

การศึกษาแบบจำลองทางชลศาสตร์ของการเติมอากาศ ในรางเทอาคารระบายน้ำล้น

เฉลิมพล เพ็ชรสวัสดิ์¹ และ สุวัฒนา จิตตลดากร²

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ถ.พหลโยธิน จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

รับเมื่อ 16 ตุลาคม 2546 ตอรับเมื่อ 23 มิถุนายน 2547

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาพทางชลศาสตร์ของอาคารระบายน้ำล้นชนิดรางเท ซึ่งมีการเติมอากาศเพื่อป้องกันความเสียหายจากการเกิดคาวิตชันเนื่องจากการไหลของน้ำที่มีความเร็วสูง โดยทำการทดลองด้วยแบบจำลองทางกายภาพมาตราส่วน 1:50 (แบบจำลอง:ต้นแบบ) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศในอาคารระบายน้ำล้นชนิดรางเทซึ่งมีอัตราส่วนความสูงของชั้นของตัวเติมอากาศต่อความลึกน้ำในรางเรียบเท่ากับ 1.5 1.3 1.0 และ 0.6 ด้านข้างของรางเททำการติดตั้งปล่องอากาศทั้งสองข้าง โดยมีหน้าผาดังตรงและสันฝายยาว 25 เมตร ซึ่งเท่ากับความกว้างรางเทที่มีความลาดชัน 30 องศา ทำการทดลองรวม 110 การทดลอง ทั้งแบบรางเทที่มีและไม่มีอุปกรณ์เติมอากาศ ผลการศึกษาพบว่า ที่ค่าความเร็วของน้ำมากกว่า 29 เมตรต่อวินาที ควรมีการป้องกันพื้นผิวของรางเทจากคาวิตชันโดยการใช้ตัวเติมอากาศ (aerator) ที่เหมาะสม โดยมีอัตราส่วนความสูงชั้นของชั้นของตัวเติมอากาศต่อความลึกน้ำในรางเรียบ (t/h) เท่ากับ 0.6 ผลการศึกษาได้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (q_a/q) กับอัตราส่วนความกว้างช่องอากาศใต้แผ่นน้ำ (jet length) ต่อความลึกน้ำ (L/h) และได้ความสัมพันธ์ของความกว้างช่องอากาศใต้แผ่นน้ำกับเฮดความเร็วด้านเหนือน้ำของตัวเติมอากาศเมื่อ ramp ทำมุม 8 องศา กับพื้นรางเท และได้ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วน A_u/A_w ของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (q_a/q) กับอัตราส่วนของพื้นที่ปล่องอากาศทั้งสองข้างของรางเทต่อพื้นที่หน้าตัดการไหลด้านเหนือน้ำของตัวเติมอากาศ ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบการเติมอากาศในรางเทที่มีความลาดชัน 30 องศา ของอาคารระบายน้ำล้นได้ต่อไป

¹ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

Hydraulic Model Study of Air Entrainment in Chute Spillways

Chalermpon Phetsawad¹ and Suwatana Chittaladakorn²

Kasetsart University, Phaholyothin Rd., Jatujak, Bangkok 10900

Received 16 October 2003 ; accepted 23 June 2004

Abstract

The objective of this study is to examine air entrainment in chute spillways that need for protection from cavitation damage of spillway chute floors due to relatively high water velocity. The physical model was built with a scale 1:50 (model:prototype) for testing efficiency of air entrainment. The tested ratio of aerator step height with flow depth in spillway chute are varied as 1.5, 1.3, 1.0 and 0.6. Two air-shafts were installed at outside of both chute walls beside the aerator step of the spillway of 25 m. crest length, equal to the width of chute having 30 degree floor slope. The experiment in this study was proceeded totally 110 cases including the test on chute floor with and without aeration devices. The experimental results showed that at velocities greater than 29 m/s, the chutes need to install aeration devices for protecting chute floor from cavitation. The appropriate recommended ratio of aerator step height with flow depth of water in chute (t/h) is 0.6. The studies results obtained relationship between the ratio of q_a/q (air discharge per unit flow discharge) and the ratio of L/h (water jet length per flow depth of water), the relationship of jet jumping distance with velocity head, for ramp with 8 degree angle slope to the chute floor, and the relationship between the ratio of q_a/q (air discharge per unit flow discharge) and the ratio of A_a/A_w (bothside air shaft area per water flow area at aerator upstream). These relationships from the study can be used as a guide for further design of air entrainment required in the chute spillways having 30 degree angle slope.

¹ Graduate Student, Department of Water Resources Engineering.

² Assistant Professor, Department of Water Resources Engineering.

1. บทนำ

การไหลในอาคารระบายน้ำล้นชนิดรางเทซึ่งเป็นการไหลที่มีความเร็วสูง โดยธรรมชาติมีการเติมอากาศด้วยตัวเองซึ่งเกิดที่ผิวอิสระของการไหลที่มีความเร็วสูง อย่างไรก็ตาม Pinto และ Neidert [1] ให้ความเห็นว่า ขบวนการเติมอากาศในอาคารระบายน้ำล้นแบบรางเทที่มีความเร็วการไหลเหนือวิกฤตมีความจำเป็น เนื่องจากการเติมอากาศในของไหลช่วยเพิ่มคุณสมบัติของการไหลทำให้เกิดความดันติดลบที่พื้นรางเท และเป็นปัจจัยในการออกแบบหาความสูงของกำแพงข้างของอาคารระบายน้ำล้นแบบรางเท ในการคำนวณทางชลศาสตร์ของอาคารระบายน้ำล้นพบว่าน้ำที่ไหลผ่านรางเทมีความเร็วสูงมาก และพื้นรางเทอาจไม่ราบเรียบเพียงพอจึงทำให้เกิดความดันติดลบได้ง่าย จึงจำเป็นต้องแก้ปัญหาโดยการเติมอากาศเข้าไปในน้ำที่ไหลด้วยความเร็วสูง การเติมอากาศด้วยตัวเองที่ผิวอิสระของการไหลไม่เพียงพอที่จะป้องกันผิวของพื้นรางเทได้ มีการแนะนำให้ใช้อุปกรณ์สำหรับเติมอากาศที่ผิวล่างของพื้นรางเทโดยการลดระดับของพื้นรางเทลงตรงๆ ให้มีลักษณะเป็นขั้นบันได ทำให้น้ำที่มีความเร็วสูงพุ่งผ่านส่วนที่ลดระดับลงไป และเตรียมช่องรับอากาศไว้ที่กำแพงข้างทั้งสองด้าน พร้อมทั้งติดตั้งท่อรับอากาศซึ่งผ่านเข้ามาด้านล่างของขั้นส่วนที่ลดระดับลง อากาศถูกดูดเข้าสู่กระแสน้ำที่มีความเร็วสูงโดยผลจากการเกิดสุญญากาศ (vacuum effect) ทั้งนี้ตำแหน่งและความสูงของขั้นของตัวเติมอากาศ (aeration steps) ที่เหมาะสมสามารถหาได้จากแบบจำลองเท่านั้น ในการป้องกันความเสียหายต่ออาคารระบายน้ำล้นที่ทำการก่อสร้าง จำเป็นต้องทราบขนาด รูปร่างที่เหมาะสมและมีคุณลักษณะการไหลที่ถูกต้องตามทฤษฎีทางชลศาสตร์ของตัวเติมอากาศ ในการศึกษานี้เป็น การทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical model) ชนิดรูปร่างไม่บิดเบือน (undistorted) และทำการทดสอบที่อัตราการไหลต่างๆ

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาสภาพทางชลศาสตร์ของอาคารรางเท ที่มีการเติมอากาศเพื่อป้องกันความเสียหายจากการเกิดควิเตชัน โดยหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเติมอากาศที่อัตราการไหลต่างๆ ของอาคารรางเทสำหรับอาคารระบายน้ำล้น พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำ กับอัตราส่วนของความยาวพวยน้ำต่อความลึกน้ำที่อัตราการไหลต่างๆ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำกับอัตราส่วนของพื้นที่ปล่องอากาศต่อพื้นที่หน้าตัดการไหลของน้ำ อัตราการไหลต่างๆ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวพวยน้ำกับความเร็วน้ำที่อัตราการไหลต่างๆ

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การเกิดควิเตชันและตำแหน่งของตัวอัดอากาศ

Pinto และ Neidert [1] แนะนำว่าความเร็วของการไหลที่ 30 เมตรต่อวินาที และดรรรชนีควิเตชันต่ำกว่า 0.25 เป็นตัวชี้บอกของความจำเป็นที่ต้องมีการอัดอากาศ

วิธีที่ใช้หาค่าดรรรชนีควิเตชันที่ตำแหน่งต่างๆ ของรางเทอาคารระบายน้ำล้นและเปรียบเทียบค่าเหล่านี้กับแนวโน้มของการเกิดควิเตชัน (cavitation) บนอาคารระบายน้ำล้นหรือด้วยเลขควิเตชันเริ่มต้น (incipient cavitation

number) สำหรับส่วนที่ความขรุขระชนิดต่างๆ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้และสำหรับการไหลในรางเทอาคารระบายน้ำล้นที่มีความหนาของชั้นขอบเขตเท่ากับ δ ดรรชนีคาวิตีชัน ($K_{y-\delta}$) แสดงสมการได้ดังนี้

$$K_{y-\delta} = (P_{y-\delta} - P_v) / (1/2\rho U^2) \quad (1)$$

โดยที่ $P_{y-\delta} = P_{atm} + \gamma (y-\delta) \cos\alpha$

$P_{y-\delta}$ คือ ความดันสัมบูรณ์ภายในชั้นขอบเขต (สมมติให้เป็นความดันที่ริมชั้นขอบเขต)

P_{atm} คือ ค่าความดันสัมบูรณ์ (absolute pressure) ที่ตำแหน่งที่สนใจ

P_v คือ แรงดันไออิ่มตัวของของเหลว

γ คือ น้ำหนักจำเพาะของของเหลว ($\gamma = \rho g$)

α คือ มุมลาดเอียงของรางเทอาคารระบายน้ำล้น (องศา)

y คือ ความลึกของการไหลได้จากการคำนวณ

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว

U คือ ความเร็วการไหลอย่างอิสระที่ตำแหน่งที่สนใจ

Falvey [2] ได้ให้ข้อกำหนดโดยทั่วไปสำหรับคาวิตีชันบนอาคารระบายน้ำล้น ในรูปของดรรชนีคาวิตีชันดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดเพื่อป้องกันความเสียหายจากคาวิตีชัน

ดรรชนีคาวิตีชัน	ความต้องการ
>1.80	ไม่ต้องมีการป้องกันพื้นผิว (ไม่มีปัญหาจากการกัดเซาะ)
0.25-1.80	ป้องกันพื้นผิวการไหลโดยการรักษาพื้นผิวและบดส่วนที่ขรุขระทั้งหมดต่อต้านมุมตัดที่กำหนด
0.17-0.25	ป้องกันพื้นผิวการไหลโดยออกแบบโดยใช้กลไกการอัดด้วยอากาศหรือ ทำการแก้ไขการออกแบบ (เช่น การลดส่วนโค้งเว้า)
0.12-0.17	ป้องกันพื้นผิวการไหลโดยออกแบบโดยใช้กลไกการอัดด้วยอากาศ
<0.12	ป้องกันพื้นผิวการไหลจากการกัดเซาะโดยเลือกการออกแบบใหม่

ที่มา : Falvey [2]

Gal'perin [3] ได้พัฒนาสมการที่ใช้หาเลขคาวิตีชันเริ่มต้นจากผลการทดลองเพื่ออธิบายเลขคาวิตีชันเริ่มต้นดังแสดง ในรูปสมการ $K_i = 1.76 (u_h/U)^2$

โดยที่ u_h คือ ความเร็วที่ขอบของส่วนที่ขรุขระและ U คือ ความเร็วเฉลี่ยของกระแส

3.2 คาวิตซ์

Falvey [4] กล่าวว่า การกักต่อนเป็นรูปแบบของฟองอากาศหรือช่องว่างในของเหลว การไหลของฟองอากาศในน้ำมักถูกเติมกับไอน้ำ เมื่อน้ำมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นและไอน้ำเพิ่มขึ้น คือเกิดเมื่อความดันไอเท่ากับความดันที่จุดนั้น อุณหภูมิขณะนั้นเป็นฟังก์ชันของความดันที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิที่ลดลง การเดือดเป็นไอคือการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอโดยการเพิ่มอุณหภูมิ ขณะที่ขบวนการคาวิตซ์เกิดขึ้นโดยการลดลงของความดันที่จุดที่พิจารณาโดยอุณหภูมิคงที่ การลดความดันลงสามารถทำให้พลังงานรวมในการไหลของการไหลลดลง เพราะการเพิ่มระดับทำให้ความเร็วของน้ำเพิ่มขึ้นและน้ำเกิดการปั่นป่วนมีการหมุนวนหรือมีการแยกตัวเพิ่มขึ้นด้วย

การไหลของน้ำในอาคารชลศาสตร์ที่เต็มไปด้วยฟองอากาศปนเข้าไปหลายขนาดซึ่งเป็นภาวะที่ทำให้เริ่มการเกิดคาวิตซ์ เมื่อความดันน้ำลดลงอย่างต่อเนื่องทำให้ความเร็วของน้ำเพิ่มขึ้น เช่น การไหลของน้ำผ่านสันอาคารระบายน้ำล้นที่การกัดเซาะเริ่มขึ้นคือจุดวิกฤติที่เริ่มเกิดคาวิตซ์ สภาวะวิกฤติที่ทำให้มีขบวนการคาวิตซ์เริ่มหายไปเมื่อความเร็วของน้ำลดลง การกัดเซาะที่เริ่มต้นและสิ้นสุดจะไม่เกิดที่สภาวะการไหลที่เหมือนกัน

ดรชนีคาวิตซ์ เป็นตัวแปรทางพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายถึงขบวนการคาวิตซ์ ซึ่งดรชนีคาวิตซ์เพียงตัวแปรเดียวไม่สามารถอธิบายสภาวะการไหลที่ซับซ้อนได้ แต่ก็ยังเป็นประโยชน์ที่แสดงให้เห็นระดับความรุนแรงของการเกิดคาวิตซ์ได้ เช่น การไหลของน้ำผ่านรอยต่อที่ไม่เรียบ ดรชนีมากกว่า 1.8 คาวิตซ์ไม่เกิดขึ้น และดรชนีน้อยกว่า 1.8 เกิดฟองอากาศมากจนสามารถทำให้เห็นฟองสีขาว ถ้าดัชนีต่ำกว่าเกณฑ์ฟองอากาศเห็นเป็นส่วนๆ โดยมีรูปร่างคล้ายกับกระเปาะ

4. วิธีดำเนินการ

การศึกษาแบบจำลองทางชลศาสตร์ของการเติมอากาศในรางเทอาคารระบายน้ำล้น โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ ขนาดมาตราส่วน 1:50 (แบบจำลอง:ต้นแบบ) ชนิดไม่บิดเบือน (undistorted model) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีพื้นรางเรียบและกรณีพื้นรางเทมีตัวเติมอากาศ โดยแบ่งเป็น 2 กรณีย่อยคือ กรณีที่การทดสอบแบบจำลองชั้นของตัวเติมอากาศ ชนิดไม่มีทางลาด และการทดสอบแบบจำลองชั้นของตัวเติมอากาศ ชนิดมีทางลาด ตัวเติมอากาศประกอบด้วย ชั้นของตัวเติมอากาศ และมีปล่องอากาศ (air shaft) อยู่ทั้ง 2 ข้างรางเท โดยอัตราส่วนความสูงชั้นตัวเติมอากาศต่อความลึกน้ำในรางเรียบ เท่ากับ 1.5, 1.3, 1.0, 0.6 สำหรับรูปร่างของสันฝายในแบบจำลองมีรูปร่างตามมาตรฐานของ Waterways Experiment Station (WES) โดยฝายสันมนมีลักษณะหน้าฝายตั้งตรงในแนวตั้ง ในการทดลองทุกกรณีแบบจำลองฝายสันมนมีความสูงเท่ากับ 0.30 เมตร มีความยาว 0.50 เมตร ซึ่งเท่ากับความกว้างของรางเท โดยรางเทมีความลาดชัน 30 องศา และได้ทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำสูงสุดในแบบจำลองมีค่าไม่เกิน 99 ลิตรต่อวินาที คิดเป็นค่าอัตราการไหลต้นแบบของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้างไม่เกิน 70 ลบ.ม./วินาที/ม. และทำการทดลองที่อัตราการไหลต้นแบบของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้างรางเทต่างๆ กันคือ 70, 65, 60, 55, 50 ลบ.ม./วินาที/ม. โดยทำการทดลองรวมทั้งสิ้น 110 การทดลอง

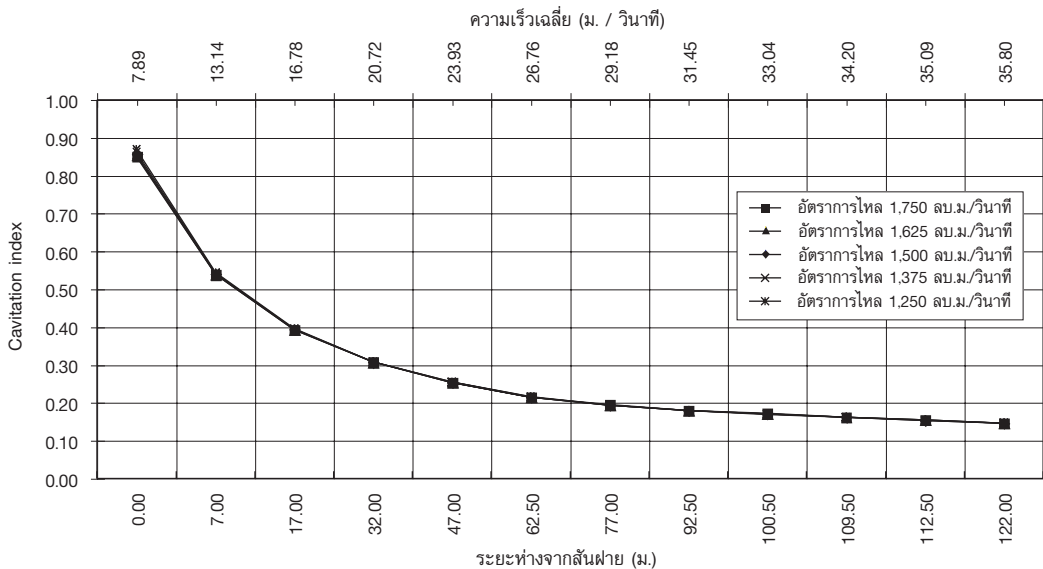
การศึกษาแบบจำลองทางชลศาสตร์ของการเติมอากาศในรางเทสำหรับอาคารระบายน้ำล้น ประกอบด้วยวิธีการศึกษา 3 ขั้นตอน

4.1 การเตรียมงานก่อนการสร้างแบบจำลองกายภาพ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน

4.1.1 การกำหนดมาตราส่วนแบบจำลองกายภาพ ได้ทำการย่อส่วนรางเทอาคารระบายน้ำล้นต้นแบบ และเลือกส่วนหนึ่งของความกว้างอาคารระบายน้ำล้นสร้างเป็นแบบจำลอง (sectional model) เพื่อให้เห็นการทำงานของตัวเติมอากาศที่ชัดเจน รวมทั้งอัตราการไหลสูงสุดที่ทำการทดลองต้องสอดคล้องกับปริมาณน้ำหมุนเวียนของรางน้ำทดลอง ในการกำหนดมาตราส่วนแบบจำลองกายภาพ ได้พิจารณาค่าอัตราการไหลต้นแบบสูงสุดของน้ำที่ทำการทดลองเท่ากับ 1,750 ลบ.ม./วินาที กับอัตราการไหลในแบบจำลองสูงสุดของน้ำเท่ากับ 0.099 ลบ.ม./วินาที หามตราส่วนแบบจำลองจากสมการ $L_r = (Q_p/Q_m)^{2/5}$ แทนค่า $L_r = (1,750/0.099)^{2/5} = 49.99$ ดังนั้นในการทำการทดลองได้เลือกมาตราส่วน (model scale) ของแบบจำลองกายภาพเท่ากับ 50 : 1 (ต้นแบบ:แบบจำลอง)

4.1.2 การออกแบบอาคารระบายน้ำล้นชนิดรางเทและตัวเติมอากาศต้นแบบ เพื่อศึกษาการป้องกันความเสียหายจากควิเดชันโดยการเติมอากาศในรางเท ได้ทำการออกแบบอัตราการไหลสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยความกว้างผ่านสันอาคารระบายน้ำล้นเท่ากับ 70 ลบ.ม./วินาที/ม.

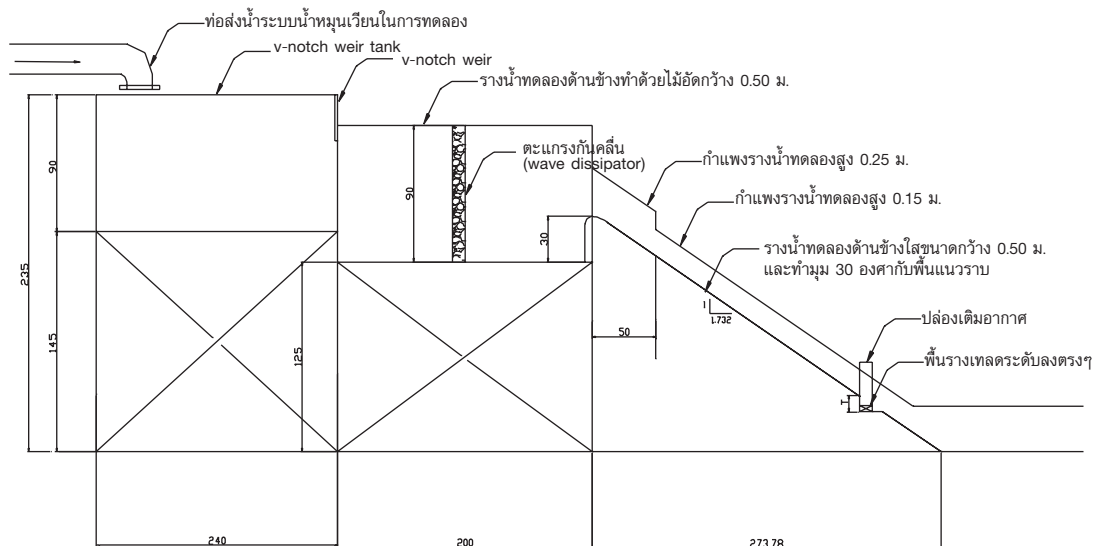
4.1.3 การกำหนดตำแหน่งของตัวเติมอากาศในรางเท ตำแหน่งของตัวเติมอากาศในรางเทพิจารณาจากค่าควิเดชันที่ต่ำกว่า 0.25 โดยการคำนวณค่าต่างๆ ทางชลศาสตร์ ได้แก่ ความเร็วของน้ำ ความลึกน้ำ ซึ่งคำนวณโดยวิธีขั้นบันไดมาตรฐานและนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาตรรกษณ์ควิเดชัน ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างตรรกษณ์ควิเดชันกับความเร็วเฉลี่ยจากการคำนวณเมื่อพื้นรางเรียบ ทำมุม 30 องศา กับพื้นแนวราบ ที่ระยะต่างๆ จากสันฝาย

4.2 การสร้างแบบจำลองกายภาพของรางเหล้าสำหรับอาคารระบายน้ำล้น ใช้มาตราส่วนย่อจากของจริง 1:50 ซึ่งเป็นมาตราส่วนที่เหมาะสม รูปร่างไม่บิดเบือน ทำด้วยพลาสติกและไม้อัดขัดเรียบทาสีน้ำมัน โดยแสดงรูปตัดตามยาวของแบบจำลอง ดังรูปที่ 2 โดยส่วนประกอบของแบบจำลองจะประกอบด้วย

4.2.1 ฝ่ายสามเหลี่ยม 90° V-notch weir สำหรับวัดน้ำ ซึ่งจะเป็นส่วนรับน้ำที่ล้นขึ้นมาแล้วผ่านกำแพงกันคลื่นเพื่อทำให้น้ำเกิดการไหลแบบราบเรียบ โดยมีฝายวัดน้ำรูป V-notch เป็นตัวควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านแบบจำลอง สร้างด้วยพลาสติกใส



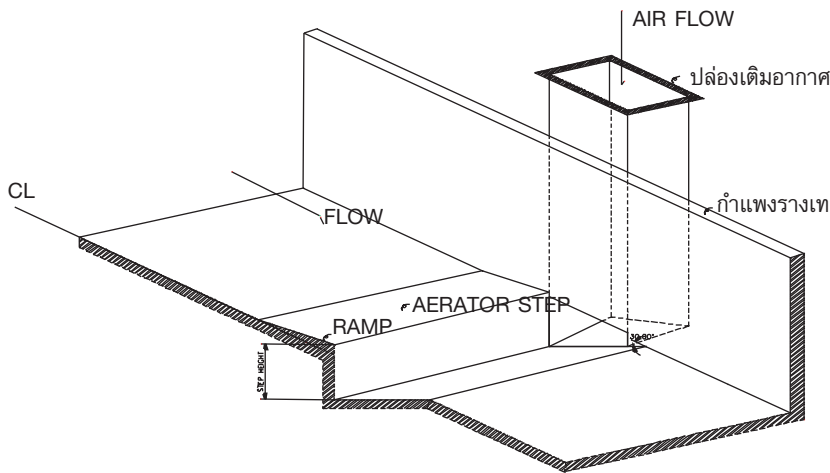
รูปที่ 2 รูปตัดตามยาวของแบบจำลองทางกายภาพและการติดตั้งเครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลองการเติมอากาศในรางเทอาาคารระบายน้ำล้น

4.2.2 รางลำเลียงน้ำ (flume) ลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาวเท่ากับ 4.8 เมตร กว้าง 0.50 เมตร ลึก 0.90 เมตร รับน้ำจากฝายวัดน้ำ โดยจะเป็นการจำลองลักษณะของอ่างเก็บน้ำ สร้างด้วยไม้อัด

4.2.3 ฝ่ายแบบสันมน (ogee crest) ลักษณะหน้าฝายตั้งตรง ความโค้งตามข้อกำหนดของมาตรฐาน Waterways Experimental Station สร้างด้วยไม้สักขัดมันทาสี

4.2.4 รางเทของอาคารระบายน้ำล้น (chute spillway) ขนาดกว้าง 0.5 เมตร ลึก 0.20 เมตรและความลาดเอียง 30 องศา พื้นรางสร้างด้วยไม้อัดขัดมันทาสีและกำแพงด้านข้างสร้างด้วยพลาสติกใส

4.2.5 อุปกรณ์เติมอากาศ ประกอบด้วยชั้นตัวเติมอากาศ และปล่องเติมอากาศด้านข้าง สร้างด้วยพลาสติกใส ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงรูปตัดตามยาวของตัวเติมอากาศ

4.3 การทดลองและการเก็บข้อมูลจากแบบจำลองกายภาพ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 พื้นรางเทเรียบและอาคารรางเทไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์การเติมอากาศ โดยทำการทดลอง 5 การทดลอง ได้แก่ การทดลองที่อัตราการไหลต้นแบบเท่ากับ 50, 55, 60, 65 และ 70 ลบ.ม./วินาที/ม.

กรณีที่ 2 รางเทมีการติดตั้งอุปกรณ์การเติมอากาศ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 กรณีย่อย คือ ชั้นของตัวเติมอากาศไม่มีทางลาดและชั้นของตัวเติมอากาศมีทางลาด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

กรณีที่ 2.1 ชั้นของตัวเติมอากาศที่พื้นรางเทไม่มีทางลาด โดยการทดลองติดตั้งอุปกรณ์เติมอากาศ ที่พื้นรางเท ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ชั้นของตัวเติมอากาศในแบบจำลองมีความสูงชั้น 2.4 ซม. และปล่องอากาศ ขนาด 2x1 ซม. ติดตั้งทั้งสองข้างบริเวณด้านนอกของรางเท โดยทำการทดลอง 5 การทดลอง ได้แก่ การทดลองที่อัตราการไหลต้นแบบเท่ากับ 50, 55, 60, 65 และ 70 ลบ.ม./วินาที/ม.

กรณีที่ 2.2 ชั้นของตัวเติมอากาศที่พื้นรางเทมีทางลาด โดยการทดลองติดตั้งอุปกรณ์เติมอากาศที่พื้นรางเทประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ชั้นของตัวเติมอากาศที่มีทางลาด โดยในแบบจำลองมีความสูงของชั้นของตัวเติมอากาศและทางลาดรวมกันเท่ากับ 6, 5, 4, 2.4 ซม. และปล่องอากาศ ติดตั้งทั้งสองข้างของกำแพงรางเทด้านนอก ซึ่งแต่ละข้างมีขนาดเท่ากับ 7x4.4, 7x3.3, 7x2.2, 7x1.1 ซม. และไม่มีปล่องอากาศ โดยการทดลองในแต่ละความสูงชั้นของ aerator step และในแต่ละขนาดปล่องอากาศ ทำการทดลอง 5 การทดลอง ได้แก่ การทดลองที่อัตราการไหลต้นแบบเท่ากับ 50, 55, 60, 65 และ 70 ลบ.ม./วินาที/ม. ซึ่งในแต่ละความสูงชั้นทำการทดลอง 25 การทดลอง และได้ทำการปรับขนาดปล่องอากาศ 5 ขนาด ดังนั้นการทดลองที่ความสูงชั้นของชั้นของตัวเติมอากาศ ทั้ง 4 ขนาด รวมเป็น 100 การทดลอง

การเก็บข้อมูลจากการทำการทดลองแบบจำลองได้ทำการวัดความลึกน้ำ ความดันน้ำ และความเร็วของน้ำ เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ของการเติมอากาศในรางเทของอาคารระบายน้ำล้น ดังนี้

1. เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าฟลูตนิมเบอร์กับอัตราส่วนของความกว้างช่องอากาศ ต่อความลึกน้ำ ด้านเหนือน้ำของชั้นของตัวเติมอากาศ ที่ความสูงชั้นต่างกัน
2. เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าควิตซ์กับอัตราส่วนของความสูงชั้น (aerator step) ต่อความลึกน้ำ ในรางเรียบ
3. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่ง หน่วยความกว้างรางเท (q_a/q) กับอัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้างรางเท (q) ที่ความสูงชั้นต่างกัน และขนาดปล่องอากาศต่างกัน
4. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่ง หน่วยความกว้างรางเท (q_a/q) กับอัตราส่วนของความกว้างช่องอากาศต่อความลึกน้ำ (L/h) ด้านเหนือน้ำของชั้น ของตัวเติมอากาศที่ความสูงชั้นต่างกัน
5. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างช่องอากาศ (jet length, L) กับเฮดความเร็วด้านเหนือน้ำ ของทางลาด (velocity head, $v^2/2g$) ที่ทางลาดทำมุม 8 องศา กับพื้นรางเท
6. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่ง หน่วยความกว้างรางเท (q_a/q) กับอัตราส่วนของพื้นที่ปล่องอากาศทั้งสองข้างรางเทต่อพื้นที่หน้าตัดการไหลของน้ำ (A_a/A_w) เมื่อความสูงชั้นต่างกัน

การเก็บข้อมูลจากแบบจำลองทางกายภาพมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

1. อุณหภูมิน้ำที่ทดลองอยู่ระหว่าง 25-27 °ซ
2. อัตราการไหลของน้ำผ่านอาคารระบายน้ำล้นชนิดรางเทกับอาคารระบายน้ำล้นชนิดชั้นบันได วัด จากฝ่ายสามเหลี่ยม 90° ที่มีสูตรคำนวณอัตราการไหลติดตั้งไว้ด้านต้นน้ำของรางทดลอง

3. ความลึกน้ำ ความดันน้ำที่พื้นราง ที่ตำแหน่งต่างๆ
4. ความกว้างช่องอากาศ (jet length) ที่ชั้นของตัวเติมอากาศ
5. ความเร็วเฉลี่ยของน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ วัดโดยใช้ pitot tube
6. เหนือรวมของน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ หาได้จาก

$$E = Z + y \cos(\theta) + (v^2/2g) \text{ โดย } \theta = \text{มุมลาดเอียงของอาคารระบายน้ำล้น}$$

7. Froude number ของน้ำ หาได้จาก $Fr = \frac{v}{\sqrt{gy}}$
8. ค่าความหนาชั้นขอบเขตการไหลหาได้จาก $\delta = 0.02 (k_s/H_s)^{0.10} x$
9. ค่าตรรกนิควิตซ์หาได้จาก $K_{y-d} = (P_{atm} + \gamma(y-\delta) \cos(\alpha) - P_v)/(\gamma U^2/2g)$

10. อัตราการไหลของอากาศ หาได้จาก $q_a = (e+h_d) V/2$ และ

$$e = \cos(\theta) \cdot \cos^2(\delta) (\tan(\theta) - \tan(\delta))^2 V^2 / (2g)$$

11. การเปลี่ยนค่าจากแบบจำลองเป็นค่าต้นแบบของแบบจำลองแบบไม่บิดเบือนหาได้จากมาตราส่วนแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 2

12. ทำการวัดข้อมูลการทดลองในรางเทที่ได้เปลี่ยนค่าจากแบบจำลองเป็นค่าต้นแบบที่ระดับต่าง ๆ

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนค่าจากแบบจำลองเป็นค่าต้นแบบของแบบจำลองแบบไม่บิดเบือน

ลักษณะ	ค่าต้นแบบ/ค่าแบบจำลอง	หมายเหตุ
ความยาว (L)	$L_r = L_p / L_m = 50$	P คือค่าต้นแบบ
พื้นที่ (A)	$A_r = A_p / A_m = 2500$	m คือค่าแบบจำลอง
เวลา (T)	$T_r = T_p / T_m = 50^{1/2} = 7.07$	L_r คือมาตราส่วนแบบจำลอง
ความเร็วกระแสน้ำ (V)	$V_r = V_p / V_m = 50^{1/2} = 7.07$	= ค่าต้นแบบ/ค่าแบบจำลอง
ความดัน (P)	$P_r = P_p / P_m = 50$	= $L_p / L_m = 50$
สัมประสิทธิ์ความขรุขระ (n)	$n_r = n_p / n_m = 50^{1/6} = 1.91$	
อัตราการไหลของน้ำ (Q)	$Q_r = Q_p / Q_m = 50^{2.5} = 17,677$	

5. ผลและวิจารณ์

ผลการศึกษาแบบจำลองทางชลศาสตร์การเติมอากาศในรางเทสำหรับอาคารระบายน้ำล้น โดยใช้มาตราส่วนของแบบจำลองต่อต้นแบบเท่ากับ 1:50 ทำการศึกษา 2 กรณี ได้ผลการศึกษาดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 กรณีศึกษา 2 กรณี ในแบบจำลองการเติมอากาศในรางเทสำหรับอาคารระบายน้ำล้น

กรณีศึกษาที่	ลักษณะรางเทในแบบจำลอง	ความสูงชั้นตัวเติมอากาศ (ซม.)	ขนาดปล่องอากาศในแบบจำลอง (ซม.)					ปิดปล่อง
			7x4.4	7x3.3	7x2.2	7x1.1	2x1	
1	พื้นรางเทเรียบและทำมุม 30 องศา	-	-	-	-	-	-	-
2	รางเทมี aerator	2.4	-	-	-	-	/	-
2.1	ชั้นตัวเติมอากาศ ไม่มีทางลาด	6	/	/	/	/	/	/
2.2	ชั้นตัวเติมอากาศ มีทางลาด	5	/	/	/	/	/	/
		4	/	/	/	/	/	/
		2.4	/	/	/	/	/	/

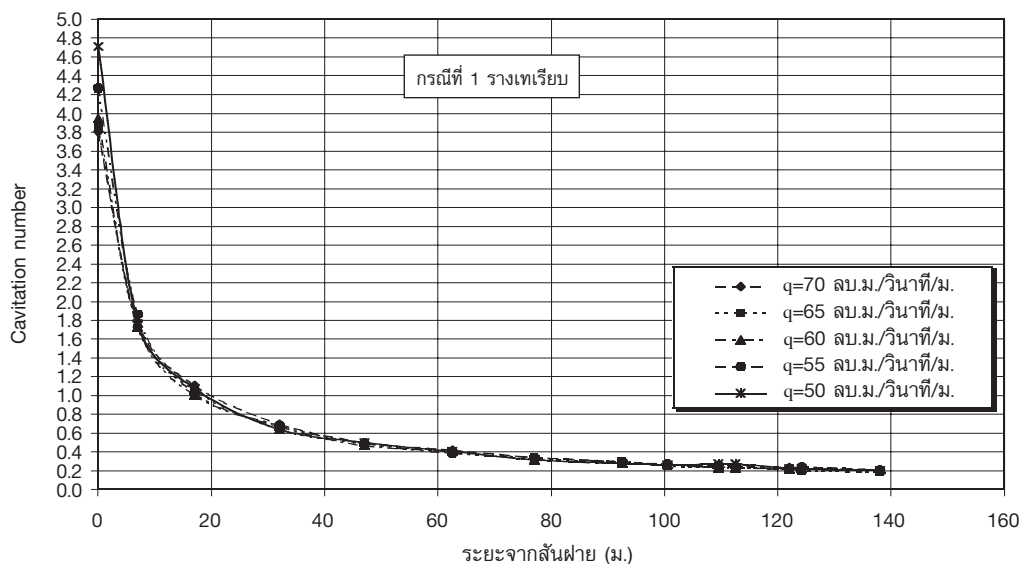
หมายเหตุ สัญลักษณ์ - คือไม่มีการทดลอง และ / คือทำการทดลองที่อัตราการไหลต้นแบบต่อหนึ่งหน่วยความกว้างเท่ากับ 50, 55, 60, 65, 70 ลบ.ม./วินาที/ม.

5.1 ผลการศึกษากรณีศึกษาที่ 1

ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 1 ได้เปลี่ยนเป็นค่าต้นแบบและได้วิเคราะห์หาค่าครรชนีคาวิตेशन ตามความยาวของรางเทที่ระยะต่างๆ จากสันฝาย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 และรูปที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณค่าครรชนีคาวิตेशन กรณีศึกษาที่ 1 ในอาคารระบายน้ำล้นแบบรางเท ที่ระยะห่างจากสันฝายต้นแบบ 122 เมตร

อัตราการไหลต่อ หนึ่งหน่วย ความกว้าง (q) (ลบ.ม./วินาที/ม.)	ความสูงน้ำ เหนือ สันฝาย (ม.)	ความเร็วจากการ คำนวณโดยวิธีชั้น บันไดมาตรฐาน (V_T) (ม./วินาที)	ความเร็วจริงใน กรณีศึกษาที่ 1 (V_A) (ม./วินาที)	อัตราส่วนของ ความเร็ว (V_A/V_T)	ความ ลึกน้ำ (h) (ม.)	ครรชนี คาวิตेशन ($K_{y-\delta}$)
50	6.25	35.80	30.30	0.85	1.65	0.23
55	6.50	36.00	31.43	0.87	1.75	0.22
60	6.77	36.19	42.43	0.89	1.85	0.20
65	7.17	36.35	30.95	0.85	2.10	0.23
70	7.58	36.51	31.11	0.85	2.25	0.23



รูปที่ 4 ค่าครรชนีคาวิตेशन กรณีที่ 1 พื้นรางเทเรียบ ที่ระยะต่างๆ จากสันฝาย เมื่ออัตราการไหลของน้ำในรางต่างกัน

จากตารางที่ 3 ค่าความเร็วจากการคำนวณ (V_T) มีค่าใกล้เคียงกับความเร็วจริง (V_A) ซึ่งมีความเร็วมากกว่า 30 ม./วินาที ค่าคาวิตेशनมีค่าต่ำกว่า 0.25 จากข้อกำหนดต้องป้องกันพื้นผิวการไหลโดยออกแบบโดยใช้กลไกการอัดด้วยอากาศและค่าคาวิตेशनที่ระยะห่างจากสันฝาย 122 ม. อยู่ในช่วง 0.20-0.23 แสดงว่ารางเทจำเป็นต้องมีการป้องกันความเสียหายจากการเกิดคาวิตेशनโดยการเติมอากาศ และจากรูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า

ควาวิตะชันในรางเทเมื่ออัตราการไหลต้นแบบต่อหนึ่งหน่วยความกว้างเท่ากับ 50, 55, 60, 65 และ 70 ลบ.ม./วินาที/ม. จากกราฟเมื่อระยะห่างจากสันฝายเพิ่มขึ้นค่าควาวิตะชันมีค่าลดลง และที่ระยะห่างจากสันฝายมากกว่า 122 ม. ค่าควาวิตะชันมีค่าต่ำกว่า 0.2

5.2 ผลการศึกษากรณีศึกษาที่ 2

ผลการศึกษากรณีศึกษาที่ 2.1 ทำการติดตั้งตัวเต็มอากาศในรางเทประกอบด้วย ปล่องอากาศและชั้นตัวเต็มอากาศที่ไม่มี ramp สูง 2.4 ซม. จากผลการทดลองได้เปลี่ยนเป็นค่าต้นแบบและวิเคราะห์หาค่าดรชนีควาวิตะชันตามความยาวของรางเทที่ระยะต่างๆ จากสันฝาย ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 5

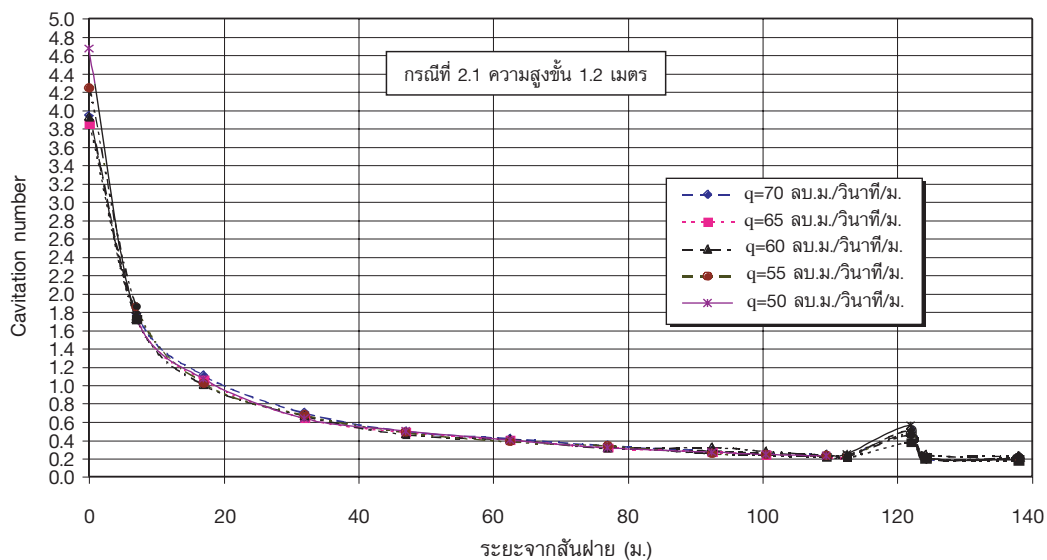
จากตารางที่ 5 และรูปที่ 5 เมื่อความสูงชั้นของตัวเต็มอากาศสูง 1.2 ม. ขนาดปล่องอากาศ 1x0.5 ม. ระยะห่างจากสันฝายเพิ่มดรชนีควาวิตะชันมีค่าลดลงและในตำแหน่งที่ติดตั้งตัวเต็มอากาศที่ระยะห่างจากสันฝาย 122 ม. ดรชนีควาวิตะชันมีค่ามากกว่า 0.25 ที่ตำแหน่งด้านเหนือหน้าและท้ายน้ำของตัวเต็มอากาศยังเกิดควาวิตะชันเนื่องจากค่าดรชนีควาวิตะชันที่ต่ำกว่า 0.25 จากการทดลองเมื่อน้ำในรางเทไหลผ่านชั้นตัวเต็มอากาศไม่เกิดช่องว่างใต้แผ่นน้ำเนื่องจากการเต็มอากาศไม่เพียงพอและรูปร่างของชั้นตัวเต็มอากาศที่ไม่ทำให้น้ำพุ่งไปถึงระยะที่ต้องการเต็มอากาศจึงไม่สามารถวัดความยาวพวยน้ำที่ด้านหน้าของชั้นตัวเต็มอากาศได้

ตารางที่ 5 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลองกรณีที่ 2.1 ติดตั้งตัวเต็มอากาศที่ไม่มีทางลาดความสูงชั้น 2.4 ซม. เมื่ออัตราการไหลของน้ำในรางเทต่างๆ กัน

อัตราการไหลต่อ หนึ่งหน่วย ความกว้าง (q) (ลบ.ม./วินาที/ม.)	ระยะห่าง จาก สันฝาย (x) (ม.)	ความลึก น้ำ (h) (ม.)	ความดันน้ำ ที่พื้นรางเท (p/γ) (ม.)	ความเร็ว เฉลี่ย (V _w) (ม./วินาที)	ดรชนี ควาวิตะชัน (K _{y-d})	หมายเหตุ
70	112.5	2.22	4.20	31.58	0.22	ตำแหน่งชั้นตัวเต็ม อากาศ
	122	3.40	2.70	20.59	0.57	
	124.2	2.13	3.05	32.81	0.20	
65	138	2.15	2.65	32.56	0.21	ตำแหน่งชั้นตัวเต็ม อากาศ
	112.5	2.02	4.05	32.23	0.21	
	122.0	2.65	2.65	24.53	0.38	
60	124.2	2.02	2.85	32.23	0.21	ตำแหน่งชั้นตัวเต็ม อากาศ
	138.0	1.92	2.55	33.91	0.19	
	112.5	2.02	4.00	29.75	0.25	
	122.0	2.75	2.45	21.82	0.48	
	124.2	2.02	2.60	29.75	0.25	ตำแหน่งชั้นตัวเต็ม อากาศ
	138.0	1.97	2.45	30.51	0.23	

ตารางที่ 5 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลองกรณีที่ 2.1 ติดตั้งตัวเติมอากาศที่ไม่มีทางลาดความสูงชั้น 2.4 ซม. เมื่ออัตราการไหลของน้ำในรางแตกต่างกัน (ต่อ)

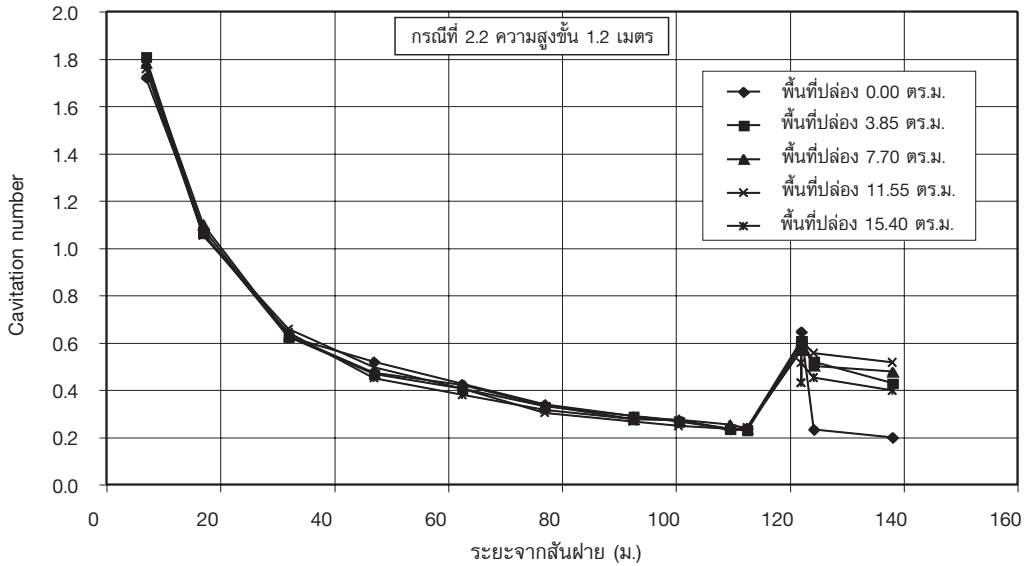
อัตราการไหลต่อ หนึ่งหน่วย ความกว้าง (q) (ลบ.ม./วินาที/ม.)	ระยะห่าง จาก สันฝาย (x) (ม.)	ความลึก น้ำ (h) (ม.)	ความดันน้ำ ที่พื้นรางเท (p/γ) (ม.)	ความเร็ว เฉลี่ย (V _w) (ม./วินาที)	ครรชนี ควาเวตชัน (K _{y-δ})	หมายเหตุ
55	112.5	1.80	4.00	30.56	0.23	ตำแหน่งชั้นตัวเติม อากาศ
	122.0	2.50	2.30	22.00	0.47	
	124.2	1.73	2.50	31.73	0.21	
	138.0	1.73	2.50	31.73	0.21	
50	112.5	1.70	3.90	29.41	0.25	ตำแหน่งชั้นตัวเติม อากาศ
	122.0	2.50	2.15	20.00	0.56	
	124.2	1.60	2.40	31.25	0.22	
	138	1.50	2.45	33.33	0.19	



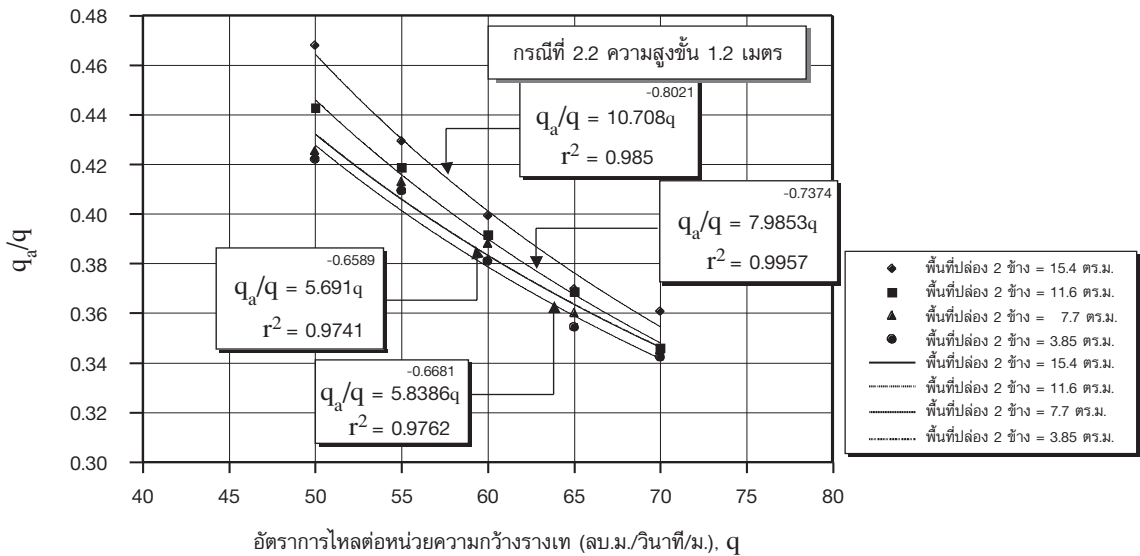
รูปที่ 5 ค่าครรชนีควาเวตชัน กรณีที่ 2.1 ความสูงชั้น 1.2 ม.ตัวเติมอากาศไม่มีทางลาด ที่ระยะต่างๆ จากสันฝายที่อัตราการไหลต่างๆ

ผลการศึกษาระณีศึกษาที่ 2.2 ได้ทำการติดตั้งตัวเติมอากาศในแบบจำลองรางเทประกอบด้วย ปล่องอากาศ และชั้นตัวเติมอากาศที่มีทางลาดทำมุม 8 องศา กับพื้นรางเท โดยความสูงชั้นตัวเติมอากาศและทางลาดเท่ากับ 6, 5, 4 และ 2.4 ซม. โดยอัตราส่วนความสูงชั้นของตัวเติมอากาศต่อความลึกน้ำในรางเรียบ (t/h₁) เท่ากับ 1.5, 1.3, 1.0 และ 0.60 ซึ่งในแต่ละความสูงทำการทดลองกับปล่องอากาศขนาด 7x4.4, 7x3.3, 7x2.2, 7x1.1 และปิดปล่องอากาศ

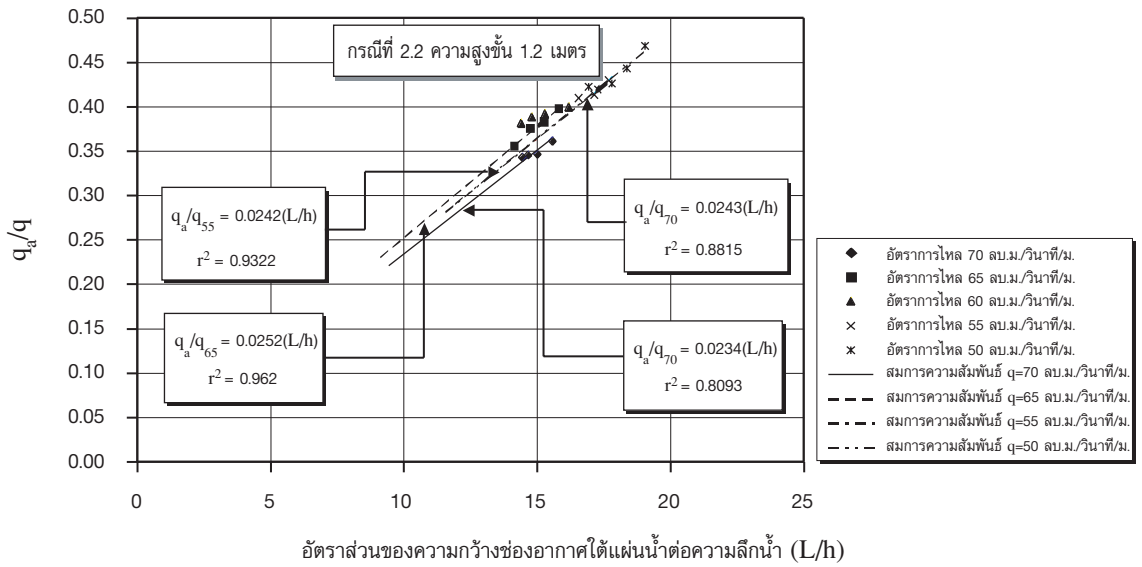
จากผลการทดลองและการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ด้านชลศาสตร์และสร้างกราฟหาสมการความสัมพันธ์ทางชลศาสตร์ของตัวเต็มอากาศที่มีอัตราส่วนความสูงชั้นของตัวเต็มอากาศ ต่อความลึกน้ำในรางเรียบ (t/h_f) เท่ากับ 1.5, 1.3, 1.0 และ 0.60 พบว่าอัตราส่วน t/h_f เท่ากับ 0.60 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 6



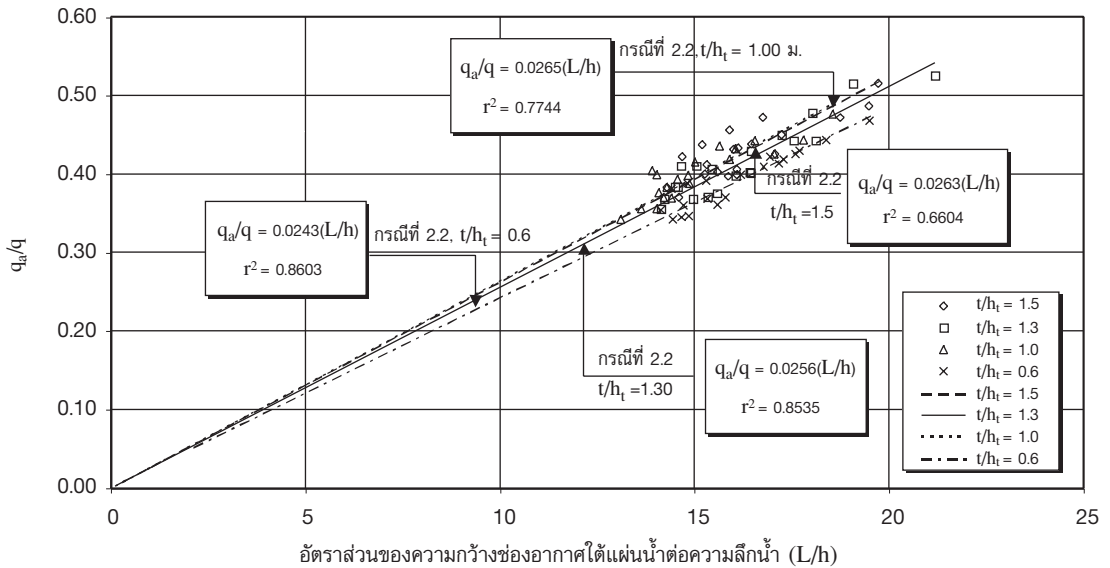
รูปที่ 6 ค่าครรชนีควิเดชัน กรณีที่ 2.2 ความสูงชั้น 1.2 ม.ที่ระยะต่างๆ จากสันฝาย เมื่ออัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง 70 ลบ.ม./วินาที/ม.



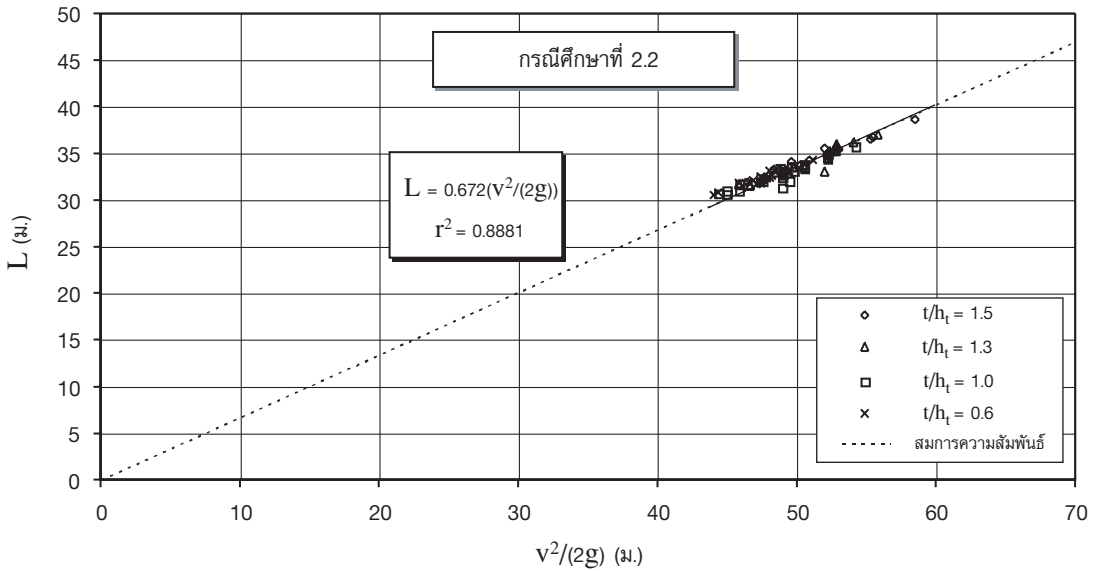
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำ ต่อหนึ่งหน่วยความกว้างรางเท (q_a/q) กับอัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้างรางเท (q) ที่ความสูงชั้น 1.20 เมตร และพื้นที่เปิดปล่องเต็มอากาศต่างกัน



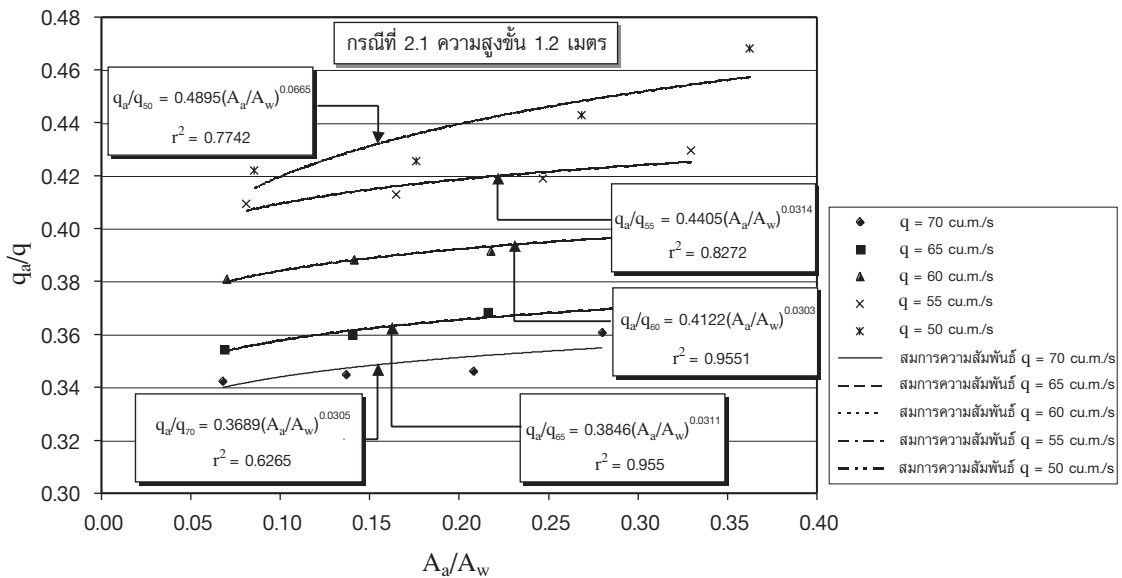
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำ ต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (q_a/q) กับอัตราส่วนของความกว้างช่องอากาศต่อความลึกน้ำ (L/h) ที่ความสูงชั้น 1.20 เมตร เมื่อพื้นที่เปิดปล่องเติมอากาศและอัตราการไหลของน้ำในรางต่างกัน



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำ ต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (q_a/q) กับอัตราส่วนของความกว้างช่องอากาศต่อความลึกน้ำ (L/h) เมื่ออัตราส่วน t/h_1 เท่ากับ 1.5, 1.3, 1.0, 0.6 พื้นที่เปิดปล่องเติมอากาศและอัตราการไหลของน้ำในรางต่างกัน



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างช่องอากาศใต้แผ่นน้ำ (jet length, L) กับเฮดความเร็ว ด้านเหนือน้ำของทางลาด (velocity head, $v^2/2g$) ที่ ramp ทำมุม 8 องศา กับพื้นรางเท เมื่อความสูงชั้น พื้นที่เปิดปล่อยเติมอากาศ และอัตราการไหลของน้ำในรางต่างกัน



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำ ต่อหนึ่งหน่วยความกว้างรางเท (q_a/q) กับอัตราการไหลของพื้นที่ปล่อยอากาศทั้ง 2 ข้าง ของรางเทต่อพื้นที่หน้าตัดการไหลของน้ำ (A_a/A_w) เมื่อความสูงชั้น 1.20 เมตร และอัตราการไหลของน้ำในรางแตกต่างกัน

ถึง 11

6. บทสรุป

1. จากการทดสอบการไหลในรางเทที่อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้างรางเทมีค่า 50 ถึง 70 ลบ.ม./วินาที/ม. พบว่าค่าดรรชนีควิตซ์ที่ระยะห่างจากสันฝาย 122 เมตร มีค่าต่ำลงจนถึง 0.20 - 0.23 ซึ่งจำเป็นต้องมีการป้องกันความเสียหายของพื้นผิวรางเท

2. ผลการวิเคราะห์เมื่ออัตราส่วนความสูงชั้นของตัวเติมอากาศต่อความลึกน้ำในรางเรียบ (t/h_1) ต่างกัน จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟรูดนัมเบอร์ (Fr) กับอัตราส่วนความกว้างช่องอากาศใต้แผ่นน้ำต่อความลึกน้ำด้านเหนือน้ำของชั้นตัวเติมอากาศ (L/h) และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (q_a/q) กับอัตราส่วนความกว้างช่องอากาศใต้แผ่นน้ำต่อความลึกน้ำด้านเหนือน้ำของชั้นตัวเติมอากาศ (L/h) ซึ่งสามารถแสดงได้โดยสมการดังนี้

$$\text{เมื่อ } t/h_1 = 1.5 \text{ สมการความสัมพันธ์ } Fr = 1.989(L/h)^{0.4493}, \quad q_a/q = 0.0263(L/h) \quad (2)$$

$$t/h_1 = 1.3 \text{ สมการความสัมพันธ์ } Fr = 1.753(L/h)^{0.496}, \quad q_a/q = 0.0256(L/h) \quad (3)$$

$$t/h_1 = 1 \text{ สมการความสัมพันธ์ } Fr = 2.0925(L/h)^{0.4295}, \quad q_a/q = 0.0265(L/h) \quad (4)$$

$$t/h_1 = 0.6 \text{ สมการความสัมพันธ์ } Fr = 2.0331(L/h)^{0.4388}, \quad q_a/q = 0.0243(L/h) \quad (5)$$

3. ผลการวิเคราะห์เมื่อ t/h_1 มีค่า 0.6 ถึง 1.5 และอัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้างไม่เกิน 70 ลบ.ม./วินาที/ม. พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (q_a/q) กับอัตราส่วนความยาว jet ต่อความลึกน้ำด้านเหนือน้ำของชั้นตัวเติมอากาศ (L/h) แสดงได้ในรูปของสมการ

$$q_a/q = 0.0257(L/h) \quad (6)$$

4. ผลการวิเคราะห์เมื่อทางลาดทำมุม 8 องศากับพื้นรางเทและอัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้างไม่เกิน 70 ลบ.ม./วินาที/ม. พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างช่องอากาศใต้แผ่นน้ำกับหัวน้ำความเร็ว ด้านเหนือน้ำของชั้นตัวเติมอากาศแสดงได้ในรูปของสมการ

$$L = 0.672 (V^2/2g) \quad (7)$$

5. ผลการวิเคราะห์เมื่อ t/h_1 มีค่า 0.6 ถึง 1.5 และอัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้างไม่เกิน 70 ลบ.ม./วินาที/ม. พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (q_a/q) กับอัตราส่วนพื้นที่ปล่อยอากาศทั้งสองข้างรางเทต่อพื้นที่หน้าตัดการไหลของน้ำด้านเหนือน้ำของชั้นตัวเติมอากาศแสดงได้ในรูปของสมการดังนี้

$$\text{เมื่อ } t/h_1 = 1.5, \quad q_a/q = 0.556 (A_a/A_w)^{0.0883} \quad (8)$$

$$t/h_t = 1.3, q_a/q = 0.5945 (A_a/A_w)^{0.131} \quad (9)$$

$$t/h_t = 1, q_a/q = 0.5003 (A_a/A_w)^{0.0715} \quad (10)$$

$$t/h_t = 0.6, q_a/q = 0.4895 (A_a/A_w)^{0.0665} \quad (11)$$

6. ผลการศึกษาดังกล่าวสรุปภาพรวมของตัวเต็มอากาศที่เหมาะสมสำหรับรางเทที่ทำมุม 30 องศา กับพื้นแนวราบ ที่มีอัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้างไม่เกิน 70 ลบ.ม./วินาที/ม. และทางลาดทำมุม 8 องศา กับพื้นรางเท ควรใช้อัตราส่วนความสูงชั้นตัวเต็มอากาศต่อความลึกน้ำในรางเรียบ (t/h_t) เท่ากับ 0.60 โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (q_a/q) กับอัตราส่วนความกว้างช่องอากาศใต้แผ่นน้ำต่อความลึกน้ำ (L/h) อยู่ในรูปของสมการ $q_a/q = 0.0243(L/h)$ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างช่องอากาศใต้แผ่นน้ำกับหัวน้ำความเร็วด้านเหนือน้ำของตัวเต็มอากาศ อยู่ในรูปของสมการ $L = 0.672(v^2/2g)$ และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (q_a/q) กับอัตราส่วนพื้นที่ปล่องอากาศทั้งสองข้างรางเทต่อพื้นที่หน้าตัดการไหลของน้ำด้านเหนือน้ำของตัวเต็มอากาศ (A_a/A_w) อยู่ในรูปของสมการ $q_a/q = 0.4895(A_a/A_w)^{0.0665}$ ซึ่งความสัมพันธ์ในรูปของสมการดังกล่าวนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบได้ต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

1. Pinto, N. L. de S., and Neidert, S. H., 1982, "Aeration at High Velocity Flows", *Water Power and Dam Construction*, Vol. 34, No. 2, pp. 33-38, Vol. 34, No. 3, pp. 42-44.
2. Falvey, H. T., 1982, "Prediction Cavitation in Tunnel Spillways", *Water Power and Dam Construction*, Wilmington Publishing Ltd.
3. Gal'perin, R. S., 1971, "Cavitation in Elements of Hydraulic Structures and Methods of Controlling It." *Hydrotechnical Construction*, Kluwer Academic Publishers.
4. Falvey, H. T., 1990, "Cavitation in Chutes and Spillways, Engineering, Monograph 42", *Water Resources Technical Publication*, US Printing Office, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, USA.