267	5.533	0.013	13.444
	ขอบบนด้าน หลังกล่อง	23.333	23.533	7.167	6.933	0.027	26.667

ตารางผนวกที่ 9 ค่าอัตราการไหลเฉลี่ย และระดับน้ำเฉลี่ย ณ จุดวัดต่างๆ ที่ความหนาฝาย 0.8 m

ความหนาฝาย (m)	ระดับน้ำ ที่ทำกรวด (cm)	ระดับน้ำเหนือฝาย เฉลี่ย (cm)	ระดับน้ำหน้ากล่อง เฉลี่ย (cm)	ระดับน้ำหลังกล่อง เฉลี่ย (cm)	ระดับน้ำท้ายฝาย เฉลี่ย (cm)	อัตราการไหลเฉลี่ย (cms)	อัตราการไหลเฉลี่ย (l/s)
0.8	5	5.367	5.333	2.433	1.800	0.001	1.167
	10	10.233	10.100	3.233	3.033	0.003	2.722
	15	15.000	14.933	4.367	4.000	0.007	6.722
	ขอบบนด้าน หน้ากล่อง	20.300	20.267	5.267	4.933	0.013	12.778
	ขอบบนด้าน หลังกล่อง	24.633	24.467	7.533	7.467	0.027	27.222

ตารางผนวกที่ 10 ค่าอัตราการไหลเฉลี่ย และระดับน้ำเฉลี่ย ณ จุดวัดต่างๆ ที่ความหนาฝาย 1.0 m

ความหนาฝาย (m)	ระดับน้ำ ที่ทำการวัด (cm)	ระดับน้ำเหนือฝาย เฉลี่ย (cm)	ระดับน้ำหน้ากล่อง เฉลี่ย (cm)	ระดับน้ำหลังกล่อง เฉลี่ย (cm)	ระดับน้ำท้ายฝาย เฉลี่ย (cm)	อัตราการไหลเฉลี่ย (cms)	อัตราการไหลเฉลี่ย (l/s)
1.0	5	4.867	4.700	2.100	1.733	0.001	0.644
	10	9.967	9.633	3.133	2.667	0.002	2.333
	15	15.800	15.567	4.067	3.700	0.006	5.833
	ขอบบนด้าน หน้ากล่อง	20.600	20.267	5.267	4.867	0.011	10.722
	ขอบบนด้าน หลังกล่อง	25.000	24.900	7.600	7.533	0.027	27.222

ตารางผนวกที่ 11 ค่าการสูญเสียพลังงานสัมผัส (E_L/E_1) กับค่าฟรูดนัมเบอร์ของกรไหลทางด้านหน้าของกล่องต่าข่าย (Fr_1) ที่ความหนากล่อง 0.2 m

	Q cms.	v_1 m./s.	v_2 m./s.	$v_1^2 / 2g$ m.	$v_2^2 / 2g$ m.	y_1 m.	y_2 m.	E_1 m.	E_2 m.	E_L m.	E_L / E_1	Fr_1
12 cm	0.004	0.031	0.101	4.97E-05	5.17E-04	0.096	0.030	0.096	0.030	0.066	0.685	0.032
	0.007	0.048	0.146	1.16E-04	1.08E-03	0.129	0.040	0.129	0.041	0.088	0.683	0.042
	0.009	0.056	0.163	1.58E-04	1.36E-03	0.141	0.048	0.141	0.049	0.091	0.649	0.047
	0.013	0.073	0.207	2.69E-04	2.19E-03	0.154	0.054	0.155	0.056	0.098	0.637	0.059
	0.021	0.103	0.259	5.36E-04	3.42E-03	0.169	0.067	0.170	0.070	0.099	0.585	0.080
15 cm	0.003	0.028	0.089	3.97E-05	4.07E-04	0.100	0.028	0.100	0.028	0.072	0.717	0.028
	0.006	0.042	0.136	8.90E-05	9.46E-04	0.121	0.036	0.121	0.037	0.084	0.694	0.038
	0.009	0.054	0.169	1.47E-04	1.45E-03	0.148	0.047	0.148	0.048	0.100	0.673	0.045
	0.013	0.067	0.211	2.31E-04	2.28E-03	0.166	0.055	0.167	0.057	0.109	0.656	0.053
	0.021	0.093	0.259	4.43E-04	3.42E-03	0.186	0.067	0.187	0.070	0.116	0.623	0.069
20 cm	0.006	0.044	0.129	9.67E-05	8.47E-04	0.124	0.038	0.124	0.039	0.086	0.688	0.039
	0.013	0.064	0.212	2.08E-04	2.29E-03	0.172	0.052	0.173	0.054	0.118	0.685	0.049
	0.016	0.070	0.234	2.50E-04	2.80E-03	0.197	0.065	0.198	0.068	0.130	0.657	0.050
	0.021	0.081	0.266	3.35E-04	3.61E-03	0.218	0.070	0.218	0.074	0.144	0.662	0.055
	0.024	0.089	0.291	4.03E-04	4.31E-03	0.229	0.075	0.229	0.079	0.150	0.654	0.059
21 cm	0.007	0.041	0.139	8.78E-05	9.83E-04	0.135	0.040	0.135	0.041	0.094	0.694	0.036
	0.013	0.064	0.215	2.07E-04	2.36E-03	0.174	0.051	0.175	0.053	0.121	0.694	0.049
	0.017	0.070	0.232	2.48E-04	2.74E-03	0.199	0.062	0.200	0.065	0.135	0.676	0.050
	0.021	0.077	0.261	3.05E-04	3.46E-03	0.224	0.070	0.225	0.073	0.151	0.673	0.052
	0.024	0.086	0.287	3.75E-04	4.19E-03	0.234	0.076	0.234	0.080	0.154	0.658	0.057

ตารางผนวกที่ 12 ค่าการสูญเสียพลังงานสัมพัทธ์ (E_L/E_1) กับค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหลทางด้านหน้าของกล่องต่าข่าย (Fr_1) ที่ความหนากล่อง 0.4 m

	Q cms.	v_1 m./s.	v_2 m./s.	$v_1^2 / 2g$ m.	$v_2^2 / 2g$ m.	y_1 m.	y_2 m.	E_1 m.	E_2 m.	E_L m.	E_L / E_1	Fr_1
12 cm	0.004	0.033	0.113	5.68E-05	6.48E-04	0.092	0.028	0.092	0.029	0.064	0.690	0.035
	0.007	0.045	0.146	1.04E-04	1.08E-03	0.130	0.035	0.130	0.036	0.094	0.723	0.040
	0.009	0.053	0.162	1.41E-04	1.33E-03	0.140	0.042	0.140	0.043	0.097	0.691	0.045
	0.011	0.065	0.183	2.17E-04	1.71E-03	0.146	0.050	0.146	0.052	0.095	0.646	0.055
	0.013	0.071	0.202	2.57E-04	2.08E-03	0.150	0.050	0.150	0.052	0.098	0.653	0.058
15 cm	0.004	0.031	0.105	4.84E-05	5.62E-04	0.100	0.026	0.100	0.027	0.073	0.735	0.031
	0.007	0.043	0.155	9.49E-05	1.22E-03	0.136	0.039	0.136	0.040	0.096	0.705	0.037
	0.009	0.046	0.171	1.08E-04	1.48E-03	0.164	0.044	0.164	0.045	0.119	0.723	0.036
	0.016	0.073	0.239	2.72E-04	2.92E-03	0.187	0.057	0.187	0.060	0.127	0.679	0.054
	0.019	0.084	0.255	3.58E-04	3.32E-03	0.195	0.064	0.195	0.067	0.128	0.655	0.061
20 cm	0.006	0.033	0.155	5.47E-05	1.22E-03	0.165	0.036	0.165	0.037	0.128	0.775	0.026
	0.013	0.060	0.212	1.83E-04	2.29E-03	0.184	0.051	0.184	0.053	0.131	0.710	0.045
	0.016	0.065	0.234	2.14E-04	2.80E-03	0.213	0.063	0.214	0.066	0.148	0.692	0.045
	0.021	0.074	0.266	2.76E-04	3.61E-03	0.240	0.072	0.240	0.076	0.165	0.685	0.048
	0.024	0.083	0.291	3.50E-04	4.31E-03	0.246	0.067	0.246	0.071	0.175	0.710	0.053
21 cm	0.008	0.042	0.151	8.87E-05	1.17E-03	0.166	0.045	0.166	0.046	0.120	0.721	0.033
	0.011	0.052	0.200	1.39E-04	2.03E-03	0.183	0.055	0.183	0.057	0.126	0.688	0.039
	0.015	0.058	0.227	1.71E-04	2.62E-03	0.213	0.062	0.213	0.065	0.149	0.697	0.040
	0.022	0.073	0.257	2.69E-04	3.36E-03	0.255	0.076	0.255	0.079	0.176	0.689	0.046
	0.024	0.079	0.278	3.16E-04	3.93E-03	0.256	0.078	0.256	0.082	0.174	0.680	0.050

ตารางผนวกที่ 13 ค่าการสูญเสียพลังงานสัมพันธ์ (E_L/E_1) กับค่าฟรูดนัมเบอร์ของกรไหลทางด้านหน้าของกล่องตาศาย (Fr_1) ที่ความหนากล่อง 0.6 m

	Q cms.	v_1 m./s.	v_2 m./s.	$v_1^2 / 2g$ m.	$v_2^2 / 2g$ m.	y_1 m.	y_2 m.	E_1 m.	E_2 m.	E_L m.	E_L / E_1	Fr_1
12 cm	0.003	0.028	0.108	4.05E-05	5.92E-04	0.099	0.025	0.099	0.026	0.074	0.742	0.029
	0.005	0.036	0.133	6.66E-05	9.03E-04	0.124	0.033	0.124	0.034	0.090	0.727	0.033
	0.008	0.050	0.163	1.30E-04	1.35E-03	0.141	0.040	0.141	0.041	0.099	0.706	0.043
	0.013	0.070	0.210	2.53E-04	2.25E-03	0.151	0.047	0.151	0.049	0.102	0.674	0.058
	0.019	0.096	0.254	4.70E-04	3.29E-03	0.162	0.060	0.163	0.063	0.100	0.611	0.076
15 cm	0.004	0.029	0.105	4.25E-05	5.62E-04	0.107	0.026	0.107	0.027	0.080	0.751	0.028
	0.009	0.048	0.178	1.17E-04	1.62E-03	0.160	0.043	0.160	0.045	0.115	0.721	0.038
	0.014	0.064	0.232	2.10E-04	2.75E-03	0.178	0.050	0.178	0.053	0.125	0.703	0.049
	0.017	0.076	0.251	2.94E-04	3.20E-03	0.188	0.057	0.188	0.060	0.128	0.680	0.056
	0.020	0.088	0.267	3.92E-04	3.63E-03	0.194	0.064	0.194	0.067	0.127	0.653	0.064
20 cm	0.008	0.069	0.251	2.41E-04	3.21E-03	0.094	0.032	0.094	0.035	0.059	0.625	0.072
	0.013	0.059	0.237	1.78E-04	2.87E-03	0.183	0.046	0.184	0.049	0.135	0.734	0.044
	0.014	0.057	0.256	1.63E-04	3.33E-03	0.208	0.055	0.208	0.058	0.150	0.720	0.040
	0.019	0.065	0.249	2.18E-04	3.17E-03	0.243	0.066	0.243	0.069	0.174	0.715	0.042
	0.025	0.084	0.310	3.62E-04	4.90E-03	0.251	0.072	0.252	0.077	0.175	0.694	0.054
21 cm	0.008	0.039	0.195	7.75E-05	1.94E-03	0.170	0.037	0.170	0.039	0.131	0.771	0.030
	0.013	0.060	0.238	1.82E-04	2.88E-03	0.184	0.052	0.185	0.055	0.130	0.703	0.044
	0.014	0.056	0.222	1.59E-04	2.50E-03	0.209	0.056	0.209	0.059	0.150	0.720	0.039
	0.021	0.069	0.282	2.42E-04	4.04E-03	0.262	0.072	0.262	0.076	0.186	0.710	0.043
	0.026	0.080	0.281	3.25E-04	4.03E-03	0.274	0.078	0.274	0.082	0.192	0.702	0.049

ตารางผนวกที่ 14 ค่าการสูญเสียพลังงานสัมพันธ์ (E_L/E_1) กับค่าฟรูดนัมเบอร์ของกรไหลทางด้านหน้าของกล่องต่าข่าย (Fr_1) ที่ความหนากล่อง 0.8 m

	Q cms.	v_1 m./s.	v_2 m./s.	$v_1^2 / 2g$ m.	$v_2^2 / 2g$ m.	y_1 m.	y_2 m.	E_1 m.	E_2 m.	E_L m.	E_L / E_1	Fr_1
12 cm	0.003	0.032	0.116	5.09E-05	6.86E-04	0.086	0.020	0.086	0.021	0.065	0.759	0.034
	0.004	0.031	0.124	4.88E-05	7.81E-04	0.115	0.028	0.115	0.029	0.086	0.749	0.029
	0.008	0.049	0.167	1.24E-04	1.42E-03	0.140	0.040	0.140	0.041	0.099	0.705	0.042
	0.012	0.065	0.211	2.13E-04	2.27E-03	0.150	0.042	0.151	0.044	0.106	0.706	0.053
	0.018	0.092	0.245	4.30E-04	3.07E-03	0.165	0.058	0.165	0.061	0.104	0.630	0.072
15 cm	0.004	0.030	0.119	4.63E-05	7.23E-04	0.115	0.027	0.115	0.028	0.087	0.758	0.028
	0.007	0.038	0.153	7.37E-05	1.20E-03	0.155	0.039	0.155	0.040	0.115	0.740	0.031
	0.011	0.055	0.200	1.55E-04	2.03E-03	0.173	0.049	0.173	0.051	0.122	0.705	0.042
	0.013	0.063	0.208	2.00E-04	2.21E-03	0.177	0.049	0.178	0.051	0.126	0.712	0.048
	0.018	0.080	0.248	3.29E-04	3.14E-03	0.191	0.058	0.191	0.061	0.130	0.680	0.059
20 cm	0.007	0.043	0.178	9.51E-05	1.61E-03	0.143	0.037	0.143	0.039	0.104	0.730	0.037
	0.011	0.049	0.206	1.22E-04	2.16E-03	0.185	0.046	0.185	0.048	0.137	0.740	0.036
	0.013	0.050	0.218	1.30E-04	2.41E-03	0.213	0.052	0.213	0.054	0.158	0.744	0.035
	0.019	0.065	0.257	2.18E-04	3.37E-03	0.239	0.063	0.239	0.066	0.173	0.722	0.043
	0.026	0.083	0.292	3.50E-04	4.33E-03	0.259	0.072	0.260	0.076	0.183	0.706	0.052
21 cm	0.007	0.043	0.175	9.22E-05	1.56E-03	0.143	0.038	0.143	0.040	0.103	0.723	0.036
	0.013	0.051	0.249	1.35E-04	3.15E-03	0.214	0.045	0.214	0.048	0.166	0.775	0.036
	0.019	0.066	0.320	2.24E-04	5.21E-03	0.238	0.063	0.238	0.068	0.170	0.714	0.043
	0.021	0.065	0.247	2.15E-04	3.12E-03	0.272	0.073	0.272	0.076	0.196	0.720	0.040
	0.026	0.080	0.287	3.30E-04	4.21E-03	0.275	0.076	0.275	0.080	0.195	0.709	0.049

ตารางผนวกที่ 15 ค่าการสูญเสียพลังงานสัมพันธ์ (E_L/E_1) กับค่าฟรูดนัมเบอร์ของกรไหลทางด้านหน้าของกล่องต่าข่าย (Fr_1) ที่ความหนากล่อง 1.0 m

	Q cms.	v_1 m./s.	v_2 m./s.	$v_1^2 / 2g$ m.	$v_2^2 / 2g$ m.	y_1 m.	y_2 m.	E_1 m.	E_2 m.	E_L m.	E_L / E_1	Fr_1
12 cm	0.002	0.020	0.084	2.14E-05	3.63E-04	0.100	0.022	0.100	0.022	0.078	0.777	0.021
	0.004	0.027	0.109	3.70E-05	6.03E-04	0.114	0.023	0.114	0.024	0.091	0.794	0.025
	0.011	0.061	0.209	1.90E-04	2.22E-03	0.151	0.043	0.152	0.045	0.106	0.702	0.050
	0.014	0.073	0.222	2.74E-04	2.51E-03	0.160	0.047	0.161	0.050	0.111	0.692	0.059
	0.022	0.106	0.276	5.71E-04	3.88E-03	0.175	0.063	0.175	0.067	0.108	0.618	0.081
15 cm	0.003	0.020	0.081	2.02E-05	3.31E-04	0.108	0.023	0.108	0.023	0.085	0.784	0.019
	0.004	0.027	0.111	3.70E-05	6.32E-04	0.114	0.026	0.114	0.027	0.088	0.767	0.025
	0.006	0.033	0.135	5.50E-05	9.28E-04	0.151	0.035	0.151	0.036	0.115	0.762	0.027
	0.014	0.061	0.215	1.87E-04	2.36E-03	0.194	0.053	0.195	0.055	0.139	0.715	0.044
	0.020	0.081	0.270	3.35E-04	3.71E-03	0.207	0.060	0.208	0.064	0.144	0.693	0.057
20 cm	0.003	0.026	0.100	3.52E-05	5.07E-04	0.092	0.021	0.092	0.022	0.071	0.767	0.028
	0.006	0.034	0.136	5.86E-05	9.46E-04	0.146	0.034	0.146	0.035	0.111	0.761	0.028
	0.011	0.055	0.174	1.54E-04	1.54E-03	0.161	0.045	0.161	0.047	0.115	0.712	0.044
	0.014	0.055	0.191	1.56E-04	1.86E-03	0.212	0.054	0.212	0.056	0.157	0.737	0.038
	0.027	0.086	0.315	3.78E-04	5.05E-03	0.267	0.073	0.267	0.078	0.189	0.708	0.053
21 cm	0.003	0.030	0.101	4.63E-05	5.20E-04	0.096	0.029	0.096	0.029	0.067	0.696	0.031
	0.006	0.034	0.135	5.94E-05	9.30E-04	0.148	0.034	0.148	0.035	0.113	0.764	0.028
	0.011	0.042	0.188	9.08E-05	1.80E-03	0.212	0.052	0.212	0.054	0.159	0.747	0.029
	0.020	0.062	0.238	1.95E-04	2.88E-03	0.272	0.069	0.272	0.072	0.200	0.736	0.038
	0.026	0.079	0.280	3.18E-04	4.00E-03	0.280	0.078	0.280	0.082	0.198	0.707	0.048

ประวัตินิสิต

- 1.ชื่อผู้วิจัย นายทัตพงษ์ สุทธิวิธา รหัสนิสิต 5920500352 อายุ 22 ปี ตำแหน่ง นิสิต
 ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 ที่อยู่ 73/3 หมู่ 6 ต.โพธิ์เสด็จ อ.เมือง จ.นครศรีธรรมราช 80000
 โทรศัพท์ 0839679240 E-mail thatpong9240@gmail.com
- | คุณวุฒิการศึกษา | จากโรงเรียน | ปีการศึกษาที่จบ |
|-------------------|--|-----------------|
| มัธยมศึกษาตอนปลาย | โรงเรียนสาธิตเทศบาลวัดเพชรจริก จ.นครศรีธรรมราช | 2558 |
| มัธยมศึกษาตอนต้น | โรงเรียนสาธิตเทศบาลวัดเพชรจริก จ.นครศรีธรรมราช | 2555 |
- 2.ชื่อผู้วิจัย นายพงศธร แสงวิรุณทร รหัสนิสิต 5920500468 อายุ 21 ปี ตำแหน่ง นิสิต
 ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 ที่อยู่ 31/5 หมู่ 5 ต.บางพลับ อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120
 โทรศัพท์ 0628483135 E-mail thong_0924@hotmail.com
- | คุณวุฒิการศึกษา | จากโรงเรียน | ปีการศึกษาที่จบ |
|-------------------|--------------------------------------|-----------------|
| มัธยมศึกษาตอนปลาย | โรงเรียนเบญจมราชูทิศ จ.นครศรีธรรมราช | 2558 |
| มัธยมศึกษาตอนต้น | โรงเรียนเบญจมราชูทิศ จ.นครศรีธรรมราช | 2555 |
- 3.ชื่อผู้วิจัย นายศักรินทร์ คำเจริญ รหัสนิสิต 5920503262 อายุ 22 ปี ตำแหน่ง นิสิต
 ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 ที่อยู่ 71/15 ซอย 1/3 หมู่บ้านปัญญาลี ถนน ปทุมเฉลิมพระเกียรติ ต.บางปรอก อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000
 โทรศัพท์ 0939675737 E-mail armboy_winline@hotmail.co.th
- | คุณวุฒิการศึกษา | จากโรงเรียน | ปีการศึกษาที่จบ |
|-------------------|-----------------------------|-----------------|
| มัธยมศึกษาตอนปลาย | โรงเรียนปทุมวิไล จ.ปทุมธานี | 2558 |
| มัธยมศึกษาตอนต้น | โรงเรียนปทุมวิไล จ.ปทุมธานี | 2555 |