

รายการอ้างอิง

รายการอ้างอิงภาษาไทย

- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. บัณฑิตวิทยาลัย. (2546). คู่มือการพิมพ์วิทยานิพนธ์. กรุงเทพมหานคร. โชติกร แดงประไพ. (2547). การไหลของตะกอนผ่านฝายสันหยัก. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธรรมวัฒน์ การุณธกุล. (2541). การกัดเซาะรอบตอม่อสะพานที่เรียงเป็นตับ. วิทยานิพนธ์ ปริญญา มหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- นัฐวุฒิ พัดไธสง. (2006). การกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มภายใต้คลื่นและกระแสน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรมงคล ชิดชอบ. (2540). การกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สถาพร คูวิจิตรจารุ. (2541). ทดลองปฐพีกลศาสตร์. กรุงเทพมหานคร : ไลบรารี นาย.
- สมรักษ์ ต่ดวงศ์ไพชยนต์. (2527). การกัดเซาะของน้ำต่อโครงสร้างสะพานและท่อ. วิทยานิพนธ์ ปริญญา มหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- เอกนันท์ ตั้งธีระสุนันท์. (2544). ผลของความขรุขระของผิวตอม่อสะพานต่อหลุมกัดเซาะ. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รายการอ้างอิงภาษาอังกฤษ

- Ashtiani, B.A. and Beheshti, A.A. (2006). Experimental Investigation of Clear-Water Local Scour at Pile Groups. Journal of Hydraulic Engineering. 132, 10:1100-1104.
- Bozkus, Z. and Yildiz, O. (2004). Effects of Inclination of Bridge Piers on Scouring Depth. Journal of Hydraulic Engineering. 130, 8:827-832.
- Breusers, H.N.C., Nicollet, G. and Shen H.W. (1977). Local Scour Around Cylindrical Piers. Journal of Hydraulic Research. 15, 3:211-252.

- Breusers, H.N.C. and Raudkivi, A.J. (1991). Scouring. Design Manual. No.2. International Association for Hydraulic Research. Balkema.
- Chang, Sin Zee. (1987). The Area of Scour Hole Around Bridge Piers. Master's Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Chiew, Y.M. (1992). Scour Protection at Bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering. 118, 9:1260-1269.
- Chiew, Y.M. (1995). Mechanics of Riprap Failure at Bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering. 121, 9:635-643.
- Chiew, Y.M. (2004). Local Scour and Riprap Stability at Bridge Piers in a Degrading Channel. Journal of Hydraulic Engineering. 130, 3:218-226.
- Chiew, Y.M., and Lim, F.H. (2000). Failure Behavior of Riprap Layer at Bridge Piers under Live-Bed Conditions. Journal of Hydraulic Engineering. 126, 1:43-55.
- Coleman, S.E. (2005). Clearwater Local Scour at Complex Piers. Journal of Hydraulic Engineering. 131, 4:330-334.
- Dey, S., and Raikar, R.V. (2007). Clear- water Scour at Piers in Sand Beds with an Armor Layer of Gravels. Journal of Hydraulic Engineering. 133, 6:703-711.
- Dey, S., Raikar, R.V., and Roy, A. (2008). Scour at Submerged Cylindrical Obstacles Under Steady Flow. Journal of Hydraulic Engineering. 134, 1:105
- Dey, S., Sumer, B.M. and Fredsoe, J. (2006). Control of Scour at Circular Piles under Wave and Current. Journal of Hydraulic Engineering. 132, 3:270-279.
- Francis et al. (2001). Flume Test for Scour in Clay at Circular Piers. Journal of Hydraulic Engineering. 127, 11:969-978.
- Hamill (1999). Bridge Hydraulics. London : E&F Spon.
- Hannah, C.R. (1978). Scour at pile groups. Research Rep. No.28-3. Civil Engineering Dept. Univ. of Canterbury. Christchurch. New Zealand.
- Jain, S.C. (1981). Maximum Clear-Water Scour Around Circular Piers. Journal of Hydraulic Engineering. 107, 5:611-626.
- Johnson, P.A. (1995). Comparison of Pier-Scour Equations Using Field Data. Journal of Hydraulic Engineering. 121, 8:626-629.

- Jones, J.S. and Sheppard, M.D. (1998). Local Scour at Complex Pier Geometries. ASCE Water Resources Engineering Conference. United States.
- Lauchlan, C.S., and Melville, B.W. (2001). Riprap Protection at Bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering. 127, 5:412.
- Laursen, E.M. (1952). Observation on The Nature Scour. Proceedings of Fifth Hydraulic Conference. Bulletin 34, University of Iowa, 179:197.
- Laursen, E.M. and Toch, A. (1956). Scour around bridge piers and abutments. Bull. No. 4. Iowa Hwy. Res. Board. Ames. Iowa.
- Melville, B.W. (1984). Live-Bed Scour at Bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering. 110, 9:1234-1247.
- Melville, B.W. (1997). Pier and Abutment Scour : Integrated Approach. Journal of Hydraulic Engineering. 123, 2:125-136.
- Melville, B.W. and Chiew, Y.M. (1999). Time Scale for Local Scour at Bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering. 125, 1:59
- Melville, B.W. and Dongol, D.M. (1992). Bridge Pier Scour with Derris Accumulation. Journal of Hydraulic Engineering. 118, 9:1306
- Melville, B.W. and Raudkivi, A.J. (1996). Effect of Foundation Geometry on Bridge Pier Scour. Journal of Hydraulic Engineering. 122, 4:203-209.
- Melville, B.W. and Sutherland, A.J. (1988). Design Method for Local Scour at Bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering. 114, 10:1210-1226.
- Raudkivi, A.J. (1976). Loose Boundary Hydraulics. 2nd ed. Great Britain: A.Wheaton & Co. Exeter.
- Raudkivi, A.J. (1986). Functional Trends of Scour at Bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering. 112, 6:1
- Raudkivi, A.J. and Ettema, R. (1983). Clear-Water Scour at Cylindrical Piers. Journal of Hydraulic Engineering. 109, 3:338-350.
- Raudkivi, A.J. and Sutherland, A.J. (1981). Scour at Bridge Crossings. Wellington New Zealand: National Road Board.

- Richardson, E.V. et Al. (1995). Evaluating Scour at Bridges. 3 rd ed. HEC 18 FHWA NHI -001, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington. D.C.
- Richardson, E.V. et Al. (2001). Evaluating Scour at Bridges. 4 th ed. HEC 18 FHWA NHI -001, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington. D.C.
- Salim. and Jones (1999). Scour Around Exposed Pile Foundations. ASCE North American Water and Environment Conference : 335-346.
- Shen, H.W. (1971). Scour Near Piers. River Mechanics. Vol.2, Chap. 23, Ft. Collins, Colo.
- Sheppard, D.M. (2004). Large Scale Clear-Water Local Pier Scour Experiments. Journal of Hydraulic Engineering. 130, 10:957-963.
- Simons, Daryl B. and Sentürk. (1977). Sediment Transport Technology. Water Resource Publications, Fort Collins, Colorado, USA.
- Sumer, B.M. and Fredsøe, J. (1998). Wave scour around a group of vertical piles. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 124,5 : 248-256
- Sumer, B.M., Hatipoglu, F. and Fredsøe, J. (2007). Wave Scour around a Pile in Sand, Medium Dense, and Dense Silt. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 133, 1:14.
- Vanoni, V.A. (1975). Sedimentation Engineering. ASCE., New York, USA
- Vittal, N., Kothiyari, U.C. and Haghghat, M. (1994). Clear-Water Scour Around Bridge Pier Group. Journal of Hydraulic Engineering. 120, 11:338-350.
- Zarrati, A.R., Nazariha, M. and Marshahir, M.B. (2006). Reduction of Local Scour in the Vicinity of Bridge Pier Group Using Collars and Riprap. Journal of Hydraulic Engineering. 132, 2:154-162.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก แบบจำลองชลศาสตร์การกัดเซาะรอบเสาเข็มเอียง

ภาคผนวก ข การหาค่าเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ค การหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล

ภาคผนวก ง ภาพถ่ายผลการศึกษาในกรณีศึกษาต่างๆ

ภาคผนวก จ สรุปผลการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับปัญหาการกัดเซาะรอบโครงสร้าง
ฐานรากของอาคารชลศาสตร์

ภาคผนวก ช สรุปสัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ภาคผนวก ก

แบบจำลองศาสตร์การกัดเซาะรอบเสาเข็มเอียง

ภาคผนวก ก

แบบจำลองชลศาสตร์การกักเซาะรอบเสาเข็มเอียง

ก-1 การจัดเตรียมแบบจำลองทางชลศาสตร์

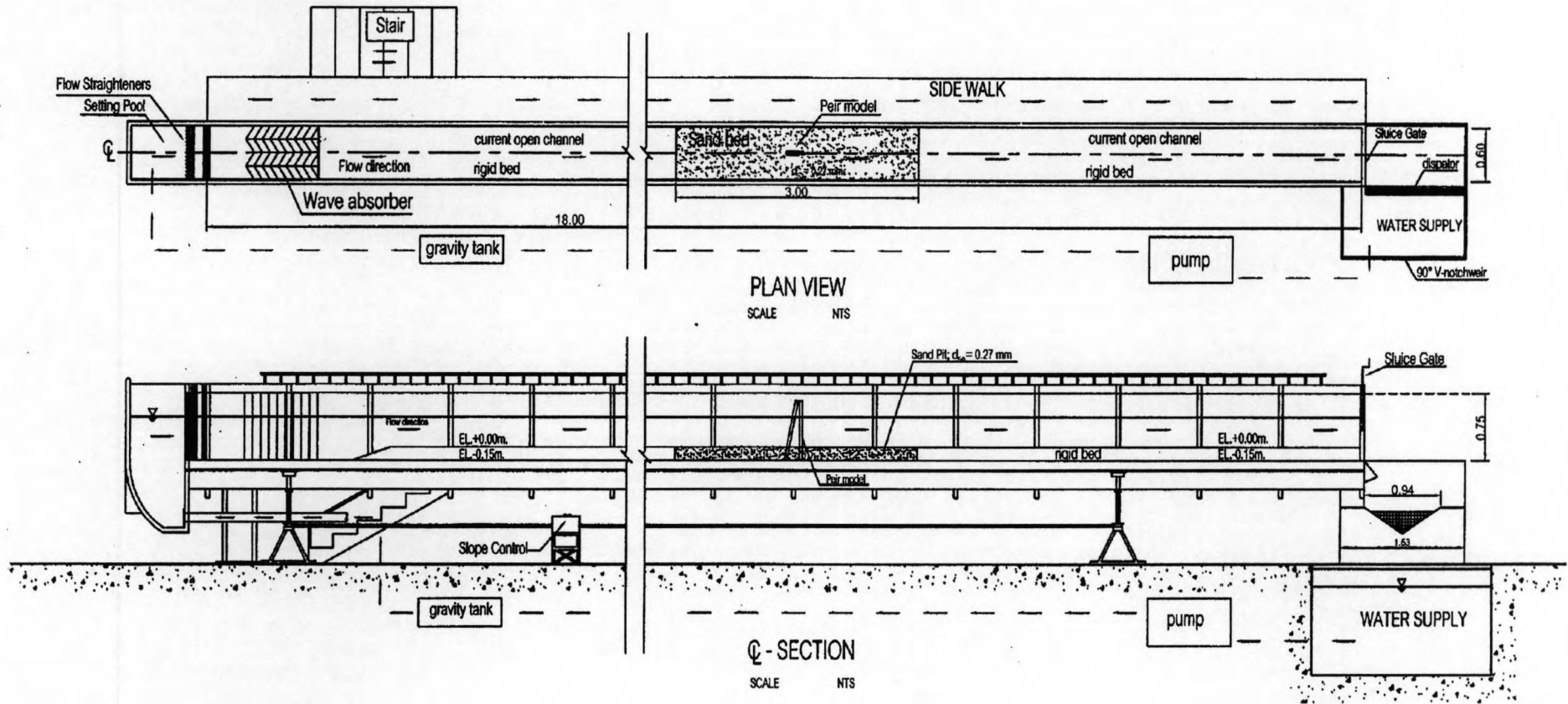
1) แบบจำลองกระแสน้ำ จำลองการไหลในรางน้ำเปิด หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความยาว 18.0 ม. กว้าง 0.60 ม. และสูง 0.75 ม. ผนังด้านข้างเป็นกระจกใสหนา 1.20 ซม. พื้นรางเป็นเหล็กหนา 6 มม. ความลาดเอียงของท้องรางน้ำสามารถปรับได้โดยใช้แม่แรงยกซึ่งหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ดังรูป ก-1

2) วัสดุที่ใช้จำลองสภาพท้องน้ำจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นวัสดุที่ไม่มีการกักเซาะ (rigid bed or false floor) ใช้แผ่นอะคริลิกปูยาวตลอดรางน้ำยกเว้นส่วนตอนกลางของรางน้ำโดยยกสูงกว่าท้องน้ำเดิมของรางประมาณ 15 ซม. แล้ววาดผิวหน้าด้วยทรายขนาดเดียวกับที่ใช้ทดลอง เพื่อจำลองสภาพท้องน้ำให้มีความสม่ำเสมอ และใช้ทรายละเอียดขนาดเฉลี่ย (d_{50}) 0.27 มม. ปูยาว 3 ม. ในระนาบเดียวกับพื้นวัสดุที่ไม่มีการกักเซาะเพื่อใช้ศึกษาและทดลองการกักเซาะดังรูป ก-2

3) ประตูควบคุมระดับน้ำที่ปลายรางน้ำแบบบานยก (sluice gate) มีขนาดกว้าง 0.66 ม. สูง 0.76 ม. บานประตูทำด้วยเหล็กหนา 5 มม. ติดตั้งที่ปลายสุดของรางน้ำ ทำหน้าที่ควบคุมความลึกการไหลของน้ำขณะทำการทดลองเพื่อกำหนดให้สภาพการไหลเป็นการไหลแบบต่ำกว่าวิกฤต (subcritical flow) ดังรูป ก-3

4) ตะแกรง (screens) ทำจากไม้ระแนง และตะแกรงลดคลื่น (wave suppressors) ทำจากเหล็กข้ออ้อยซึ่งด้วยลวดตาข่าย ติดตั้งบริเวณบ่อพักน้ำด้านต้นน้ำ เพื่อลดขนาดของคลื่นและความรุนแรงของกระแสน้ำก่อนเข้าสู่รางน้ำ ดังรูป ก-4

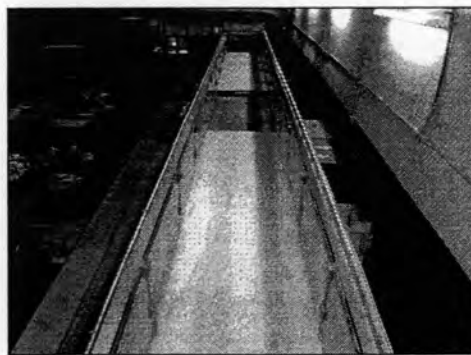
5) ระบบหมุนเวียนน้ำ ประกอบด้วย ถังเก็บน้ำ (constants head tank) ความจุ 30 ลูกบาศก์เมตร บนชั้นดาดฟ้าของตึกที่ทำการทดลอง (ตึกวิศวกรรม 5) ซึ่งมีความสูงจากรางน้ำประมาณ 30 ม. เครื่องสูบน้ำขนาด 25 แรงม้า จำนวน 4 เครื่อง แต่ละเครื่องสูบน้ำสูงสุดได้ 25 ลิตรต่อวินาที การหมุนเวียนน้ำเริ่มจากการปล่อยน้ำจากถังเก็บน้ำผ่านท่อเหล็กกล้า ผ่านวาล์วควบคุมการเปิด-ปิด จนถึงบ่อพักด้านต้นน้ำ น้ำจะไหลผ่านรางลงสู่บ่อพักน้ำ (sump) และถูกสูบกลับไปสู่ถังเก็บน้ำโดยเครื่องสูบน้ำอีกครั้ง ดังรูป ก-5 และ รูป ก-6



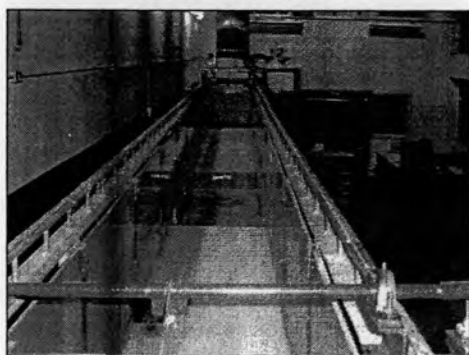
รูป ก-1 รายละเอียดแบบจำลองชลศาสตร์กระแสน้ำ



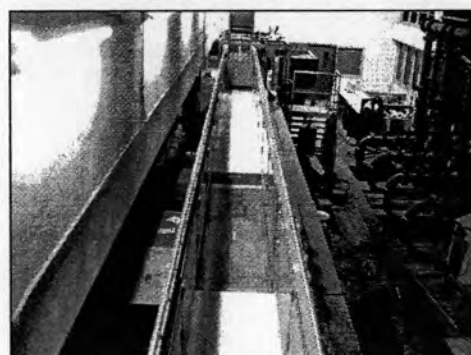
ก) มองจากต้นรางน้ำ



ข) มองจากต้นรางน้ำ

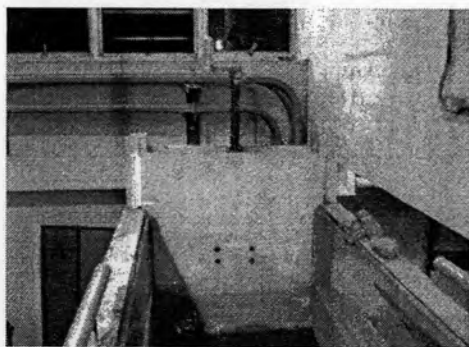


ค) มองจากท้ายรางน้ำ



ง) มองจากท้ายรางน้ำ

รูป ก-2 รางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume)

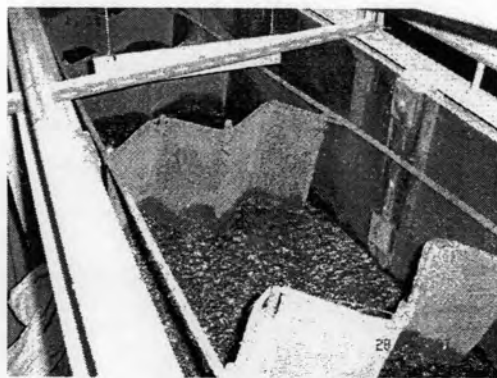


ก) ด้านหน้า

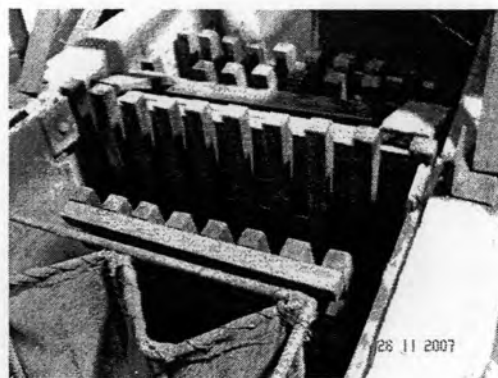


ข) ด้านหลัง

รูป ก-3 ประตูควบคุมระดับน้ำที่ปลายรางน้ำแบบบานยก



ก) ตะแกรงเหล็กข้ออ้อยซึ่งด้วยลวดตาข่าย



ข) ตะแกรงไม้ระแนง

รูป ก-4 ตะแกรงสลายพลังงานคลื่นและกระแสน้ำ

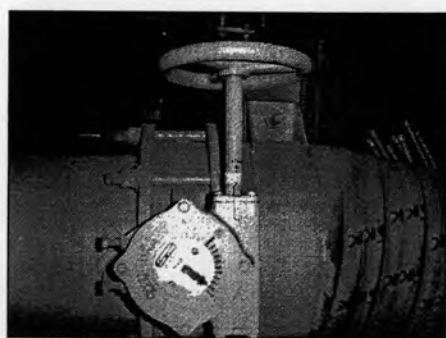


ก) เครื่องสูบน้ำ

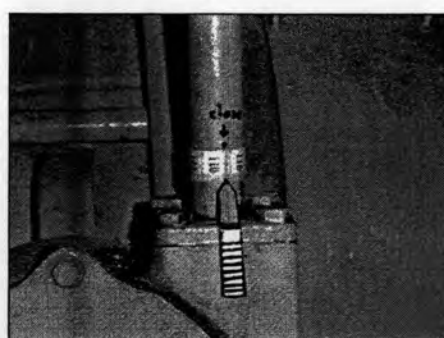


ข) ระบบท่อจากถังเก็บน้ำ

รูป ก-5 ระบบจ่าย - ส่งน้ำ



ก) วาล์วควบคุมการปิด-เปิด



ข) สเกลปรับอัตราการปล่อยน้ำเข้าสู่รางน้ำ

รูป ก-6 วาล์วปิด-เปิดน้ำเข้าสู่รางน้ำ

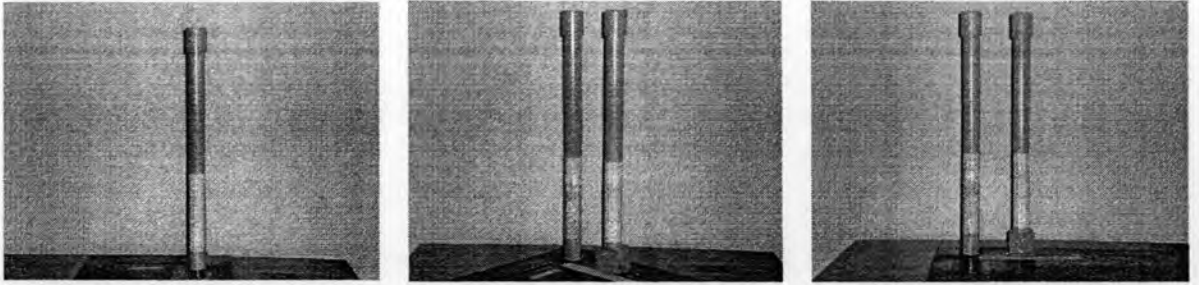
ก-2 แบบจำลองต่อม่อสะพาน

รูปแบบของต่อม่อที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีลักษณะเป็นเสาเข็มกลุ่มที่มีการเอียงของเสาเข็มต้นที่อยู่ด้านนอก ซึ่งจะตัดพิจารณาเฉพาะเสาเข็มต้นที่อยู่ใกล้และคาดว่าจะได้รับอิทธิพลของเสาเข็มต้นที่เอียงในกลุ่มเข็มออกมาเป็นแบบจำลองต่อม่อ โดยใช้ท่อพลาสติก (PVC) ทรงกระบอกขนาด 3.40 ซม. เป็นเสาเข็ม รองรับด้วยแผ่นอะคริลิกหนา 8 มม. ในการศึกษาจะกำหนดให้มีรูปแบบและการเปลี่ยนแปลงดังนี้

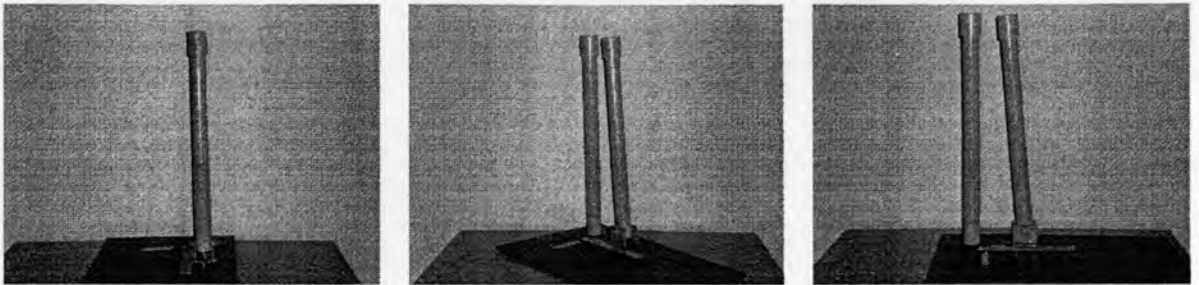
- เปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาเข็มต้นหน้า 1 ต้น ในระนาบเดียวกับทิศทางการไหล ($\alpha = 0^\circ$) ตั้งแต่ 0° จนถึง 20° มีเสาเข็มข้างเคียงที่คาดว่าจะได้รับผลของมุมเอียงจำนวน 1 ต้น โดยจะวางทางด้านซ้ายในแนวเดียวกับการไหล 1 ต้น รวมเสาเข็มที่ใช้ทั้งหมด 2 ต้น มีระยะห่างระหว่างเสาเข็ม $G = 2D$ เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ดังรูป ก-7 ถึง รูป ก-11

- เปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาเข็มต้นหน้า 1 ต้น ในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล ($\alpha = 45^\circ$) ตั้งแต่ 0° จนถึง 20° มีเสาเข็มข้างเคียงที่คาดว่าจะได้รับผลของมุมเอียงจำนวน 2 ต้น โดยจะวางทางด้านซ้ายในแนวเดียวกับการไหล 1 ต้น และวางทางด้านซ้ายของเสาเข็มเอียงแต่อยู่ในแนวเดียวกับเสาเข็มต้นที่ 2 อีกหนึ่งต้น รวมเสาเข็มที่ใช้ทั้งหมด 3 ต้น มีระยะห่างระหว่างเสาเข็ม $G = 2D$ เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ดังรูป ก-12 ถึง รูป ก-16

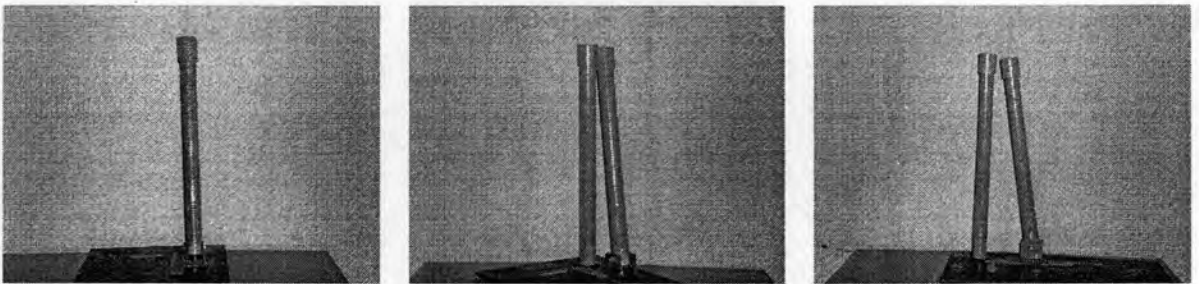
- เปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาเข็มต้นหน้า 1 ต้น ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ($\alpha = 90^\circ$) ตั้งแต่ 0° จนถึง 20° มีเสาเข็มข้างเคียงที่คาดว่าจะได้รับผลของมุมเอียงจำนวน 2 ต้น โดยจะวางทางด้านซ้ายในแนวเดียวกับการไหล 1 ต้น และวางทางด้านซ้ายของเสาเข็มเอียงแต่อยู่ในแนวเดียวกับเสาเข็มต้นที่ 2 อีกหนึ่งต้น รวมเสาเข็มที่ใช้ทั้งหมด 3 ต้น มีระยะห่างระหว่างเสาเข็ม $G = 2D$ เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ดังรูป ก-17 ถึง รูป ก-20



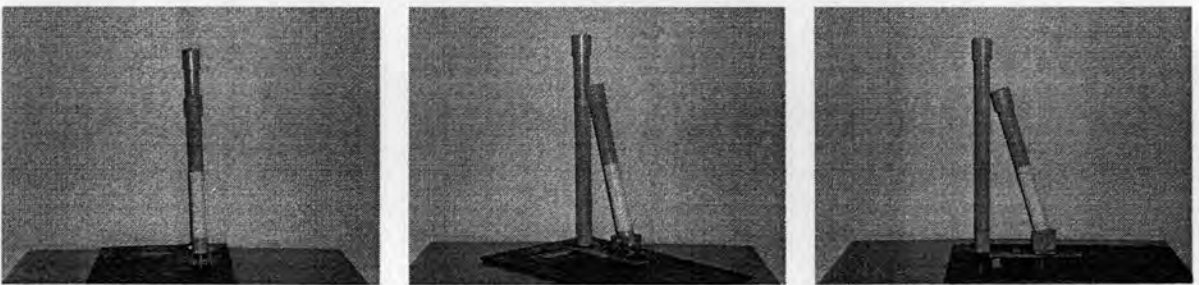
รูป ก-7 แบบจำลองต่อม่อ กรณีเสาชิมตั้งตรง 2 ต้น (A1)



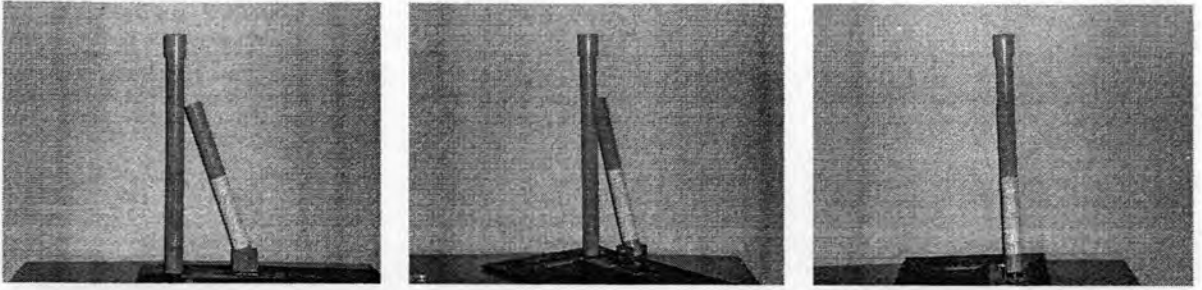
รูป ก-8 แบบจำลองต่อม่อ กรณีเสาชิมเอียงจากแนวตั้ง 5° ในระนาบตามทิศทางการไหล (B1)



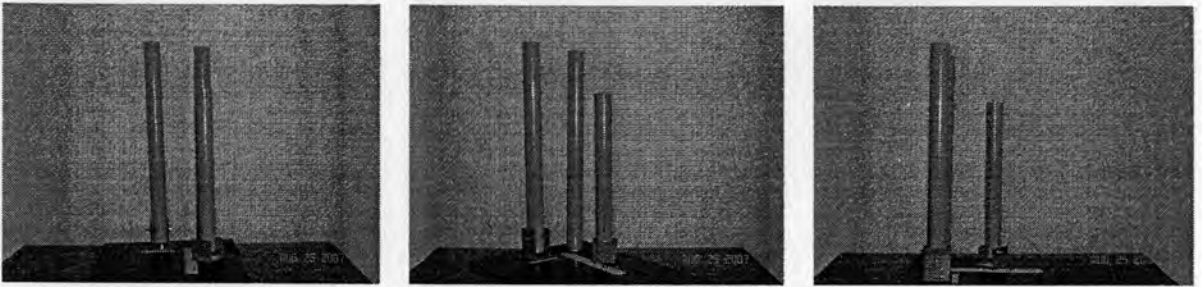
รูป ก-9 แบบจำลองต่อม่อ กรณีเสาชิมเอียงจากแนวตั้ง 10° ในระนาบตามทิศทางการไหล (C1)



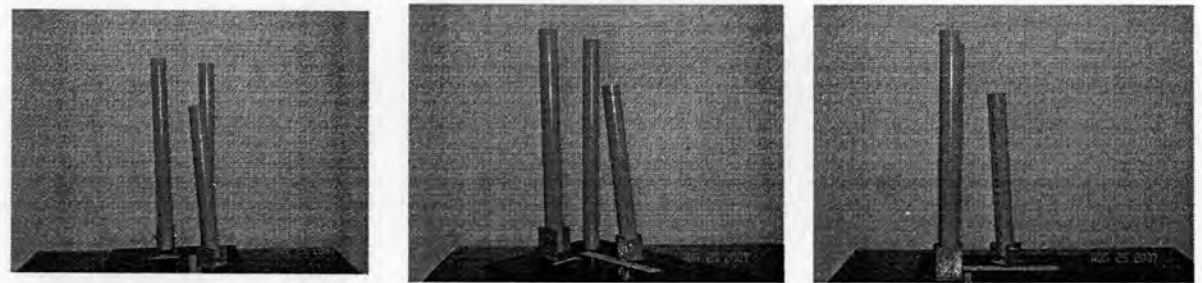
รูป ก-10 แบบจำลองต่อม่อ กรณีเสาชิมเอียงจากแนวตั้ง 15° ในระนาบตามทิศทางการไหล (D1)



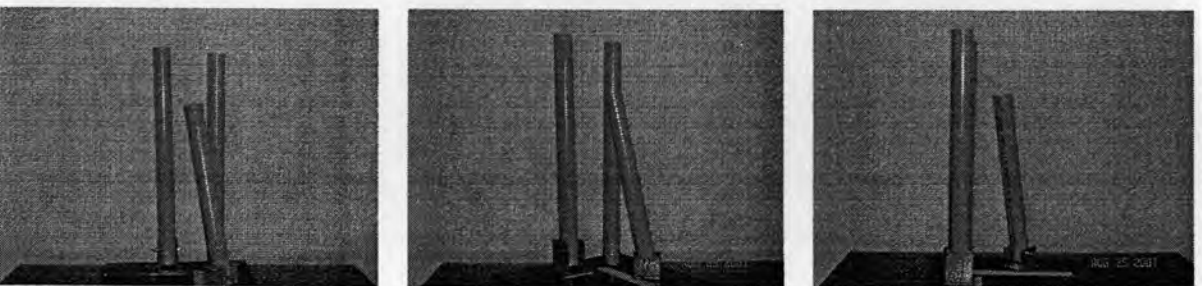
รูป ก-11 แบบจำลองต่อม่อ กรณีเสาชี้มเอียงจากแนวตั้ง 20° ในระนาบตามทิศทางการไหล (E1)



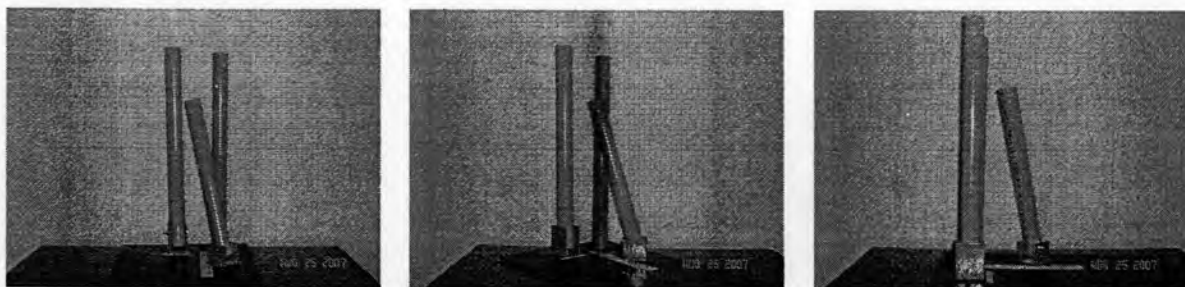
รูป ก-12 แบบจำลองต่อม่อ กรณีเสาชี้มตั้งตรง 3 ต้น (A2)



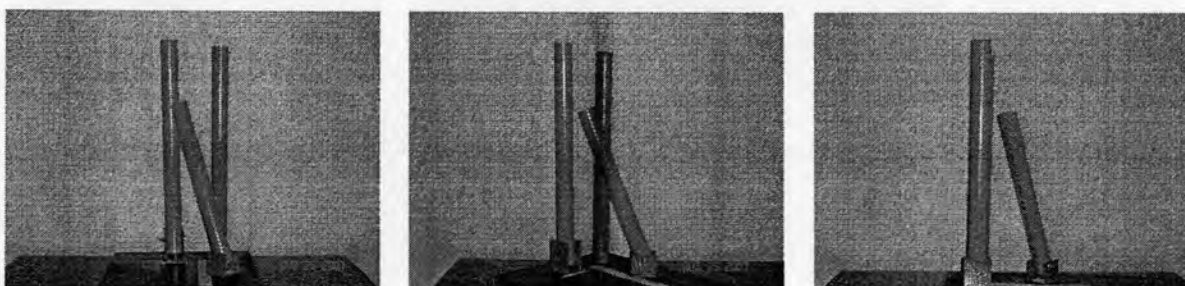
รูป ก-13 แบบจำลองต่อม่อ กรณีเสาชี้มเอียงจากแนวตั้ง 5° ในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล (B2)



รูป ก-14 แบบจำลองต่อม่อ กรณีเสาชี้มเอียงจากแนวตั้ง 10° ในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล (C2)



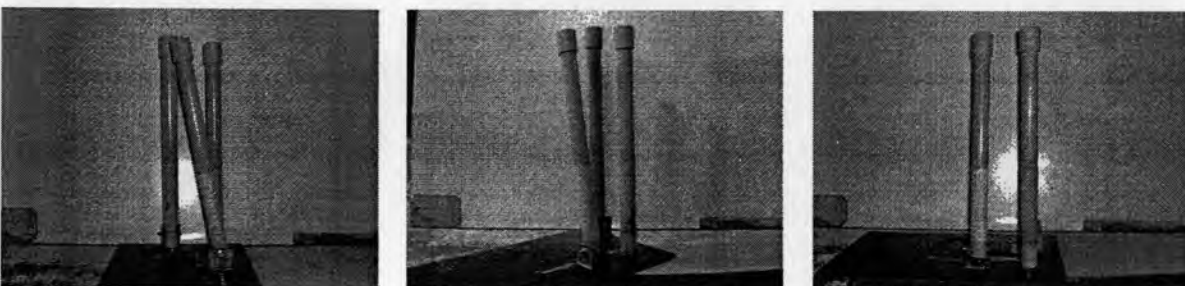
รูป ก-15 แบบจำลองต่อม่อ กรณีเสาชิมเอียงจากแนวตั้ง 15° ในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล (D2)



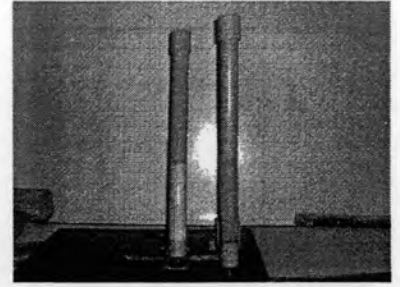
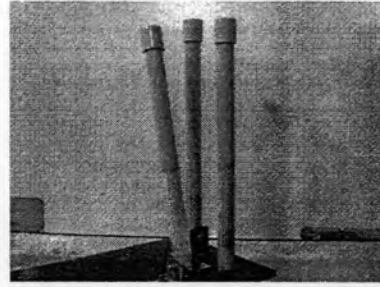
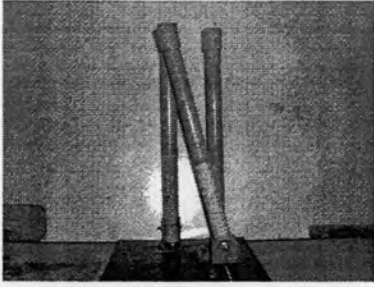
รูป ก-16 แบบจำลองต่อม่อ กรณีเสาชิมเอียงจากแนวตั้ง 20° ในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล (E2)



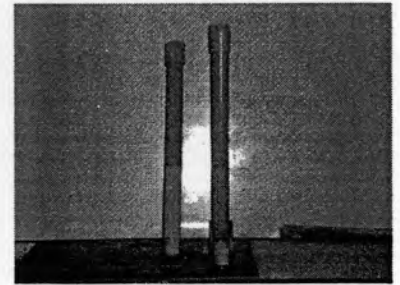
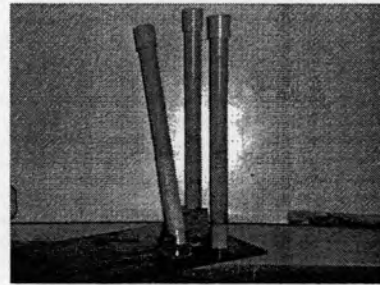
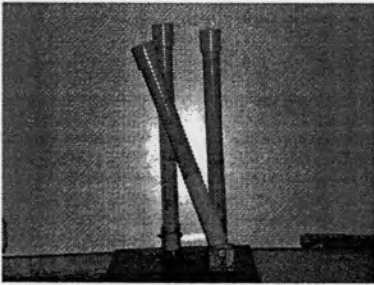
รูป ก-17 แบบจำลองต่อม่อ กรณีเสาชิมเอียงจากแนวตั้ง 5° ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล (B3)



รูป ก-18 แบบจำลองต่อม่อ กรณีเสาชิมเอียงจากแนวตั้ง 10° ในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล (C3)



รูป ก-19 แบบจำลองต่อม่อ กรณีเสาเข็มเอียงจากแนวตั้ง 15° ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล (D3)



รูป ก-20 แบบจำลองต่อม่อ กรณีเสาเข็มเอียงจากแนวตั้ง 20° ในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล (E3)

ก-3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

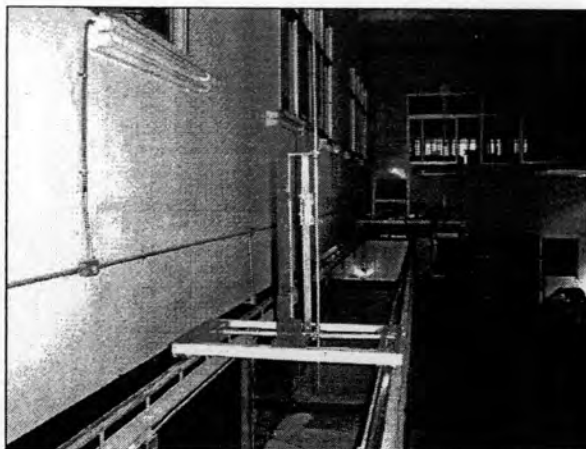
1) เครื่องมือวัดระดับ (point gauge) ติดตั้งบนรางเลื่อนลูกถ้วยบนรางน้ำเปิด เพื่อใช้วัดระดับท้องน้ำและผิวน้ำ ณ ตำแหน่งพื้นที่การทดลองที่ต้องการ ดังรูป ก-21

2) ฝ่ายสามเหลี่ยมสันคม (90° V-notch weir) ติดตั้งทางด้านท้ายน้ำของรางน้ำ เพื่อใช้วัดอัตราการไหลของน้ำ โดยการอ่านค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (H) ผ่านทางมานอร์มิเตอร์ และนำไปคำนวณอัตราการไหลจากสมการ $Q = 0.045H^{2.1}$ โดยที่ Q คือ อัตราการไหลในหน่วย ลิตรต่อวินาที และ H คือ ระดับน้ำเหนือสันฝายในหน่วย เซนติเมตร ดังรูป ก-22

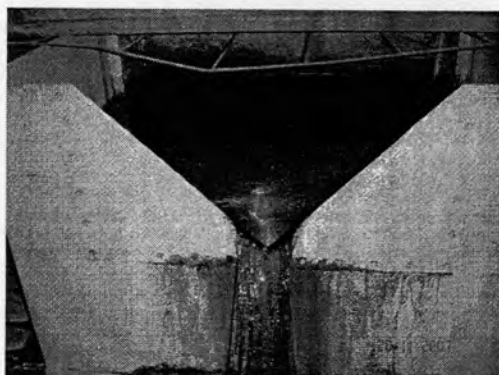
3) กล้องถ่ายรูป กล้องวิดีโอและเครื่องบันทึกภาพ ใช้บันทึกภาพพฤติกรรมการไหล และกระบวนการกัดเซาะและตกตะกอนรอบแบบจำลองตอม่อสะพาน ติดตั้งที่ด้านข้างและด้านบนของรางน้ำเปิด ดังรูป ก-23

4) เทอร์โมมิเตอร์ ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของน้ำขณะทำการทดลอง

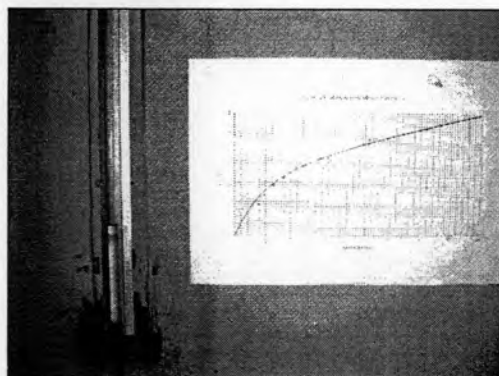
5) นาฬิกา ใช้จับเวลาที่ทำให้หลุมกัดเซาะเข้าสู่สมดุ



รูป ก-21 เครื่องมือวัดระดับ (point gauge)

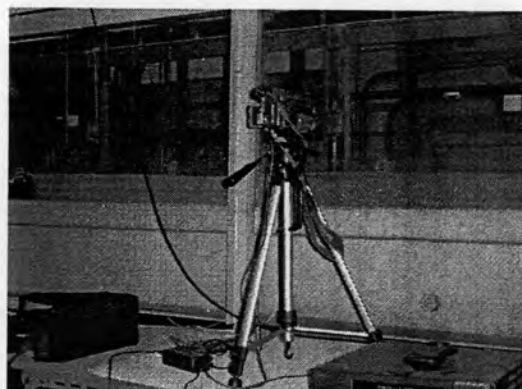


ก) 90° V-notch weir

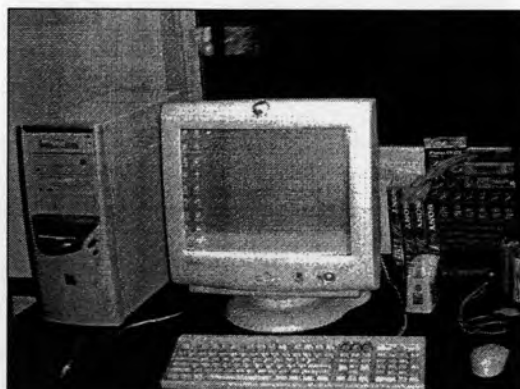


ข) เครื่องวัดอัตราการไหลจากระดับน้ำ

รูป ก-22 ชุดเครื่องมือวัดอัตราการไหลทำรายงาน



ก) กล้องถ่ายวิดีโอ



ข) คอมพิวเตอร์เก็บบันทึกวิดีโอ

รูป ก-23 ชุดอุปกรณ์บันทึกการทดลองการกักเซาะ

ก-4 วัสดุท้องน้ำ

วัสดุท้องน้ำที่ใช้จำลองสภาพท้องน้ำเป็นทรายละเอียดขนาดสม่ำเสมอเฉลี่ย (d_{50}) 0.27 มม. โดยใช้ดาดผิวพื้นวัสดุที่ไม่มีการกัดเซาะให้เสมือนเป็นพื้นวัสดุเดียวกันกับบริเวณที่ใช้ทดลองการกัดเซาะ มีความหนาประมาณ 15 ซม. แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของทรายดังตาราง ก-1 และรูป ก-24

จากรูป ก-24 สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่จำแนกลักษณะของวัสดุทรายได้จาก ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (uniformity coefficient, C_u) และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายขนาด (gradation coefficient, σ_g) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ; } C_u &= \frac{d_{60}}{d_{10}} && \text{(ก-1)} \\ &= \frac{0.30}{0.18} \\ &= 1.67 \end{aligned}$$

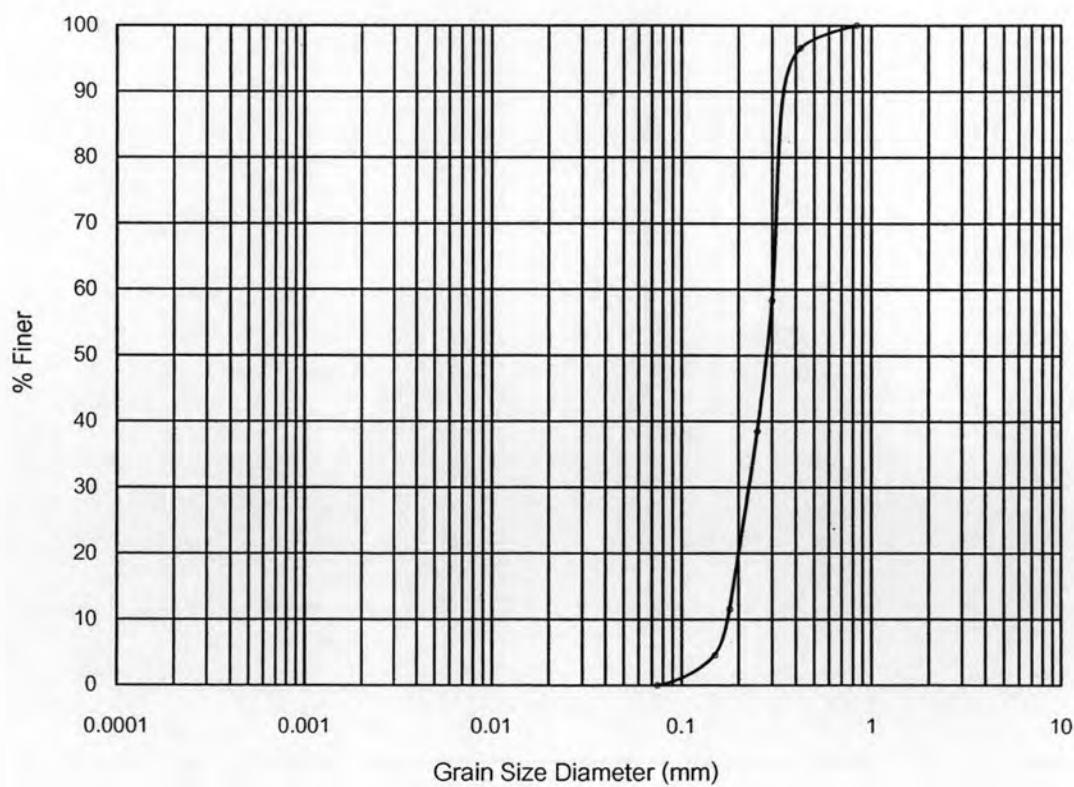
$$\begin{aligned} \text{สัมประสิทธิ์การกระจายขนาด; } \sigma_g &= \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} && \text{(ก-2)} \\ &= \sqrt{\frac{0.36}{0.19}} \\ &= 1.38 \end{aligned}$$

$\therefore \sigma_g < 2$ และ $C_u < 6$ ทรายมีขนาดสม่ำเสมอ (uniformly graded sand)

ตาราง ก-1 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของทราย (sieve analysis)

น้ำหนักทราย + ถ้วย	700	กรัม
น้ำหนักถ้วย	24	กรัม
น้ำหนักทราย	676	กรัม

เบอร์ตะแกรง (No.)	ขนาดตะแกรง (มม.)	น้ำหนักที่ค้างบน ตะแกรง (กรัม)	ค่าร้อยละที่ค้าง บนตะแกรง	ค่าร้อยละสะสมที่ ค้างบนตะแกรง	ค่าร้อยละสะสม ที่ผ่านตะแกรง
20	0.840	0	0.00	0.00	100.00
40	0.425	23	3.40	3.40	96.60
50	0.300	259	38.31	41.72	58.28
60	0.250	134	19.82	61.54	38.46
80	0.180	182	26.92	88.46	11.54
100	0.150	47	6.95	95.41	4.59
200	0.075	31	4.59	100.00	0.00
	Pan	0	0.00		
	รวม	676	100.00		



รูป ก-24 โค้งการกระจายขนาดของวัสดุทราย (grain size distribution curve)

ภาคผนวก ข

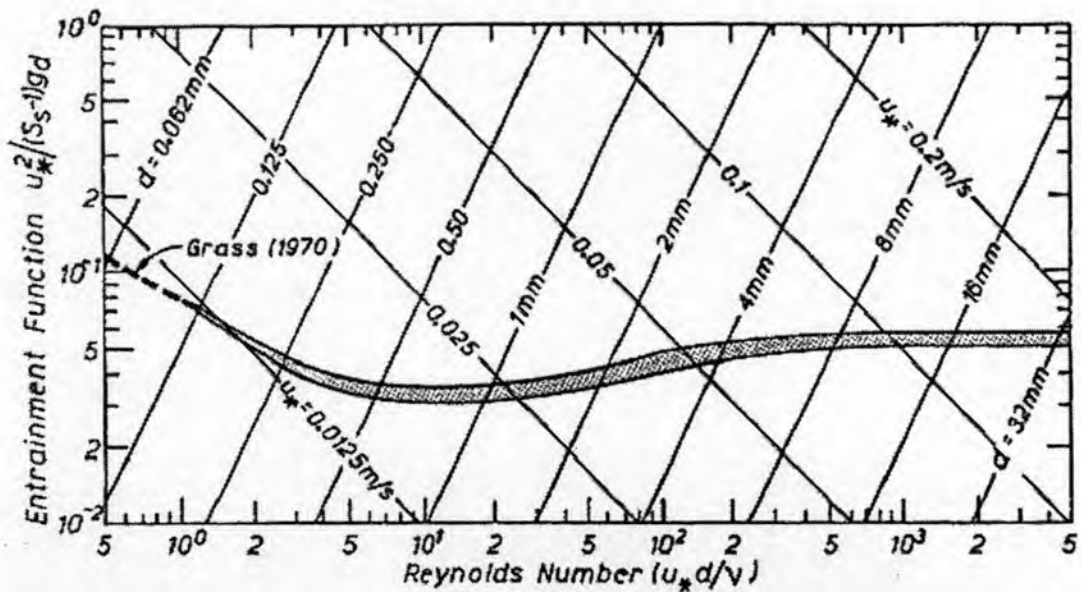
การหาค่าเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ข

การหาค่าเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลอง

ข-1 การเริ่มต้นเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำในการทดลอง

การทดลองการกัดเซาะในสภาวะน้ำไม่มีตะกอนปน (clear-water scour) ในการศึกษานี้จะพิจารณาจากไดอะแกรมของชิลด์ (Shield's diagram) เป็นกราฟความสัมพันธ์ของค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤต (U_c) กับขนาดวัสดุท้องน้ำ (d_{50}) ในรูปของ Entrainment Function ที่สัมพันธ์กับ Particle Reynolds Number ดังรูป ข-1 เพื่อบ่งบอกสภาพวัสดุท้องน้ำ โดยส่วนที่อยู่เหนือเส้นทึบเป็นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ได้เส้นทึบเป็นส่วนที่ไม่มี การเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และบริเวณเส้นทึบคือส่วนที่วัสดุท้องน้ำกำลังจะเคลื่อนที่ (threshold movement) ซึ่งสามารถหาค่าความเร็วเฉือนวิกฤต (U_c) ของวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในการทดลองเพื่อเป็นเกณฑ์การออกแบบให้อยู่ในเงื่อนไขของน้ำไม่มีตะกอนปน (clear-water ; $U < U_c$) ได้ดังนี้



รูป ข-1 ความสัมพันธ์ของ Entrainment Function กับ Particle Reynolds Number

ตามที่ Shields ได้ทำการศึกษาไว้ (รูปจาก Raudkivi และ Sutherland; 1981)

จากการวิเคราะห์กระจายขนาดของวัสดุทรายในภาคผนวก ก-4 วัสดุท้องน้ำมีขนาด 0.27 มม. เมื่อนำมาอ่านบนเส้นกราฟที่วัสดุท้องน้ำกำลังจะเคลื่อนที่ จะให้ค่า Entrainment Function เท่ากับ 0.043 ดังนั้นจาก

$$\frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho_w)gd} = 0.043 \quad (ท-1)$$

เมื่อ	ρ_s	=	ความหนาแน่นของวัสดุท้องน้ำเท่ากับ 2650 kg/m ³
	ρ_w	=	ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1000 kg/m ³
	g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเท่ากับ 9.81 m/s ²
	d	=	ขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำเท่ากับ 0.27 mm

ดังนั้น $\tau_0 = 0.188 \text{ N/m}^2$

หาค่าความเร็วเฉือนวิกฤต (U_c) จาก

$$U_c = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_w}} \quad (ท-2)$$

จะได้ $U_c = 0.0137 \text{ m/s}$

ค่าความเร็วเฉือนวิกฤตที่หาได้จากข้างต้น คือ ค่าความเร็วเฉือนที่ทำให้วัสดุท้องน้ำขนาดเฉลี่ย 0.27 มม. เริ่มต้นเคลื่อนที่ ดังนั้นการกำหนดค่าความลึกการไหล (y) ที่สัมพันธ์กับค่าอัตราการไหล (Q) ความชันท้องน้ำ (S_0) และมีค่าฟรูดนัมเบอร์ (Fr) เท่ากันหรือใกล้เคียงกันในแต่ละการทดลอง จะต้องให้ค่าความเร็วเฉือนน้อยกว่าค่าความเร็วเฉือนวิกฤต ($U < U_c$) จึงจะเป็นการกัดเซาะในสภาวะเฉือนใต้น้ำไม่มีตะกอนปน

ข-2 การหาค่าความลึกการไหล ความลาดชันท้องน้ำและค่าอัตราการไหลเบื้องต้น

เพื่อให้ทราบถึงสภาวะการไหลเบื้องต้นที่จะนำไปใช้ในการทดลองการกัดเซาะภายใต้เงื่อนไขน้ำไม่มีตะกอนปน (clear-water scour) จึงต้องคำนวณหาค่าความลึกการไหล (y) เบื้องต้นที่สัมพันธ์กับค่าอัตราการไหล (Q) ความลาดชันท้องน้ำ (S_0) และมีค่าฟรูดนัมเบอร์ (Fr) เท่ากันหรือใกล้เคียงกันในแต่ละการทดลอง พร้อมทั้งมีค่าความเร็วเฉือนน้อยกว่าค่าความเร็วเฉือนวิกฤต ($U < U_c$) ที่คำนวณได้จากภาคผนวก ข-1 โดยอาศัยการแก้ระบบสมการ ดังนี้

$$1) \text{ สมการการไหลต่อเนื่อง} \quad Q = VA \quad (\text{ข-3})$$

$$2) \text{ สมการหาค่าฟรูดนัมเบอร์} \quad Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad (\text{ข-4})$$

$$3) \text{ สมการของแมนนิง} \quad V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_0^{1/2} \quad (\text{ข-5})$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหล, V คือ ความเร็วการไหลเฉลี่ย, A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล, y คือ ความลึกการไหล, Fr คือ ค่าฟรูดนัมเบอร์, g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, n คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง, R คือ รัศมีชลศาสตร์ และ S_0 คือ ความลาดท้องน้ำ ภายใต้ข้อสมมุติฐานเบื้องต้นว่าการไหลเป็นแบบสม่ำเสมอ (uniform flow)

เบื้องต้นจะกำหนดให้ค่าฟรูดนัมเบอร์ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.13 ถึง 0.18 และสมมติค่าอัตราการไหลที่จะใช้ในการทดลอง ทำให้สามารถหาค่าความลึกการไหลที่สัมพันธ์กับค่าฟรูดนัมเบอร์และอัตราการไหลนั้นๆ ได้จากการแทนค่าสมการ ข-3 ลงในสมการ ข-4 และจัดรูปใหม่จะได้

$$y = \left[\frac{Q}{(b)(Fr)\sqrt{g}} \right]^2 \quad (\text{ข-6})$$

เมื่อ b คือ ความกว้างของรางน้ำ (60 เซนติเมตร)

จากสมการ ข-6 สามารถหาค่าความลึกการไหลที่มีค่าฟรูดนัมเบอร์และอัตราการไหลต่างๆ ได้ และนำไปหาค่าความลาดชันท้องน้ำจากสมการ ข-5 โดยค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (n) หาได้จาก Strickler's formula (1923) [อ้างถึงใน Simons, 1977: 309] ซึ่งได้จากการทดลองในรางน้ำเปิดกับท้องน้ำที่เป็นทรายขนาดสม่ำเสมอ โดยได้นิยามว่าค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (n) จะเป็นฟังก์ชันของขนาดอนุภาควัสดุท้องน้ำ (particle size) เมื่อวัสดุท้องน้ำเป็นวัสดุที่ไม่มีการเชื่อมแน่น (cohesionless) และดังนั้น

$$n = \frac{d^{1/6}}{21.1} \quad (\text{ข-7})$$

เมื่อ $d = 0.00027$ เมตร

จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (n) เท่ากับ 0.012 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงและเท่ากับ การศึกษาที่ผ่านมาของ พรหมคล ขิดชอบ (1997) [เมื่อวัสดุท้องน้ำขนาดเฉลี่ย (d_{50}) = 0.36 มม. ค่า $n = 0.014$] และ ธรรมวัฒน์ การุณธนกุล (1998) [เมื่อวัสดุท้องน้ำขนาดเฉลี่ย (d_{50}) = 0.36 มม. ค่า $n = 0.012$] เพื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (n) ไปใช้ประมาณหาค่าเบื้องต้นของสภาวะการไหลในการทดลอง และเมื่อนำไปคำนวณประมาณค่าความลึกการไหลที่สัมพันธ์กับค่าอัตราการไหล (Q) ความลาดชันท้องน้ำ (S_0) และมีค่าฟรูดนัมเบอร์ (Fr) ที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน จากนั้นสามารถหาค่าความเร็วเฉือนในแต่ละการทดลองได้จากสมการ

$$U_* = \sqrt{gyS_0} \quad (\text{ข-8})$$

โดยที่ค่าความเร็วเฉือนที่ได้จะต้องน้อยกว่าค่าความเร็วเฉือนวิกฤตที่หาได้จากภาคผนวก ข-1 จึงจะได้เงื่อนไขการทดลองเบื้องต้นที่จะใช้ในการทดลอง อยู่ในสภาวะการไหลของน้ำไม่มีตะกอนปน เป็นการไหลคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลาและการไหลเป็นแบบตื้นกว่าวิกฤต ดังตาราง ข-1

ตาราง ข-1 ค่าความลึกการไหลที่สัมพันธ์กับ อัตราการไหล ความลาดชันท้องน้ำ และค่าฟรูดนัมเบอร์

อัตราการไหล (Q , lt/sec)	ความลึกการไหล (y , cm)	ค่าฟรูดนัมเบอร์ (Fr)	ความลาดชันท้องน้ำ (S_0)	ความเร็วเฉือนต่อความเร็วเฉือน วิกฤต ($U/U_{*c} < 1$, clear-water)
4.00	5.19	0.18	0.00011	0.53
7.00	7.54	0.18	0.00010	0.63
9.00	9.26	0.17	0.00009	0.66
11.00	10.58	0.17	0.00009	0.70
13.00	12.32	0.16	0.00008	0.72
15.00	13.55	0.16	0.00008	0.75
17.00	15.38	0.15	0.00007	0.76
20.00	17.14	0.15	0.00007	0.81
23.00	19.70	0.14	0.00006	0.82
25.00	20.82	0.14	0.00007	0.84
28.00	23.59	0.13	0.00006	0.85
30.00	24.71	0.13	0.00006	0.87

ข-3 การสอบเทียบฝายสามเหลี่ยมสันคม

เปรียบเทียบสมการหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเหนือสันฝาย (H) กับอัตราการไหลข้ามฝาย (Q) ที่ได้จากการสอบเทียบฝายสามเหลี่ยมสันคมโดย พรมงคล ชิดชอบ (1997) สมการ ข-9 ไชติกร แดงประไพ (2004) สมการ ข-10 และ นัฐวุฒิ พัดโรสง (2006) สมการ ข-11 ดังนี้

$$\text{สมการของ พรมงคล;} \quad Q = 0.014H^{2.46} \quad (\text{ข-9})$$

$$\text{สมการของ ไชติกร;} \quad Q = 0.077H^{2.0} \quad (\text{ข-10})$$

$$\text{สมการของ นัฐวุฒิ;} \quad Q = 0.045H^{2.1} \quad (\text{ข-11})$$

เมื่อ	Q	คือ	อัตราการไหลข้ามฝายในหน่วยลิตรต่อวินาที
	H	คือ	ความสูงของน้ำเหนือสันฝายในหน่วยเซนติเมตร

รวมทั้งแสดงข้อมูลการสอบเทียบฝายสามเหลี่ยมสันคมในแต่ละการศึกษาที่ผ่านมา และการวัดอัตราการไหล 5 อัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้โดยการวัดปริมาตรกับเวลา ในตาราง ข-2 ถึง ข-5 และรูป ข-2 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ กับค่าอัตราการไหลที่คำนวณจากสมการ ข-9, ข-10 และ ข-11 พบว่าชุดข้อมูลที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน มีความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเหนือสันฝาย (H) กับอัตราการไหลข้ามฝาย (Q) ที่เป็นไปในทางเดียวกันทั้ง 3 สมการ แต่จะแตกต่างกันที่ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณและค่าเลขยกกำลัง ทั้งนี้เนื่องจากการหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) ของแต่ละชุดข้อมูลที่แตกต่างกัน ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณและค่าเลขยกกำลังที่ต่างกัน ซึ่งมีค่าเลขยกกำลังที่ใกล้เคียง 2.5 ที่ได้จากทฤษฎีของฝายสามเหลี่ยมสันคม

ดังนั้น การศึกษาทดลองครั้งนี้จะใช้สมการ ข-11 ในการคำนวณค่าอัตราการไหลที่ใช้ทดลอง ซึ่งได้จากการสอบเทียบฝายสามเหลี่ยมสันคมโดย นัฐวุฒิ พัดโรสง (2006) เนื่องจากเป็นการสอบเทียบครั้งล่าสุด และมีความสอดคล้องไปกับข้อมูลการวัดอัตราการไหลในครั้งนี้

ตาราง ข-2 ผลการสอบเทียบฝายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคมโดย พรมงคล ชิดชอบ (1997)

ลำดับที่	ความสูงระดับน้ำ (H, cm)	อัตราการไหล (Q, l/sec)
1	14	10.0
2	17.1	18.0
3	18.5	22.0
4	18.8	23.0
5	19.7	23.0
6	21	30.0
7	21.9	33.0
8	22.5	32.0
9	23.5	36.0
10	24.9	44.0

ตาราง ข-3 ผลการสอบเทียบฝายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคมโดย โชติกร แดงประไพ (2004)

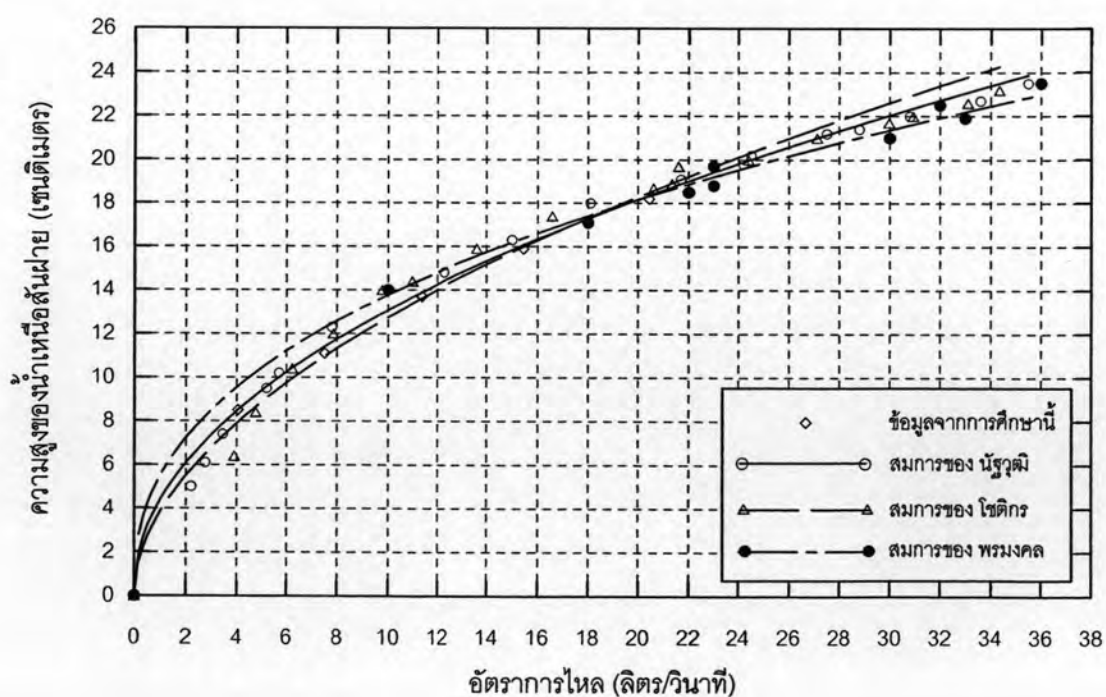
ลำดับที่	ความสูงระดับน้ำ (H, cm)	อัตราการไหล (Q, l/sec)
1	6.4	3.90
2	8.4	4.76
3	10.4	6.23
4	12.0	7.86
5	14.0	9.77
6	14.4	10.97
7	15.9	13.62
8	17.4	16.58
9	18.7	20.61
10	18.9	21.34
11	19.7	21.60
12	20.0	24.40
13	21.0	27.12
14	21.7	29.98
15	22.0	30.93
16	22.6	33.11
17	23.2	34.35

ตาราง ข-4 ผลการสอบเทียบฝายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคมโดย วิศวกรรมิ พัดโรสง (2006)

ลำดับที่	ความสูงระดับน้ำ (H, cm)	อัตราการไหล (Q, l/sec)
1	5.0	2.20
2	6.1	2.75
3	7.4	3.45
4	9.5	5.20
5	10.2	5.70
6	12.3	7.80
7	14.0	10.00
8	14.8	12.30
9	16.3	15.00
10	18.0	18.10
11	19.1	21.70
12	19.8	24.20
13	20.2	24.50
14	21.2	27.50
15	21.4	28.80
16	22.0	30.80
17	2.7	33.60
18	23.5	35.50

ตาราง ข-5 ข้อมูลวัดอัตราการไหลข้ามฝายในการทดลองครั้งนี้เพื่อใช้สอบเทียบฝายสามเหลี่ยมสันคม

ปริมาตร (ลิตร)	เวลา (วินาที)	เวลาเฉลี่ย (วินาที)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)	ความสูงน้ำเหนือสันฝาย (เซนติเมตร)	อัตราการไหลจากสมการ (ลิตร/วินาที)
100	24.38 24.93 24.75	24.69	4.05	8.50	4.03
100	13.44 13.12 13.33	13.30	7.52	11.10	7.05
150	13.04 13.27 13.32	13.21	11.36	13.70	10.97
150	9.84 9.55 9.74	9.71	15.45	15.90	15.00
150	7.14 7.56 7.32	7.34	20.44	18.20	19.92



รูป ข-2 เปรียบเทียบอัตราการไหลที่ได้จากการวัดและอัตราการไหลที่ได้จากสมการ

ภาคผนวก ค

การหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_0)

ตาราง ค-1 การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) จากสมการ 4-21 ในกรณีเอียงในระนาบตามทิศทางการไหล ($\alpha = 0^\circ$)

α°	β°	y_i (cm)	$1/y_i^2$	$\Sigma(1/y_i^2)$	D (cm)	D _p (cm)	$1.9(I/D)^2$	$0.1(w/D)^2$	$\cos^2\alpha\sqrt{1.9(I/D)^2+0.1(w/D)^2}$	ϕ_i	$\frac{\phi_i(D_p)}{y_i^2}$	$\frac{\Sigma D_{ei}}{\Sigma 1/(y_i^2)}$	D _e (cm)	D _e ^{'1} (cm)
0	0	0.00			3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.000	3.40	3.40	3.40
		10.77	0.009	0.077	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.029	3.40	3.40	3.40
		12.32	0.007	0.084	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.022	3.40	3.40	3.40
		13.63	0.005	0.089	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.018	3.40	3.40	3.40
		15.36	0.004	0.093	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.014	3.40	3.40	3.40
		17.33	0.003	0.097	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.011	3.40	3.40	3.40
		19.70	0.003	0.099	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.009	3.40	3.40	3.40
		21.00	0.002	0.102	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.008	3.40	3.40	3.40
		23.67	0.002	0.103	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.006	3.40	3.40	3.40
		24.71	0.002	0.105	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.006	3.40	3.40	3.40
0	5	0.00			3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.000	3.40	3.40	3.40
		10.60	0.009	0.009	3.40	3.40	0.141	0.000	0.38	0.90	0.027	3.06	3.23	3.16
		12.30	0.007	0.016	3.40	3.40	0.190	0.000	0.44	0.89	0.020	3.04	3.17	3.10
		13.62	0.005	0.021	3.40	3.40	0.233	0.000	0.48	0.88	0.016	3.02	3.13	3.13
		15.34	0.004	0.025	3.40	3.40	0.296	0.000	0.54	0.86	0.012	3.01	3.11	3.15
		17.33	0.003	0.028	3.40	3.40	0.378	0.000	0.61	0.85	0.010	2.99	3.09	3.22
		19.88	0.003	0.031	3.40	3.40	0.497	0.000	0.71	0.83	0.007	2.98	3.07	3.13
		21.07	0.002	0.033	3.40	3.40	0.559	0.000	0.75	0.82	0.006	2.97	3.06	3.04
		23.74	0.002	0.035	3.40	3.40	0.709	0.000	0.84	0.80	0.005	2.95	3.05	3.11
		24.94	0.002	0.037	3.40	3.40	0.783	0.000	0.88	0.79	0.004	2.94	3.04	2.99

หมายเหตุ : ¹ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลที่ได้จากการเปรียบเทียบจากการทดลอง

ตาราง ค-1(ต่อ) การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) จากสมการ 4-21 ในกรณีเอียงในระนาบตามทิศทางการไหล ($\alpha = 0^\circ$)

α°	β°	y_i (cm)	$1/y_i^2$	$\Sigma(1/y_i^2)$	D (cm)	Dp (cm)	$1.9(I/D)^2$	$0.1(w/D)^2$	$\cos^2\alpha\sqrt{1.9(I/D)^2+0.1(w/D)^2}$	ϕ_i	$\frac{\phi_i(D_p)}{y_i^2}$	$\frac{\Sigma D_{ei}}{\Sigma 1/(y_i^2)}$	D_e (cm)	D_e^{*1} (cm)
0	10	0.00			3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.000	3.40	3.40	3.40
		10.50	0.009	0.009	3.40	3.40	0.563	0.000	0.75	0.82	0.025	2.79	3.09	2.83
		12.36	0.007	0.016	3.40	3.40	0.781	0.000	0.88	0.79	0.018	2.75	2.98	2.81
		13.56	0.005	0.021	3.40	3.40	0.940	0.000	0.97	0.78	0.014	2.72	2.91	3.00
		15.60	0.004	0.025	3.40	3.40	1.244	0.000	1.12	0.75	0.011	2.70	2.87	2.91
		17.14	0.003	0.029	3.40	3.40	1.501	0.000	1.23	0.74	0.009	2.67	2.84	3.11
		19.70	0.003	0.031	3.40	3.40	1.983	0.000	1.41	0.71	0.006	2.65	2.81	3.13
		20.83	0.002	0.033	3.40	3.40	2.217	0.000	1.49	0.70	0.005	2.63	2.79	3.04
		23.69	0.002	0.035	3.40	3.40	2.868	0.000	1.69	0.67	0.004	2.61	2.77	3.01
		24.70	0.002	0.037	3.40	3.40	3.118	0.000	1.77	0.66	0.004	2.60	2.75	2.85
0	15	0.00			3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.000	3.40	3.40	3.40
		10.64	0.009	0.009	3.40	3.40	1.336	0.000	1.16	0.75	0.022	2.54	2.97	2.35
		12.34	0.007	0.015	3.40	3.40	1.797	0.000	1.34	0.72	0.016	2.50	2.81	2.66
		13.60	0.005	0.021	3.40	3.40	2.183	0.000	1.48	0.70	0.013	2.46	2.72	2.73
		15.40	0.004	0.025	3.40	3.40	2.799	0.000	1.67	0.67	0.010	2.43	2.67	2.71
		17.37	0.003	0.028	3.40	3.40	3.560	0.000	1.89	0.64	0.007	2.40	2.62	2.87
0	20	0.00			3.40	3.40	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	3.40	3.40	3.40
		10.72	0.01	0.01	3.40	3.40	2.50	0.00	1.58	0.68	0.02	2.32	2.86	1.82
		12.55	0.01	0.02	3.40	3.40	3.43	0.00	1.85	0.65	0.01	2.27	2.66	2.03
		13.64	0.01	0.02	3.40	3.40	4.05	0.00	2.01	0.63	0.01	2.23	2.56	2.40
		15.50	0.00	0.02	3.40	3.40	5.23	0.00	2.29	0.60	0.01	2.20	2.49	2.52
		17.13	0.00	0.03	3.40	3.40	6.39	0.00	2.53	0.57	0.01	2.17	2.43	2.70

หมายเหตุ : ¹ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลที่ได้จากการเปรียบเทียบจากการทดลอง

ตาราง ค-2 การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิภาพ (D_e) จากสมการ 4-21 ในกรณีเอียงในระนาบที่ตรงกับทิศทางการไหล ($\alpha = 45^\circ$)

α°	β°	y_i (cm)	$1/y_i^2$	$\Sigma(1/y_i^2)$	D (cm)	Dp (cm)	$1.9(I/D)^2$	$0.1(w/D)^2$	$\cos^2\alpha\sqrt{1.9(I/D)^2+0.1(w/D)^2}$	ϕ_i	$\frac{\phi_i(D_p)}{y_i^2}$	$\frac{\Sigma D_{ei}}{\Sigma 1/(y_i^2)}$	D_e (cm)	D_e^{11} (cm)
45	0	0.00			3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.000	3.40	3.40	3.40
		10.77	0.009	0.009	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.029	3.40	3.40	3.40
		12.32	0.007	0.015	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.022	3.40	3.40	3.40
		13.63	0.005	0.021	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.018	3.40	3.40	3.40
		15.36	0.004	0.025	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.014	3.40	3.40	3.40
		17.33	0.003	0.028	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.011	3.40	3.40	3.40
		19.70	0.003	0.031	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.009	3.40	3.40	3.40
		21.00	0.002	0.033	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.008	3.40	3.40	3.40
		23.67	0.002	0.035	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.006	3.40	3.40	3.40
		24.71	0.002	0.036	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.006	3.40	3.40	3.40
45	5	0.00			3.40	3.41	0.000	0.000	0.00	1.00	0.000	3.41	3.41	3.41
		10.57	0.009	0.009	3.40	3.41	0.070	0.004	0.14	0.96	0.029	3.28	3.34	3.24
		12.30	0.007	0.016	3.40	3.41	0.095	0.005	0.16	0.96	0.022	3.27	3.32	3.18
		13.85	0.005	0.021	3.40	3.41	0.121	0.006	0.18	0.95	0.017	3.26	3.30	3.27
		15.53	0.004	0.025	3.40	3.41	0.152	0.008	0.20	0.94	0.013	3.25	3.29	3.34
		16.96	0.003	0.028	3.40	3.41	0.181	0.010	0.22	0.94	0.011	3.25	3.28	3.46
		19.61	0.003	0.031	3.40	3.41	0.242	0.013	0.25	0.93	0.008	3.24	3.28	3.51
		20.86	0.002	0.033	3.40	3.41	0.274	0.014	0.27	0.93	0.007	3.23	3.27	3.50
		23.53	0.002	0.035	3.40	3.41	0.348	0.018	0.30	0.92	0.006	3.23	3.27	3.50
		24.71	0.002	0.037	3.40	3.41	0.384	0.020	0.32	0.91	0.005	3.22	3.26	3.45

หมายเหตุ : ¹ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิภาพที่ได้จากการเปรียบเทียบจากการทดลอง

ตาราง ค-2(ต่อ) การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) จากสมการ 4-21 ในกรณีเอียงในระนาบที่ตรงกับทิศทางกรไหล ($\alpha = 45^\circ$)

α°	β°	y_i (cm)	$1/y_i^2$	$\Sigma(1/y_i^2)$	D (cm)	Dp (cm)	$1.9(I/D)^2$	$0.1(w/D)^2$	$\cos^2\alpha\sqrt{1.9(I/D)^2+0.1(w/D)^2}$	ϕ_i	$\frac{\phi(D_p)}{y_i^2}$	$\frac{\Sigma D_{ei}}{\Sigma 1/(y_i^2)}$	D_e (cm)	D_e^1 (cm)
45	10	0.00			3.40	3.43	0.000	0.000	0.00	1.00	0.000	3.43	3.43	3.43
		10.63	0.009	0.009	3.40	3.43	0.289	0.015	0.28	0.93	0.028	3.17	3.30	3.16
		12.66	0.006	0.015	3.40	3.43	0.410	0.022	0.33	0.91	0.019	3.15	3.25	3.04
		13.38	0.006	0.021	3.40	3.43	0.457	0.024	0.35	0.91	0.017	3.14	3.22	3.26
		15.25	0.004	0.025	3.40	3.43	0.594	0.031	0.40	0.90	0.013	3.13	3.20	3.27
		17.17	0.003	0.028	3.40	3.43	0.753	0.040	0.45	0.88	0.010	3.12	3.19	3.28
		19.50	0.003	0.031	3.40	3.43	0.972	0.051	0.51	0.87	0.008	3.10	3.18	3.35
		20.58	0.002	0.033	3.40	3.43	1.082	0.057	0.53	0.86	0.007	3.09	3.17	3.45
		23.44	0.002	0.035	3.40	3.43	1.404	0.074	0.61	0.85	0.005	3.08	3.16	3.35
		25.00	0.002	0.037	3.40	3.43	1.597	0.084	0.65	0.84	0.005	3.08	3.15	3.26
45	15	0.00			3.40	3.46	0.000	0.000	0.00	1.00	0.000	3.46	3.46	3.46
		10.67	0.009	0.009	3.40	3.46	0.672	0.035	0.42	0.89	0.027	3.08	3.27	3.08
		12.38	0.007	0.015	3.40	3.46	0.904	0.048	0.49	0.87	0.020	3.06	3.20	3.10
		13.48	0.006	0.021	3.40	3.46	1.072	0.056	0.53	0.86	0.016	3.04	3.16	3.26
		15.60	0.004	0.025	3.40	3.46	1.436	0.076	0.61	0.85	0.012	3.02	3.13	3.18
		17.10	0.003	0.028	3.40	3.46	1.725	0.091	0.67	0.83	0.010	3.00	3.11	3.28
		19.70	0.003	0.031	3.40	3.46	2.290	0.121	0.78	0.81	0.007	2.99	3.09	3.29
		21.05	0.002	0.033	3.40	3.46	2.614	0.138	0.83	0.80	0.006	2.97	3.08	3.35
		23.70	0.002	0.035	3.40	3.46	3.314	0.174	0.93	0.78	0.005	2.96	3.06	3.30
		24.75	0.002	0.037	3.40	3.46	3.614	0.190	0.98	0.78	0.004	2.95	3.05	3.26
45	20	0.00			3.40	3.50	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	3.50	3.50	3.50
		10.30	0.01	0.01	3.40	3.50	1.15	0.06	0.55	0.86	0.03	3.02	3.26	3.15
		11.40	0.01	0.02	3.40	3.50	1.41	0.07	0.61	0.85	0.02	3.00	3.17	3.48
		13.50	0.01	0.02	3.40	3.50	1.98	0.10	0.72	0.82	0.02	2.97	3.12	3.27
		15.37	0.00	0.03	3.40	3.50	2.57	0.14	0.82	0.81	0.01	2.95	3.09	3.27
		17.25	0.00	0.03	3.40	3.50	3.24	0.17	0.92	0.79	0.01	2.93	3.06	3.34

หมายเหตุ : ¹ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลที่ได้จากการเปรียบเทียบจากการทดลอง

ตาราง ค-3 การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) จากสมการ 4-21 ในกรณีเอียงในระนาบตามทิศทางการไหล ($\alpha = 90^\circ$)

α°	β°	y_i (cm)	$1/y_i^2$	$\Sigma(1/y_i^2)$	D (cm)	D _p (cm)	$1.9(I/D)^2$	$0.1(w/D)^2$	$\cos^2\alpha\sqrt{1.9(I/D)^2+0.1(w/D)^2}$	ϕ_i	$\frac{\phi_i(D_p)}{y_i^2}$	$\frac{\Sigma D_{ei}}{\Sigma 1/(y_i^2)}$	D _e (cm)	D _e ^{'1} (cm)
90	0	0.00			3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.000	3.40	3.40	3.40
		10.77	0.009	0.009	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.029	3.40	3.40	3.40
		12.32	0.007	0.015	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.022	3.40	3.40	3.40
		13.63	0.005	0.021	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.018	3.40	3.40	3.40
		15.36	0.004	0.025	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.014	3.40	3.40	3.40
		17.33	0.003	0.028	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.011	3.40	3.40	3.40
		19.70	0.003	0.031	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.009	3.40	3.40	3.40
		21.00	0.002	0.033	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.008	3.40	3.40	3.40
		23.67	0.002	0.035	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.006	3.40	3.40	3.40
		24.71	0.002	0.036	3.40	3.40	0.000	0.000	0.00	1.00	0.006	3.40	3.40	3.40
90	5	0.00			3.40	3.41	0.000	0.000	0.00	1.00	0.000	3.41	3.41	3.41
		10.63	0.009	0.009	3.40	3.41	0.000	0.007	0.00	1.00	0.030	3.41	3.41	3.80
		12.40	0.007	0.015	3.40	3.41	0.000	0.010	0.00	1.00	0.022	3.41	3.41	3.70
		13.35	0.006	0.021	3.40	3.41	0.000	0.012	0.00	1.00	0.019	3.41	3.41	3.74
		15.06	0.004	0.025	3.40	3.41	0.000	0.015	0.00	1.00	0.015	3.41	3.41	3.85
		17.00	0.003	0.029	3.40	3.41	0.000	0.019	0.00	1.00	0.012	3.41	3.41	4.00
		19.90	0.003	0.031	3.40	3.41	0.000	0.026	0.00	1.00	0.009	3.41	3.41	3.83
		21.13	0.002	0.034	3.40	3.41	0.000	0.030	0.00	1.00	0.008	3.41	3.41	3.81
		23.70	0.002	0.035	3.40	3.41	0.000	0.037	0.00	1.00	0.006	3.41	3.41	3.84
		24.65	0.002	0.037	3.40	3.41	0.000	0.040	0.00	1.00	0.006	3.41	3.41	3.68

หมายเหตุ : ¹ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลที่ได้จากการเปรียบเทียบจากการทดลอง

ตาราง ค-3(ต่อ) การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) จากสมการ 4-21 ในกรณีเอียงในระนาบตามทิศทางการไหล ($\alpha = 90^\circ$)

α°	β°	y_i (cm)	$1/y_i^2$	$\Sigma(1/y_i^2)$	D (cm)	Dp (cm)	$1.9(I/D)^2$	$0.1(w/D)^2$	$\cos^2\alpha\sqrt{1.9(I/D)^2+0.1(w/D)^2}$	ϕ_i	$\frac{\phi_i(D_p)}{y_i^2}$	$\frac{\Sigma D_{ei}}{\Sigma 1/(y_i^2)}$	D_e (cm)	D_e^1 (cm)
90	10	0.00			3.40	3.45	0.000	0.000	0.00	1.00	0.000	3.45	3.45	3.45
		10.58	0.009	0.009	3.40	3.45	0.000	0.030	0.00	1.00	0.031	3.45	3.45	3.80
		12.33	0.007	0.016	3.40	3.45	0.000	0.041	0.00	1.00	0.023	3.45	3.45	3.62
		13.60	0.005	0.021	3.40	3.45	0.000	0.050	0.00	1.00	0.019	3.45	3.45	3.53
		15.28	0.004	0.025	3.40	3.45	0.000	0.063	0.00	1.00	0.015	3.45	3.45	3.59
		16.85	0.004	0.029	3.40	3.45	0.000	0.076	0.00	1.00	0.012	3.45	3.45	3.82
		19.80	0.003	0.031	3.40	3.45	0.000	0.105	0.00	1.00	0.009	3.45	3.45	3.78
		20.72	0.002	0.034	3.40	3.45	0.000	0.115	0.00	1.00	0.008	3.45	3.45	3.86
		23.60	0.002	0.035	3.40	3.45	0.000	0.150	0.00	1.00	0.006	3.45	3.45	3.79
		24.83	0.002	0.037	3.40	3.45	0.000	0.166	0.00	1.00	0.006	3.45	3.45	3.72
90	15	0.00			3.40	3.52	0.000	0.000	0.00	1.00	0.000	3.52	3.52	3.52
		10.64	0.009	0.009	3.40	3.52	0.000	0.070	0.00	1.00	0.031	3.52	3.52	3.56
		12.27	0.007	0.015	3.40	3.52	0.000	0.094	0.00	1.00	0.023	3.52	3.52	3.55
		13.40	0.006	0.021	3.40	3.52	0.000	0.112	0.00	1.00	0.020	3.52	3.52	3.67
		15.17	0.004	0.025	3.40	3.52	0.000	0.143	0.00	1.00	0.015	3.52	3.52	3.59
		17.34	0.003	0.029	3.40	3.52	0.000	0.187	0.00	1.00	0.012	3.52	3.52	3.58
		19.44	0.003	0.031	3.40	3.52	0.000	0.235	0.00	1.00	0.009	3.52	3.52	3.67
		21.00	0.002	0.034	3.40	3.52	0.000	0.274	0.00	1.00	0.008	3.52	3.52	3.55
		23.50	0.002	0.035	3.40	3.52	0.000	0.343	0.00	1.00	0.006	3.52	3.52	3.50
		24.90	0.002	0.037	3.40	3.52	0.000	0.385	0.00	1.00	0.006	3.52	3.52	3.31

หมายเหตุ : ¹ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลที่ได้จากการเปรียบเทียบจากการทดลอง

ตาราง ค-3(ต่อ) การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) จากสมการ 4-21 ในกรณีเอียงในระนาบตามทิศทางการไหล ($\alpha = 90^\circ$)

α°	β°	y_i (cm)	$1/y_i^2$	$\Sigma(1/y_i^2)$	D (cm)	D _p (cm)	$1.9(I/D)^2$	$0.1(w/D)^2$	$\cos^2\alpha\sqrt{1.9(I/D)^2+0.1(w/D)^2}$	ϕ_i	$\frac{\phi_i(D_p)}{y_i^2}$	$\frac{\Sigma D_{ei}}{\Sigma 1/(y_i^2)}$	D _e (cm)	D _e ¹ (cm)
90	20	0.00			3.40	3.62	0.000	0.000	0.00	1.00	0.000	3.62	3.62	3.62
		10.65	0.009	0.009	3.40	3.62	0.000	0.130	0.00	1.00	0.032	3.62	3.62	3.32
		12.15	0.007	0.016	3.40	3.62	0.000	0.169	0.00	1.00	0.025	3.62	3.62	3.47
		13.46	0.006	0.021	3.40	3.62	0.000	0.208	0.00	1.00	0.020	3.62	3.62	3.60
		14.96	0.004	0.026	3.40	3.62	0.000	0.256	0.00	1.00	0.016	3.62	3.62	3.78
		16.76	0.004	0.029	3.40	3.62	0.000	0.322	0.00	1.00	0.013	3.62	3.62	3.82
		19.55	0.003	0.032	3.40	3.62	0.000	0.438	0.00	1.00	0.009	3.62	3.62	3.78
		20.92	0.002	0.034	3.40	3.62	0.000	0.502	0.00	1.00	0.008	3.62	3.62	3.76
		23.62	0.002	0.036	3.40	3.62	0.000	0.639	0.00	1.00	0.006	3.62	3.62	3.74
		24.62	0.002	0.037	3.40	3.62	0.000	0.695	0.00	1.00	0.006	3.62	3.62	3.63

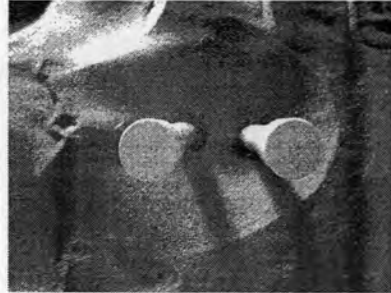
หมายเหตุ : ¹ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลที่ได้จากการเปรียบเทียบจากการทดลอง

ภาคผนวก ง

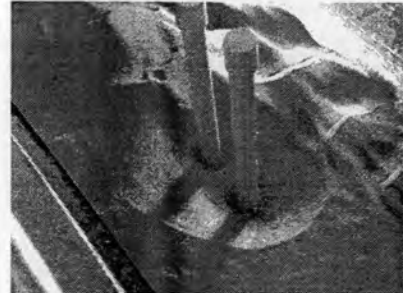
ภาพถ่ายผลการศึกษาในกรณีศึกษาต่างๆ

ภาคผนวก ง

ภาพถ่ายผลการศึกษาในกรณีศึกษาต่างๆ



ด้านบน



ด้านข้าง

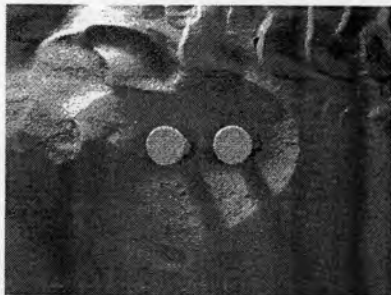


ด้านหน้า



ด้านหลัง

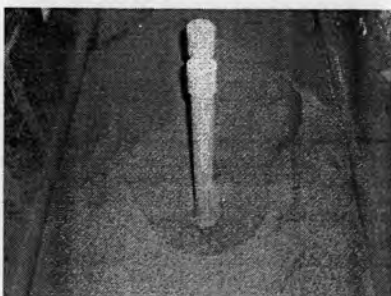
รูป ง-1 หลุมกัดเซาะสูงสุด กรณีเสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น (A1)



ด้านบน



ด้านข้าง

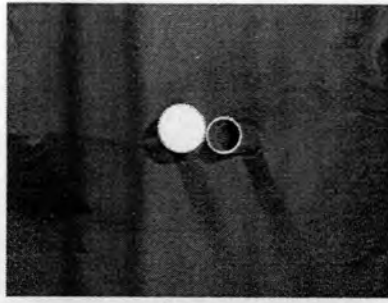


ด้านหน้า

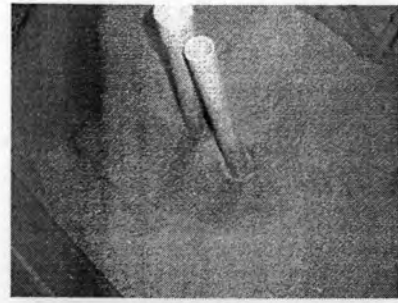


ด้านหลัง

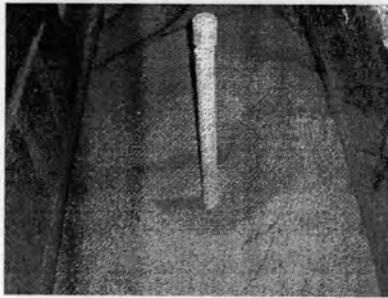
รูป ง-2 หลุมกัดเซาะสูงสุด กรณีเสาเข็มเอียงจากแนวตั้ง 5° ในระนาบตามทิศทางการไหล (B1)



ด้านบน



ด้านข้าง

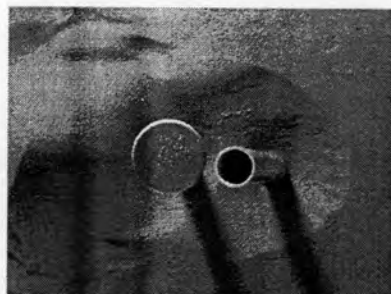


ด้านหน้า

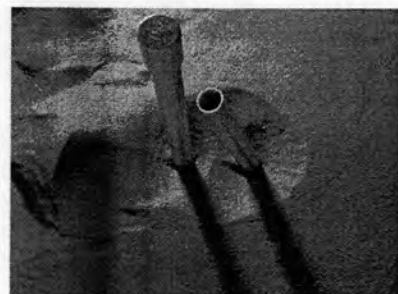


ด้านหลัง

รูป ง-3 หลุมกัดเซาะสูงสุด กรณีเสาะเข็มเอียงจากแนวตั้ง 10°
 ในระนาบตามทิศทางการไหล (C1)



ด้านบน



ด้านข้าง

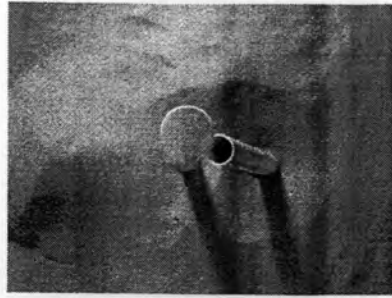


ด้านหน้า

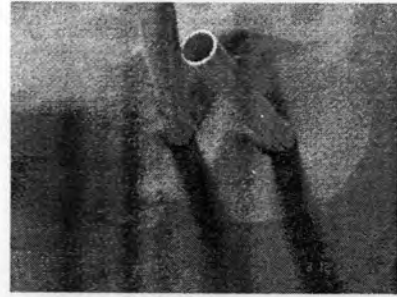


ด้านหลัง

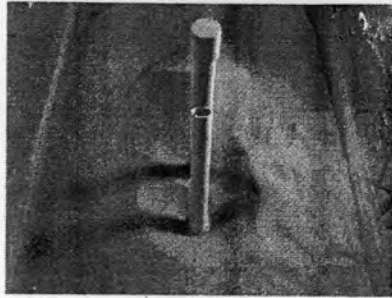
รูป ง-4 หลุมกัดเซาะสูงสุด กรณีเสาะเข็มเอียงจากแนวตั้ง 15°
 ในระนาบตามทิศทางการไหล (D1)



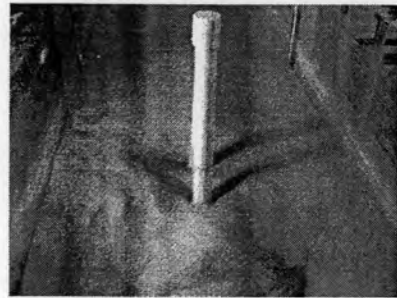
ด้านบน



ด้านข้าง

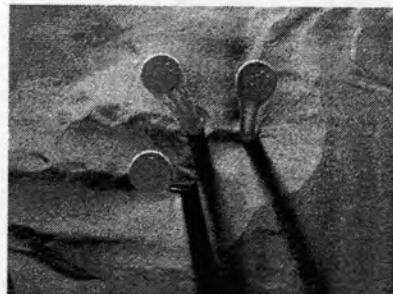


ด้านหน้า

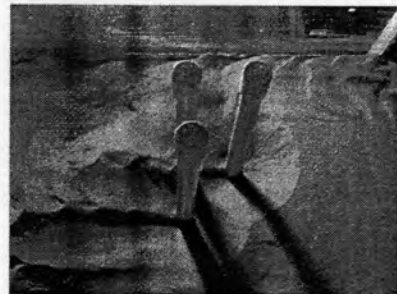


ด้านหลัง

รูป ง-5 หลุมกัดเซาะสูงสุด กรณีเสาเข็มเอียงจากแนวตั้ง 20°
 ในระนาบตามทิศทางการไหล (E1)



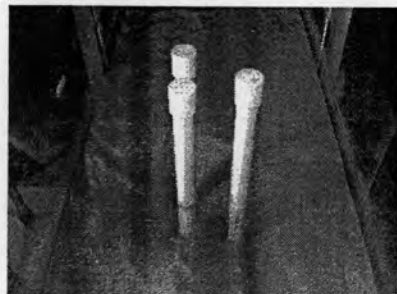
ด้านบน



ด้านข้าง

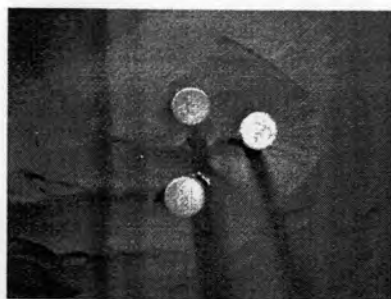


ด้านหน้า



ด้านหลัง

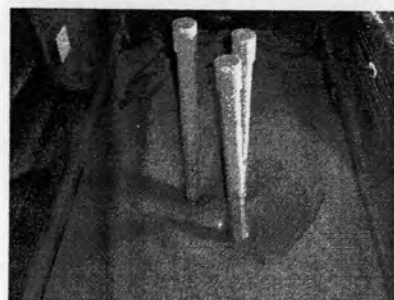
รูป ง-6 หลุมกัดเซาะสูงสุด กรณีเสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น (A2)



ด้านบน



ด้านข้าง



ด้านหน้า



ด้านหลัง

รูป ง-7 หลุมกัดเซาะสูงสุด กรณีเสาชิมเอียงจากแนวตั้ง 5°

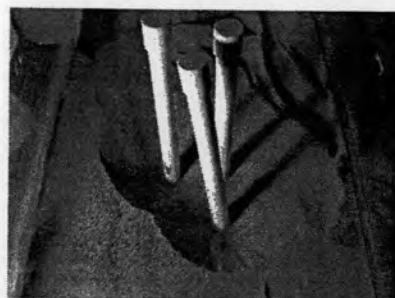
ในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล (B2)



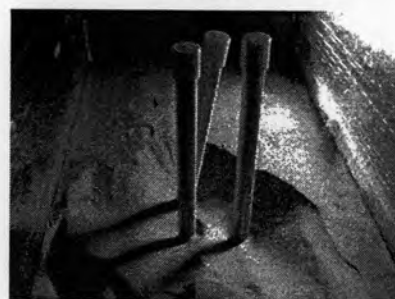
ด้านบน



ด้านข้าง



ด้านหน้า



ด้านหลัง

รูป ง-8 หลุมกัดเซาะสูงสุด กรณีเสาชิมเอียงจากแนวตั้ง 10°

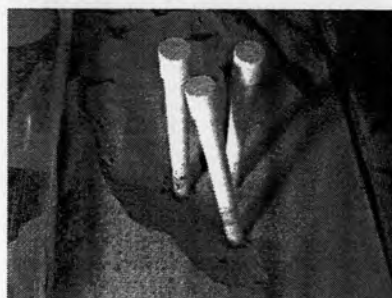
ในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล (C2)



ด้านบน



ด้านข้าง

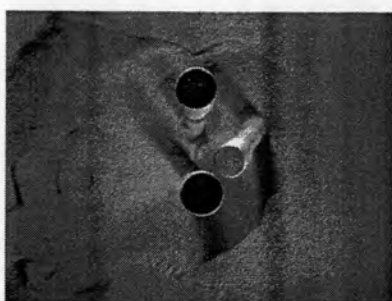


ด้านหน้า



ด้านหลัง

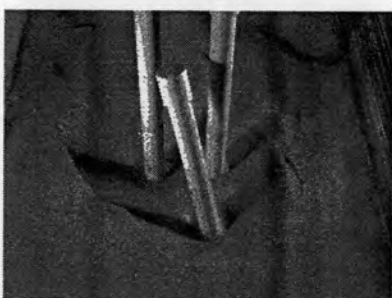
รูป ง-9 หลุมกัดเซาะสูงสุด กรณีเสาชิมเอียงจากแนวตั้ง 15°
 ในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล (D2)



ด้านบน



ด้านข้าง



ด้านหน้า



ด้านหลัง

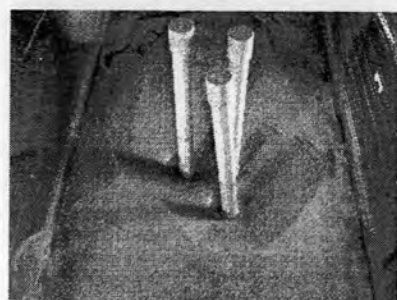
รูป ง-10 หลุมกัดเซาะสูงสุด กรณีเสาชิมเอียงจากแนวตั้ง 20°
 ในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล (E2)



ด้านบน



ด้านข้าง

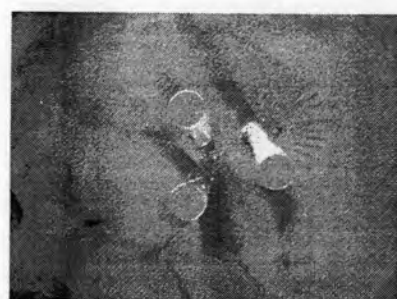


ด้านหน้า



ด้านหลัง

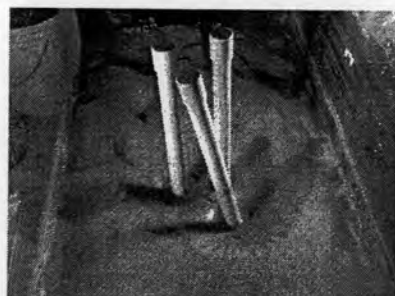
รูป ง-11 หลุมกัดเซาะสูงสุด กรณีเสาเข็มเอียงจากแนวตั้ง 5°
 ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล (B3)



ด้านบน



ด้านข้าง



ด้านหน้า



ด้านหลัง

รูป ง-12 หลุมกัดเซาะสูงสุด กรณีเสาเข็มเอียงจากแนวตั้ง 10°
 ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล (C3)



ด้านบน



ด้านข้าง

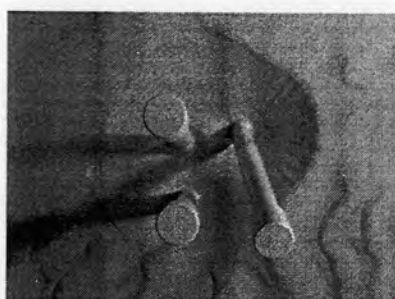


ด้านหน้า

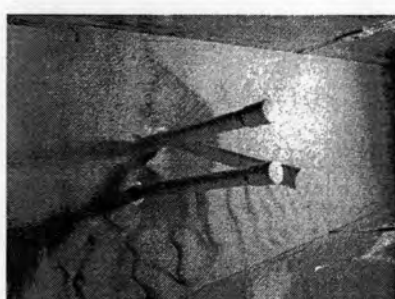


ด้านหลัง

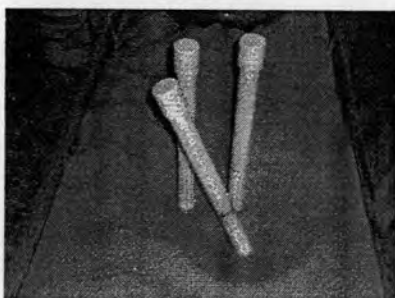
รูป ง-13 หลุมกัดเซาะสูงสุด กรณีเสาะเข็มเอียงจากแนวตั้ง 15°
 ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล (D3)



ด้านบน



ด้านข้าง



ด้านหน้า



ด้านหลัง

รูป ง-14 หลุมกัดเซาะสูงสุด กรณีเสาะเข็มเอียงจากแนวตั้ง 20°
 ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล (E3)

ภาคผนวก จ

สรุปผลการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับปัญหาการกัดเซาะ
รอบโครงสร้างฐานรากของอาคารชลศาสตร์

ภาคผนวก จ

สรุปผลการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับปัญหาการกัดเซาะ รอบโครงสร้างฐานรากของอาคารชลศาสตร์

1. การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับกลไกของกระบวนการกัดเซาะเนื่องจากพฤติกรรมการไหลของน้ำ รอบโครงสร้างฐานรากของอาคารชลศาสตร์

จากการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับกลไกของกระบวนการกัดเซาะ เนื่องจากพฤติกรรมการไหลของน้ำรอบโครงสร้างฐานรากอาคารชลศาสตร์ สามารถสรุปได้ว่า เมื่อการไหลเข้าปะทะกับโครงสร้างต่อม่อ จะทำให้การไหลบริเวณทางด้านต้นน้ำของต่อม่อเกิดการม้วนวนเป็นการไหล 3 มิติขึ้น ระบบการไหลม้วนวนนี้จะเป็นกลไกพื้นฐานของกระบวนการกัดเซาะ ซึ่งขึ้นกับรูปแบบของต่อม่อและสภาพเงื่อนไขการไหล ณ ขณะนั้น โดยแบ่งระบบม้วนวนที่เป็นตัวการของการกัดเซาะนี้ออกเป็น 3 ระบบ คือ

- 1.1) ระบบม้วนวนรูปเกือกม้า (horseshoe-vortex system)
- 1.2) ระบบม้วนวนตามแนวการไหล (wake-vortex system)
- 1.3) ระบบม้วนวนท้ายน้ำ (trailing-vortex system)

ตาราง จ-1 สรุปผลการศึกษาที่เกี่ยวกับกลไกของกระบวนการกัดเซาะ เนื่องจากพฤติกรรมการไหลของน้ำรอบโครงสร้างฐานรากอาคารชลศาสตร์ โดยเรียงตามปีการศึกษา

2. การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะ กับขนาดและลักษณะรูปร่างเฉพาะของต่อม่อ รวมทั้งตัวแปรการไหลต่างๆ

จากการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะ กับขนาดและลักษณะรูปร่างเฉพาะของต่อม่อ รวมทั้งตัวแปรการไหลต่างๆ ได้สรุปโดยเรียงตามปีการศึกษา ดังรายละเอียดในตาราง จ-2

3. การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการควบคุมความลึกหลุมกัดเซาะ

เนื่องจากความลึกหลุมกัดเซาะทำให้เสถียรภาพของโครงสร้างฐานรากลดลง จึงมีผู้สนใจที่จะพยายามควบคุมและลดความลึกหลุมกัดเซาะลง เช่น การใช้หินทิ้ง (riprap) หรือแหวนสวมต่อม่อ (collar) เพื่อเสริมสร้างเสถียรภาพให้กับโครงสร้างฐานรากที่มีความเสี่ยงต่อการกัดเซาะ โดยมีผู้ศึกษาสรุปเรียงตามปีการศึกษา ดังรายละเอียดในตาราง จ-5

ตาราง จ-1 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับกลไกของกระบวนการกัดเซาะ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Schwind, 1962	ความเร็วกระแส น้ำที่มีผลต่อความลึก หลุมกัดเซาะ	ทดลองกระแส น้ำที่ค่า Reynolds number ต่างๆ	กระแส น้ำที่ค่า Reynolds number บางช่วง ระบบม้วนวนรูปเกือกม้าจะก่อตัวขึ้น และทิ้งห่างเป็นระยะ คล้ายหยอยทาก จำนวนมากเกาะและคลานไปตามผิว ต่อม่อ
Shen และ คณะ, 1966	พฤติกรรมกระแสน้ำวนที่เกิดจาก ต่อม่อ	ทดลองและสังเกต พฤติกรรมของกระแสน้ำวนรอบ ต่อม่อ	ต่อม่อที่ไม่ปรากฏระบบม้วนวนรูปเกือกม้า หลุมกัดเซาะรอบ ต่อม่อจะไม่ปรากฏ แต่จะปรากฏหลุมกัดเซาะทางด้านท้ายน้ำหลัง ต่อม่อ ซึ่งเป็นผลจากระบบม้วนวนตามแนว การไหล (wake-vortex system)
Petryk , 1969	ศึกษาถึงการไหล รอบ ต่อม่อ ทรงกระบอก	ทดลองและสังเกตการ ไหลของกระแสน้ำที่เข้า ปะทะกับ ต่อม่อ	การไหลที่เข้าปะทะกับ ต่อม่อ จะเกิดการ ไหลพุ่งลงด้านล่าง การไหลดังกล่าวมี ความเร็วที่ไม่สม่ำเสมอ ส่วนทางด้านหลัง ต่อม่อ ความดันที่ผิวท้องน้ำจะสูงกว่าความดันที่ก้นหลุม
Melville, 1975	ความลึกกัดเซาะที่ ต่อม่อ ทรงกระบอก	วัดค่าความเร็วกระแสน้ำ ทิศทางการไหล การแกว่ง ตัวของการไหลปั่นป่วน และค่าความเค้นเฉือน	การไหลพุ่งลงในแนวตั้งที่มีกำลังมากจะ ก่อให้เกิดหลุมกัดเซาะที่กว้าง เป็นผลจาก ขนาดของการม้วนวนรูปเกือกม้าที่เพิ่มขึ้น อย่างรวดเร็วและความเร็วใกล้กันหลุม ลดลง อัตราการเพิ่มขึ้นของการม้วนวนนี้จะ เข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อเป็นสภาวะสมดุล
สมรักษ์ ต่อวงศ์ ไพชญนต์, 1984	การกัดเซาะของน้ำ ต่อ ต่อม่อ สะพาน และ ท่อลอด	เก็บข้อมูลการวิบัติของ สะพานและท่อลอดที่ เกิดขึ้นจริงในประเทศไทย ช่วงปี พ.ศ. 2520-2526 ของสะพาน 4 แห่ง และการวิบัติของท่อลอด 57 แห่ง	การวิบัติของสะพานส่วนใหญ่มีสาเหตุหลัก จาก การกัดเซาะรอบ ต่อม่อ สะพาน อัน เนื่องมาจากการศึกษาออกแบบด้านชล ศาสตร์และอุทกวิทยาที่ไม่เพียงพอ

ตาราง ๑-1 (ต่อ) การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับกลไกของกระบวนการกัดเซาะ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Dargahi, 1990	ศึกษาถึงกลไกที่ควบคุมการกัดเซาะเฉพาะแห่ง	ทดลองในรางน้ำยาว 22 ม. กว้าง 1.5 ม. และ ลึก 0.65 ม. ใช้ทรายขนาด $d_{50} = 0.36$ มม. ในสภาวะการไหลของน้ำที่ไม่มีตะกอนปน โดยวัดความเร็วการไหลและการเคลื่อนที่ของเส้นกระแส น้ำ รวมทั้งความลึกกัดเซาะสูงสุด	กลไกของการเกิดเซาะเกิดจากการไหลที่แยกตัวออกเป็น 3 มิติ ทางด้านต้นน้ำของตอม่อ การกัดเซาะจะปรากฏขึ้นครั้งแรกตามแนวกระแสน้ำทางด้านท้ายน้ำของตอม่อ แต่โดยสาเหตุหลักแล้วเกิดจากระบบม้วนวนรูปเกือกม้าทางด้านผิวดันน้ำของตอม่อ และยังเสนอต่ออีกว่า การสวมแหวนรอบตอม่อไม่สามารถป้องกันระบบการไหลม้วนวนทั้งสองได้
Graf และ Istiarto, 2002	รูปแบบการไหลภายในหลุมกัดเซาะรอบตอม่อทรงกระบอก	ทดลองในรางน้ำเปิดยาว 29 ม. กว้าง 2.45 ม. ใช้ทรายขนาด $d_{50} = 2.1$ มม. การทดลองจะวัดเวกเตอร์ความเร็ว 3 ทิศทาง ภายในหลุมกัดเซาะที่เข้าสู่สมดุล	ผลจากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้ <ul style="list-style-type: none"> - ผิวดม่อทางด้านต้นน้ำจะเกิดการไหลม้วนวนรูปเกือกม้าที่มีกำลังแรงมาก ซึ่งจะเกิดตรงกันหลุมกัดเซาะ ส่วนผิวดม่อทางด้านท้ายน้ำจะเกิดการไหลย้อนกลับที่ผิวน้ำ แต่จะเป็นไปอย่างช้าๆ - ภายในหลุมกัดเซาะ ค่าความเค้นเฉือนที่ท้องน้ำมีแนวโน้มลดลง เมื่อเทียบกับค่าความเร็วการไหล - ความปั่นป่วนของพลังงานจลน์มีกำลังมากที่กันหลุมกัดเซาะทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง

ตาราง จ-1 (ต่อ) การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับกลไกของกระบวนการกัดเซาะ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Dey และ Raikar, 2007	ลักษณะของการ ม้วนวนรูปเกือกม้า ในหลุมกัดเซาะ รอบตอม่อ	ทดลองในรางน้ำเปิดยาว 15 ม. กว้าง 0.9 ม. ใช้ ทรายขนาดสม่ำเสมอ d_{50} = 0.81 มม. วัดค่า ความเร็วกระแสน้ำใน หลุมกัดเซาะโดยใช้ Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)	ความเร็วภายในหลุมกัดเซาะจะก่อตัวเป็น การม้วนวนรูปเกือกม้า ความเร็วการไหล พุ่งลงด้านล่างที่มีค่ามากที่สุดประมาณ 0.6 เท่าของความเร็วกระแสน้ำ การม้วนวนรูป เกือกม้าจะลดลงเมื่อเคลื่อนตัวไปทางด้าน ท้ายน้ำของหลุมกัดเซาะ และจะเพิ่มขึ้นเมื่อ ขนาดของหลุมกัดเซาะใหญ่ขึ้น ซึ่งสามารถ คำนวณได้จากทฤษฎีของ Stokes

ตาราง ๑-2 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่างๆ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Chitale, 1941	อิทธิพลการกัดเซาะทางด้านต้นน้ำและขนาดของทรายต่อการกัดเซาะรอบตอม่อ	ใช้แบบจำลองตอม่อรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ายาว 0.925 ฟุต กว้าง 0.6 ฟุต และรูปทรงครึ่งวงกลม ใช้วัสดุท้องน้ำเป็นทราย ขนาดสม่ำเสมอ 0.16, 0.24, 0.32, 0.51 และ 0.68 มม. ที่อัตราการไหลคงที่ 1 ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที และความลึกการไหล 0.5-1.45 ฟุต ภายใต้สภาวะการไหลที่ไม่มีตะกอนปน	1. การไหลในแนวแกนนอน ความลึกการกัดเซาะสูงสุดเกิดขึ้นที่สันตอม่อ การกัดเซาะที่ด้านข้างของตอม่อจะน้อยกว่าที่สันตอม่อ ประมาณ 5-15% 2. อัตราส่วนระหว่างความลึกกัดเซาะสูงสุดกับความลึกการไหลในรางน้ำแสดงด้วยความสัมพันธ์อย่างง่ายของความเร็วใกล้หลุมกัดเซาะของรางน้ำ 3. ความลึกหลุมกัดเซาะสมมูลที่ได้ เป็นความสัมพันธ์ของความลึกการไหล (y) และฟรูดนัมเบอร์ของการไหล (F_r) ดังสมการ $\frac{d_{se}}{y} = 0.51 + 6.65F_r - 5.49F_r^2$ d_{se} คือ ความลึกกัดเซาะสมมูลภายใต้ท้องน้ำปกติ y คือ ความลึกของน้ำในหลุมกัดเซาะ และ F_r คือ ฟรูดนัมเบอร์ของการไหล
Laursen, 1954	ผลกระทบของทางน้ำและลักษณะของวัสดุท้องน้ำต่อการกัดเซาะ	ทำการศึกษาในแบบจำลองทางน้ำเปิดที่ความลึกการไหล ความเร็วการไหล และขนาดวัสดุท้องน้ำขนาดต่างๆ	ผลการศึกษาพบว่า หลังเวลาผ่านไปจนกระทั่งการกัดเซาะเข้าสู่สมมูลได้วัดค่าความลึกการกัดเซาะ โดยความลึกการกัดเซาะสมมูลไม่ขึ้นกับความเร็วกการไหลหรือขนาดวัสดุท้องน้ำ แต่ขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของตอม่อและความลึกการไหล
Laursen และ Toch, 1956	เกณฑ์การออกแบบสำหรับการกัดเซาะสูงสุดของทางน้ำ	ทดลองภายใต้สภาวะที่ไม่มี การเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ	ได้ความสัมพันธ์เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ออกแบบสำหรับการกัดเซาะ ดังนี้ $\frac{d_s}{D} = 1.35 \left(\frac{y}{D} \right)^{0.3}$ เมื่อ d_s คือ ความลึกกัดเซาะสูงสุด ; y คือ ความลึกการไหล ; D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตอม่อ

ตาราง ๑-2 (ต่อ) การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่างๆ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Chabert และ Engeldinger , 1956	ศึกษาการกัดเซาะรอบตอม่อต่อตัวแปรต่างๆ	กำหนดตัวแปร คือ ความเร็วการไหล, ขนาดตอม่อ (2.5-30 ซม.), ความลึกการไหล (0.1-0.35 ม.), ขนาดวัสดุท้องน้ำ (0.26, 0.52, 1.5 และ 3.0 มม.) และลักษณะตอม่อ	พบว่า อิทธิพลของความเร็วการไหลจะแบ่งออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงที่ความเร็วการไหลต่ำกว่าความวิกฤติที่ทำให้วัสดุท้องน้ำเริ่มต้นเคลื่อนที่ ซึ่งก็คือสภาวะที่ไม่มีเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และช่วงความเร็วการไหลที่มากกว่าความเร็ววิกฤติ ซึ่งก็คือสภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ความเร็วการไหลมากกว่าความเร็ววิกฤติจะมีความลึกการกัดเซาะเพิ่มขึ้นและลดลงตามการเคลื่อนที่ของสันทราย (dunes) โดยที่ค่าความลึกการกัดเซาะสูงสุดจะเกิดขึ้น เมื่อความเร็วการไหลเท่ากับความเร็ววิกฤติ
Larras, 1963	พฤติกรรมการกัดเซาะรอบตอม่อขนาดต่างๆ	ทดลองภายใต้สภาวะท้องน้ำที่ไม่มีเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตอม่อต่างๆ โดยไม่คิดผลของความลึกการไหลและขนาดวัสดุท้องน้ำ	ความลึกการกัดเซาะสูงสุดเมื่อความเร็วการไหลเข้าใกล้ความเร็วที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำ (threshold velocity) เป็นฟังก์ชันกับเส้นผ่านศูนย์กลางตอม่อ โดยไม่คิดผลของความลึกการไหลและขนาดวัสดุท้องน้ำ ดังนี้ $d_s = 1.42KD^{0.75}$ <p>โดย D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตอม่อ และ K คือ ตัวคูณปรับแก้เนื่องจากลักษณะของตอม่อ ($K = 1$ สำหรับตอม่อทรงกระบอก, $K = 1.4$ สำหรับตอม่อรูปทรงเหลี่ยม) และตอม่อมีมุมปะทะการไหลเท่ากับ 0°</p>
Shen et al., 1966	พฤติกรรมการกัดเซาะ โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพของตอม่อรูปทรงกระบอก	ใช้ตอม่อขนาด 0.15 และ 0.9 ม. กับวัสดุท้องน้ำที่เป็นทรายขนาด 0.24 และ 0.46 มม.	พบว่าความลึกการกัดเซาะมีความสัมพันธ์กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ ($R_p = UD/\nu$) ดังนี้ $d_s = 0.00022R_p^{0.619}$ <p>เมื่อ d_s คือ ความลึกการกัดเซาะมีหน่วยเป็นเมตร และ R_p คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ</p>

ตาราง ๑-2 (ต่อ) การศึกษาที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่างๆ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Basak et al., 1975	พฤติกรรมการกัดเซาะโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	ใช้ตอม่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.04-0.5 ม. และตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 0.24x0.04 และ 0.12x0.04 เมตร ที่มีวัสดุท้องน้ำเป็นทรายหยาบขนาดเฉลี่ย 0.65 มม. ในสภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ	จากผลการทดลองตอม่อรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกัดเซาะ (d_s) มีหน่วยเป็นเมตร กับขนาดตอม่อ (D) ดังนี้ $d_s = 0.558D^{0.586}$ ความลึกการกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นกับขนาดของตอม่อที่เพิ่มขึ้น เมื่อทดลองวางตอม่อรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเรียงเป็นตับ มีอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตอม่อกับความกว้างเท่ากับ 4 พบว่าความลึกการกัดเซาะจะมากที่สุดที่ตอม่อตัวแรก ส่วนตอม่อตัวถัดมาจะมีความลึกกัดเซาะลดลง กรณีตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพบว่า ที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 0° ความลึกการกัดเซาะจะไม่เพิ่มขึ้นตามความยาวของตอม่อ แต่ถ้ามุมปะทะการไหลเพิ่มขึ้นจนถึง 90° ความลึกการกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นตามความยาวของตอม่อ
Chen, A-Han, 1980	ทดลองหาขนาดของหลุมกัดเซาะรอบตอม่อทรงกระบอก	ใช้ทราย 2 ขนาด คือ $d_{50} = 0.30$ และ 1.12 มม. และใช้ตอม่อทรงกระบอก 3 ขนาด ทดลองภายใต้สภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ	แสดงให้เห็นว่าขนาดวัสดุท้องน้ำมีผลกระทบต่อความลึกหลุมกัดเซาะ ซึ่งขัดแย้งกับผลการศึกษาของหลายท่านที่ผ่านมา เช่น Palmer (1969), Ting (2001)
Ettema, 1980	อิทธิพลที่มีต่อการกัดเซาะรอบตอม่อ	ทดลองถึงการกัดเซาะรอบตอม่อ ภายใต้สภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ	ความลึกการกัดเซาะจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนความเร็วเฉือนต่อความเร็วเฉือนวิกฤต (U/U_c) ประมาณเท่ากับ 0.5 และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนมีค่าความลึกการกัดเซาะสูงสุด เมื่อค่า $U/U_c = 1$ และยังเสนอว่า ถ้าอัตราส่วนความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ (y/D) มากกว่า 3 ความลึกการไหลจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความลึกกัดเซาะ

ตาราง ๑-2 (ต่อ) การศึกษาที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่างๆ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Ruadkivi และ Ettema, 1983	การกัดเซาะรอบตอม่อทรงกระบอก	ทดลองภายใต้สภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ โดยใช้ตอม่อขนาด 28.5, 50.8, 101.6, 150.0 และ 240.0 มม. วัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาด 0.24 – 0.78 มม. มีความลึกการไหลคงที่ 600 มม. และใช้อัตราส่วนความเร็วเฉือนต่อความเร็ววิกฤตประมาณ 0.90	จากการทดลองพบว่า ความลึกหลุมกัดเซาะขึ้นกับการกระจายตัวของวัสดุท้องน้ำ ขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ ขนาดตอม่อ และความลึกการไหล
Jones, 1983	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ (d_s/D) และความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ (y/D)	รวบรวมข้อมูลของผู้วิจัยหลายๆ ท่าน ไว้ในรูปเดียวกัน ดังรูป ๑-1	เนื่องจากสมการที่ใช้ประมาณความลึกกัดเซาะแต่ละสมการได้มาจากเงื่อนไขที่แตกต่างกัน บางสมการมีความเร็วการไหลที่อยู่ในรูปฟรูดนัมเบอร์ ในขณะที่บางสมการไม่มีความเร็วการไหลในการเปรียบเทียบจึงกำหนดให้ใช้ค่าฟรูดนัมเบอร์เท่ากับ 0.3 สำหรับสมการที่มีความเร็วการไหลเป็นตัวแปรต้น
Sin Zee Chang, 1987	ศึกษาขนาดของหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ในรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า	ทดลองในกรณีที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ใช้วัสดุท้องน้ำเป็นทราย 3 ขนาด คือ $d_{50} = 0.97, 0.43$ และ 0.19 มม. และใช้ตอม่อ 2 แบบ คือ รูปทรงกระบอก และรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน	จากการศึกษาพบว่า พื้นที่หลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหล ลักษณะการไหล รูปแบบตอม่อ และขนาดวัสดุท้องน้ำ

ตาราง ๑-2 (ต่อ) การศึกษาที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่างๆ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Melville และ Dongol, 1992	หาความลึกหลุมกัดเซาะในกรณีที่มีสวะมาเกาะอยู่เหนือตอม่อสะพาน	ทดลองบนรางน้ำสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 1.52 ม. สูง 1.22 ม. ยาว 45 ม. ใช้ทรายขนาด $d_{50} = 1.65$ มม. ความลึกการไหล 100-130 มม. ตอม่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 58 มม. ดังรูป ๑-2	ความลึกหลุมกัดเซาะจะมากกว่าในกรณีที่ไม่มีการสวะมาเกาะเหนือตอม่อสะพาน ผลที่ได้จากการทดลองได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง d_s/D และ y/D กับ d_s/D_0 และ y/D_0 ดังแสดงในรูป ๑-3 และ ๑-4
Vittal, Kothari และ Haghghat, 1994	ทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อ 3 ต้น ที่จัดเป็นกลุ่ม	ทดลองภายใต้สภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอน ท้องน้ำในอัตราการไหลต่ำ โดยใช้วัสดุท้องน้ำเป็นทราย 4 ขนาด ได้แก่ 0.775, 1.183, 1.543 และ 1.844 มม. โดยตอม่อกลุ่มทำมุมกับการไหล 0° , 15° , 30° , 45° และ 60°	พบว่าลักษณะตอม่อที่จมน้ำ (full pier group) จะมีอัตราการกัดเซาะลดลงประมาณ 40-75% เมื่อเทียบกับตอม่อจมน้ำบางส่วน (partial pier group) และตอม่อที่วางทำมุม 30° กับทิศทางการไหลจะให้ความลึกการกัดเซาะต่ำสุด
Paggy A. Johnson, 1995	เปรียบเทียบความลึกกัดเซาะที่ประมาณได้จากสมการกับข้อมูลภาคสนาม	เปรียบเทียบสมการประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะ 7 สมการ และความลึกหลุมกัดเซาะที่เก็บวัดจริง โดยอาศัยข้อมูลภาคสนามในการคำนวณค่าความลึกหลุมกัดเซาะ	สมการที่ถูกสร้างขึ้น อาศัยข้อมูลส่วนใหญ่ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ และข้อมูลภาคสนามบางส่วน ทำให้ยังไม่สามารถใช้สมการใดสมการหนึ่งในการประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเงื่อนไขแวดล้อมที่ต่างกันออกไปได้อย่างเหมาะสม จึงได้เสนอแนะให้มีการศึกษาวิจัยกระบวนการกัดเซาะกรณีความเร็วการไหลเข้าใกล้วิกฤต และศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตอม่อกับความลึกการไหลในช่วงน้ำตื้น รวมทั้งควรมีการเฝ้าติดตามและเก็บวัดข้อมูลการกัดเซาะจากภาคสนาม

ตาราง จ-2 (ต่อ) การศึกษาที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่างๆ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
พรมงคล ชิดชอบ, 1997	ทำการศึกษา การกัดเซาะรอบ ตอม่อสะพาน โดยใช้ แบบจำลองทาง กายภาพ	ทดลองในรางน้ำเปิด สี่เหลี่ยมผืนผ้า กับวัสดุ ท้องน้ำเป็นทราย นำมา คละกัน ในสภาวะที่มีการ เคลื่อนที่ของตะกอนท้อง น้ำ กับตอม่อทรงกระบอก ขนาด 2.50, 5.00 และ 7.50 ซม. และในสภาวะที่ ไม่มีการเคลื่อนที่ของ ตะกอนท้องน้ำ โดยใช้ แบบจำลองตอม่อรูป สี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน ที่ อัตราส่วนความกว้างต่อ ความยาวต่างๆ รวมทั้ง ศึกษาลักษณะของหลุม กัดเซาะเนื่องจากมุม ปะทะการไหล 0°, 30° และ 60° ของตอม่อรูป สี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน	จากการศึกษาพบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อหลุม กัดเซาะ ในสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของ ตะกอนท้องน้ำ ได้แก่ รูปร่าง ขนาด มุมปะทะ การไหล ความลึกการไหล ความเร็วเฉลี่ยการ ไหล ขนาดวัสดุท้องน้ำ และการกระจายตัวของ วัสดุท้องน้ำ และในสภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของ ตะกอนท้องน้ำ ได้แก่ รูปร่าง ขนาด มุมปะทะ การไหล ของตอม่อ และวัสดุท้องน้ำ
Ettema, Melville และ Barkdoll, 1998	ใช้แบบจำลอง ทางกายภาพ ศึกษาผลจาก การย่อส่วน ตอม่อใน แบบจำลองที่มี ต่อความลึก หลุมกัดเซาะ	ทดลองในรางน้ำเปิด สี่เหลี่ยมผืนผ้า กับวัสดุ ท้องน้ำเป็นทรายที่มีขนาด สม่ำเสมอ ทดลองภายใต้ สภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ ของตะกอน ใช้ตอม่อ ทรงกระบอกที่มีขนาด แตกต่างกัน 8 ขนาด	จากการศึกษาพบว่าผลจากการย่อส่วน แบบจำลอง ในการทดลองการกัดเซาะเฉพาะ แห่งในรางน้ำเปิดจะให้ความลึกหลุมกัดเซาะที่ มากกว่าที่เกิดขึ้นจริงในแม่น้ำ ทำให้การ ประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะจากสมการที่ ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าที่เกิดขึ้นจริง

ตาราง จ-2 (ต่อ) การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่างๆ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Jones และ Sheppard, 1998 (พัฒนาต่อจาก Richardson et al., cited in FHWA, (1993), (1995))	การกัดเซาะรอบตอม่อที่มีโครงสร้างประกอบที่ซับซ้อน เนื่องจากการกระทำของกระแสน้ำ	ทำการออกแบบการทดลองเป็น 3 กรณีคือ 1.กรณีผลของ pier stem 2.กรณีผลของ pile group 3.กรณีผลของ pile cap ภายใต้การกระทำของกระแสน้ำอย่างเดียว	ได้ความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะของแต่ละส่วนโครงสร้าง ดังสมการ $y_s = y_{Spier} + y_{Spc} + y_{Spg}$ และได้ค่าปรับแก้ต่างๆดังแสดงในรูป จ-5 รูป จ-6 รูป จ-7 เพื่อคำนวณการออกแบบโครงสร้างตอม่อส่วนต่างๆตามสมการจากผลการศึกษาของ FHWA หรือที่เรียกว่า HEC-18 equation
ธรรมวัฒน์ การุณธนกุล, 1998	การกัดเซาะรอบตอม่อสะพานที่เรียงเป็นดับในรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า	ใช้ทราย 3 ขนาด ได้แก่ ทรายละเอียด $d_{50}=0.36$ มม. ทรายปานกลาง $d_{50}=1.20$ มม. และทรายหยาบ $d_{50}=2.20$ มม. เป็นวัสดุท้องน้ำ ทำการศึกษาสภาวะที่มีและไม่มีกระแสที่ของวัสดุท้องน้ำ ใช้ตอม่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.8 ซม. วางเรียงกัน 3 ตัว ระยะห่าง $L/D = 1, 2, 3$ วางทำมุมกับการไหลเท่ากับ 0, 20 และ 40 องศา	ความลึกหลุมกัดเซาะของตอม่อตัวแรกจะมากที่สุด และความลึกหลุมกัดเซาะของตอม่อตัวที่ 2 และ 3 จะลดลงตามลำดับ และขนาดของวัสดุท้องน้ำมีผลต่อความลึกหลุมกัดเซาะ โดยวัสดุท้องน้ำที่มีขนาดใหญ่จะมีความลึกหลุมกัดเซาะน้อยกว่า สำหรับเงื่อนไขชลศาสตร์เดียวกัน

ตาราง จ-2 (ต่อ) การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่างๆ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Melville และ Chiew, 1999	ศึกษาเวลาที่ใช้ทำให้เกิดหลุมกัดเซาะสมดุ	หลักการทดลอง กำหนดให้เวลาที่ทำให้เกิดความลึกหลุมกัดเซาะไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตอม่อในเวลา 24 ชั่วโมงคือ equilibrium time: t_0 โดยศึกษาในกรณีไม่มีการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำและวัสดุท้องน้ำมีขนาดสม่ำเสมอ	ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $\frac{d(d_{sc})}{dt} \leq \frac{0.05D}{24h}$ และจากการศึกษาสรุปได้ดังนี้ 1. ความลึกสมดุของหลุมกัดเซาะเมื่อเทียบกับเวลาแสดงได้ดังรูป จ-8 2. ความลึกหลุมกัดเซาะเมื่อทำการทดลองผ่าน 10 เปอร์เซ็นต์ของเวลาที่ทำให้เกิดความลึกหลุมกัดเซาะสมดุจะอยู่ในระหว่าง 50 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ของความลึกหลุมกัดเซาะสมดุโดยขึ้นอยู่กับความเร็วการไหล
เอกนันท์ ตั้งธีระสุนันท์, 2001	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ ศึกษา ผลของความขรุขระของผิวตอม่อที่มีต่อหลุมกัดเซาะ	ใช้แบบจำลองตอม่อทรงกระบอก 3 ขนาด ได้แก่ 3.40, 4.80 และ 6.00 ซม. กับวัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอ 3 ขนาด คือ 0.36, 1.20 และ 2.20 มม. โดยจำลองลักษณะความขรุขระของตอม่อ 3 ขนาด คือ 0.0883, 0.1178, และ 0.4416 มม. ในสภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และมีสภาพการไหลได้วิกฤติ	ความลึกกัดเซาะมีความสัมพันธ์กับความลึกการไหล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตอม่อ เรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ ฟรูดนัมเบอร์ และค่าความขรุขระของตอม่อ โดยที่ขนาดหลุมกัดเซาะของตอม่อที่ผิวมีความขรุขระมาก จะมากกว่าขนาดหลุมกัดเซาะของตอม่อที่ผิวมีความขรุขระน้อย
Francis et al., 2001	ศึกษาการกัดเซาะรอบตอม่อทรงกระบอก ในวัสดุท้องน้ำที่เป็นดินเหนียว	ทดลองเพื่อเปรียบเทียบความลึกกัดเซาะระหว่างวัสดุท้องน้ำที่เป็นทรายกับดินเหนียว	อัตราการกัดเซาะของวัสดุท้องน้ำที่เป็นดินเหนียวจะช้ากว่าทราย แต่เมื่อเข้าสู่ความลึกการกัดเซาะสมดุจะให้ค่าความลึกกัดเซาะที่เหมือนกัน และยังพบว่ารูปร่างของหลุมกัดเซาะมีความสัมพันธ์กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ

ตาราง ๑-2(ต่อ) การศึกษาที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่างๆ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Richardson, 2001 (FHWA HEC-18)	ศึกษาเพื่อ ทำนายความลึก หลุมกัดเซาะ	ทำการทดลองโดยใช้ แบบจำลอง กรณีวัสดุท้อง น้ำเป็นทราย	ได้ความสัมพันธ์เป็นสมการเพื่อประมาณความ ลึกหลุมกัดเซาะซึ่งเรียกว่าสมการ HEC-18 equation ดังนี้ $\frac{d_s}{D} = 2.0K_1K_2K_3K_4 \left[\frac{y}{D} \right]^{0.35} Fr^{0.43}$ โดยที่ d_s คือความลึกหลุมกัดเซาะ y คือความ ลึกการไหล D คือขนาดตอม่อ Fr คือค่าฟรูดนัม เบอร์ การไหล K_1 คือค่าปรับแก้เนื่องจาก รูปแบบของตอม่อ K_2 คือค่าปรับแก้เนื่องจากมุม ปะทะการไหล K_3 คือค่าปรับแก้เนื่องจากสภาพ ท้องน้ำ K_4 คือค่าปรับแก้เนื่องจาก armoring effect ดังตาราง ๑-3 ตาราง ๑-4 และรูป ๑-9
Sheppard, 2004	การกัดเซาะรอบ ตอม่อในสภาวะ ไม่มีการ เคลื่อนที่ของ ตะกอนท้องน้ำ	ทำการทดลองในรางน้ำ ขนาดใหญ่กว้าง 6.1 ม. ลึก 6.4 ม. ยาว 38.4 ม. โดยใช้ตอม่อทรงกระบอก ขนาด 0.114, 0.305 และ 0.914 ม. และใช้วัสดุท้อง น้ำขนาด 0.22, 0.8 และ 2.9 มม. เปลี่ยนแปลง ความลึกการไหลและ ความเร็วการไหล	พบว่าได้ความสัมพันธ์ของหลุมกัดเซาะกับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตอม่อ ดังสมการ $\frac{d_{se}}{D} = 2.5f_1 \left[\frac{y_0}{D} \right] f_2 \left[\frac{V}{V_c} \right] f_3 \left[\frac{D^*}{D_{50}} \right]$ โดยที่ D^* คือ ขนาดประสิทธิผลของตอม่อ

ตาราง จ-2 (ต่อ) การศึกษาที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่างๆ

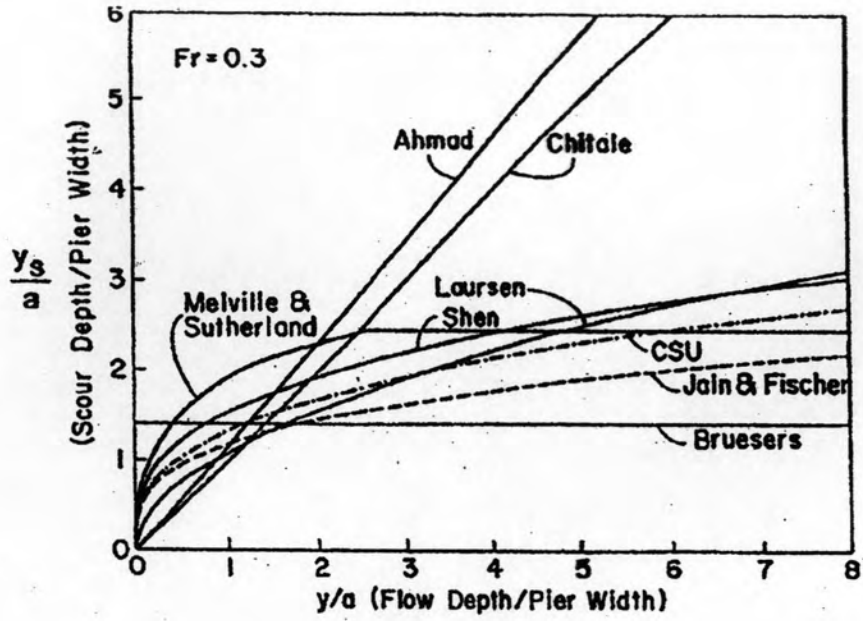
ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Jones และ Sheppard, 2004	การกัดเซาะรอบตอม่อสะพานที่มีความกว้างมากๆ	รวบรวมข้อมูลการศึกษาจากการทดลองของนักวิจัยหลายๆคนมาทำการวิเคราะห์ เปรียบเทียบและสรุป	<p>เนื่องจากสมการ HEC-18 ให้ค่าที่สูงเกินไป ดังนั้นการวิเคราะห์จึงเริ่มต้นจากสมการ HEC-18 คือ</p> $\frac{d_s}{D} = 2.0K_1K_2K_3K_4 \left[\frac{y}{D} \right]^{0.35} Fr^{0.43}$ <p>เมื่อตอม่อมีความกว้าง $y/b < 0.8$ และ $Fr < 0.8$ พบว่ารูปสมการเดิมจะเปลี่ยนไปเป็น</p> $\frac{d_s}{D} = 2.08K_1K_2K_3K_4 \left[\frac{y}{D} \right]^{0.35} Fr^{0.43}$ <p>และจากนั้นมีการพัฒนาสมการใหม่โดยเพิ่มตัวคูณลดความลึกหลุมกัดเซาะ</p> $K_w = 1.04 \left[\frac{b}{y} \right]^{0.15} Fr^{0.21}$ <p>เข้าไปในสมการเดิมข้างต้น สรุปคือเมื่อตอม่อมีความกว้างเทียบกับความลึกน้ำ (y/b) มีค่าน้อยๆ จะส่งผลให้เกิดการกัดเซาะลดลง</p>

ตาราง ๑-2 (ต่อ) การศึกษาที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่างๆ

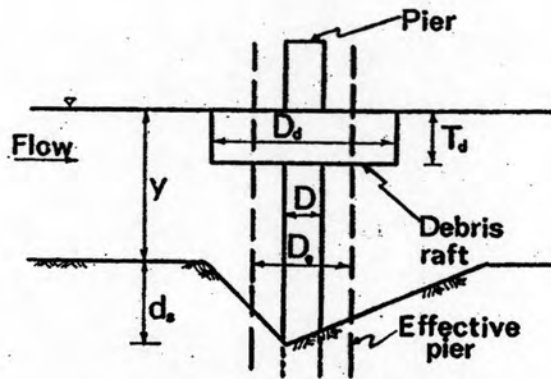
ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Ashtiani และ Beheshti, 2006	การกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มแบบต่างๆในสภาวะการไหลไม่มีตะกอนปน	ทำการทดลองภายใต้การไหลคงที่ไม่มีตะกอนปน แบ่งการทดลองตามรูปแบบกลุ่มเสาเข็ม และเปลี่ยนแปลงระยะห่างของเสาเข็มในแต่ละรูปแบบทดลอง ดังรูป ๑-10 ที่อัตราการไหลต่างๆ และขนาดของตะกอนต่างๆ	ผลการทดลองพบว่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบกลุ่มเสาเข็มบางกรณีศึกษาที่มีความลึกถึงสองเท่าของกรณีเสาเข็มเดี่ยวๆ จากผลการทดลองที่ได้นำมาหาค่าแฟกเตอร์เพิ่มเติมจากสมการของ HEC-18 และ New Zealand เนื่องจากผลของการจัดกลุ่มเสาเข็ม ซึ่งได้ผลดังนี้ 1.กรณีของ HEC-18 มีสมการเดิมคือ $\frac{d_s}{D} = 2.0K_1K_2K_3K_4 \left[\frac{y}{D} \right]^{0.35} Fr^{0.43}$ ค่าแฟกเตอร์จากการทดลองนี้ นำไปเพิ่มเติมในสมการ HEC-18 คือ $K_{Gmn} = 1.11 \frac{m^{0.0396}}{n^{0.5225} [G/D]^{0.1153}}$ 2.กรณีของสมการ New Zealand มีสมการเดิมคือ $S = K_{nD} K_1 K_d K_s K_\alpha K_t$ ค่าแฟกเตอร์จากการทดลองนี้ นำไปเพิ่มเติมในสมการ New Zealand คือ $K_{Gmn} = 1.118 \frac{m^{0.0895}}{n^{0.8949} [G/D]^{0.1195}}$ โดยที่ G คือระยะห่างระหว่างเสาเข็ม, m คือจำนวนแถวของเสาเข็มตามทิศทางการไหล และ n คือจำนวนแถวของเสาเข็มตามทิศตั้งฉากการไหล

ตาราง ๑-2 (ต่อ) การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่างๆ

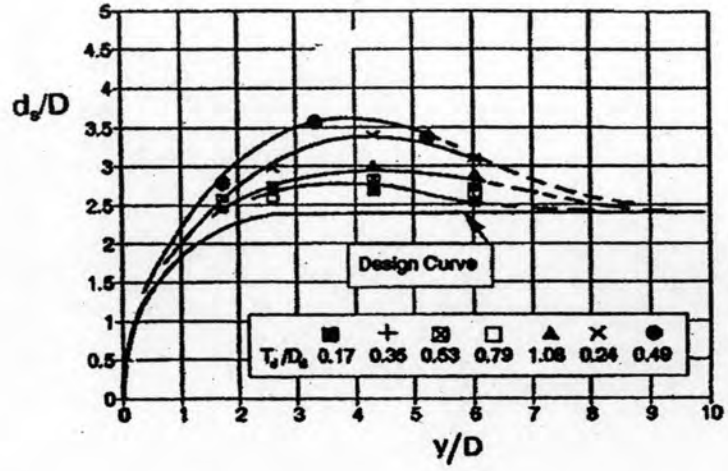
ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Dey, Raikar และ Roy, 2008	การกัดเซาะทรงกระบอกที่จมน้ำภายใต้การไหลคงที่	ทำการทดลองในรางน้ำสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 0.6 ม. ลึก 0.7 ม. ยาว 10 ม. วัสดุท้องน้ำมีขนาดสม่ำเสมอ $d_{50}=0.81$, 1.86 และ 3 มม. ภายใต้การไหลคงที่ และไม่มีการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำแบบจำลองทรงกระบอก 3 ขนาดคือ 3, 6 และ 8 ซม. ทำการทดลองที่ความลึกน้ำคงที่โดยเปลี่ยนแปลงความสูงของทรงกระบอก	ผลการทดลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนของความสูงทรงกระบอกกับความลึกน้ำ (l/h) ลดลงความลึกของหลุมกัดเซาะลดลง ซึ่งเกิดจากการม้วนวนท้ายน้ำ ไปรบกวนทำให้ลดกำลังของการม้วนวนรูปเกือกม้า ดังรูป ๑-11



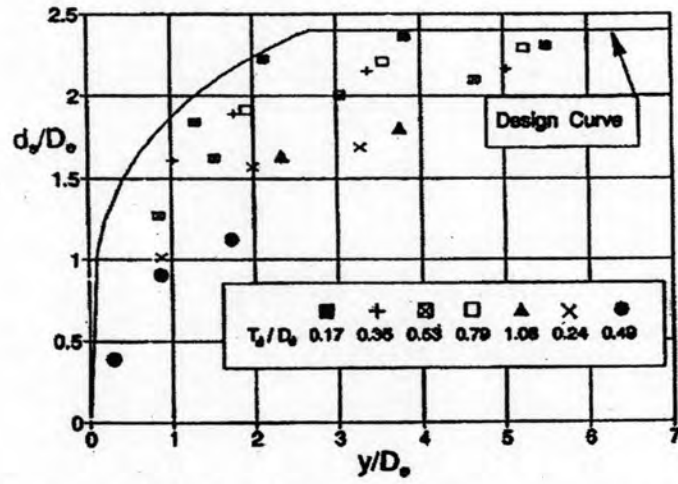
รูป จ-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อกับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ โดย Jones (1983)



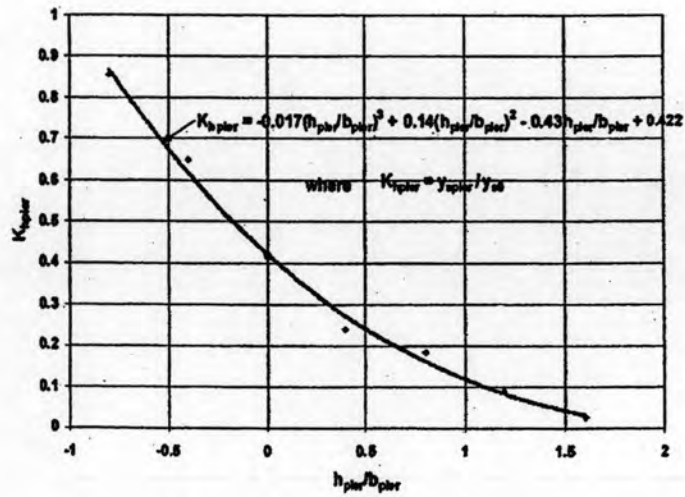
รูป จ-2 ตอม่อในการทดลองของ Melville และ Dongol (1992)



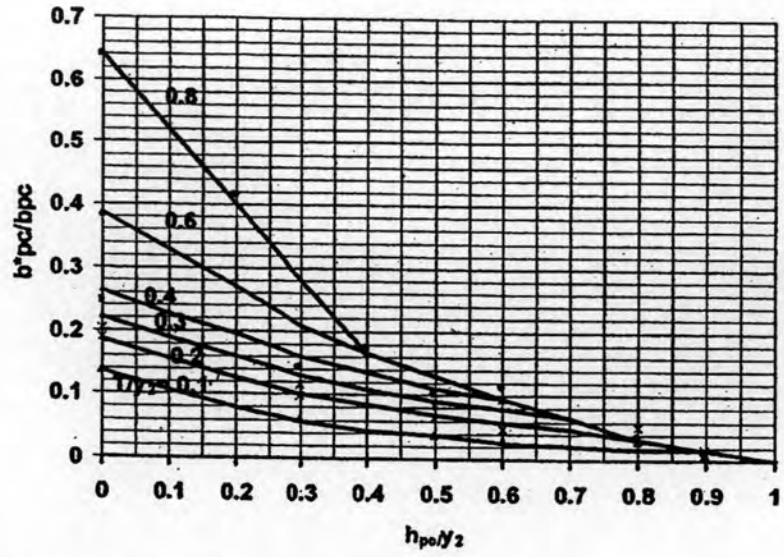
รูป จ-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง d_s/D และ y/D จาก Melville และ Dongol (1992)



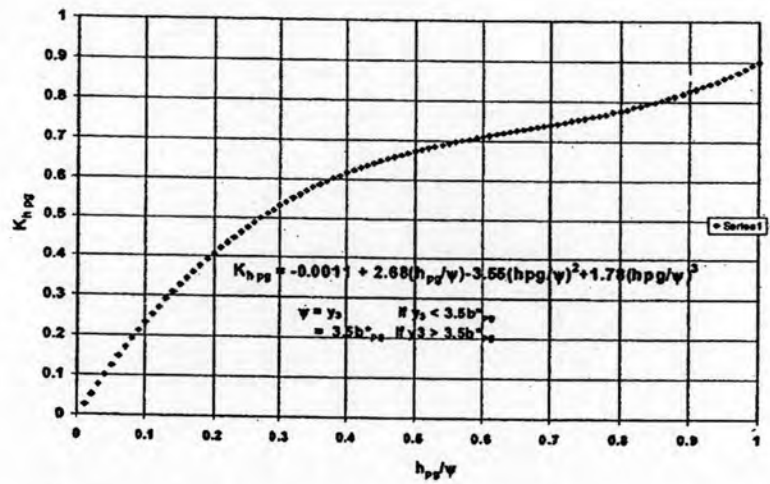
รูป จ-4 ความสัมพันธ์ระหว่าง d_s/D_c และ y/D_c จาก Melville และ Dongol (1992)



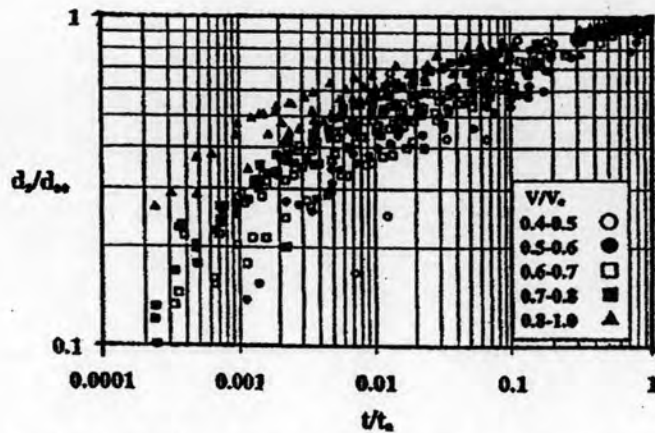
รูป จ-5 Suspended Pier Height Factor จาก Jones และ Sheppard (1998)



รูป ๑-6 Pile Cap Equivalent Solid Pier Ratio ของ Jones และ Sheppard (1998)



รูป ๑-7 Pile Group Height Factor ของ Jones และ Sheppard (1998)



รูป ๑-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง d_s/d_{sc} และ t/t_c จาก Melville และ Chiew (1999)

ตาราง จ-3 ค่าปรับแก้ K_1 , K_s และ K_2 ในสมการของ Richardson (2001) [FHWA (HEC-18)]

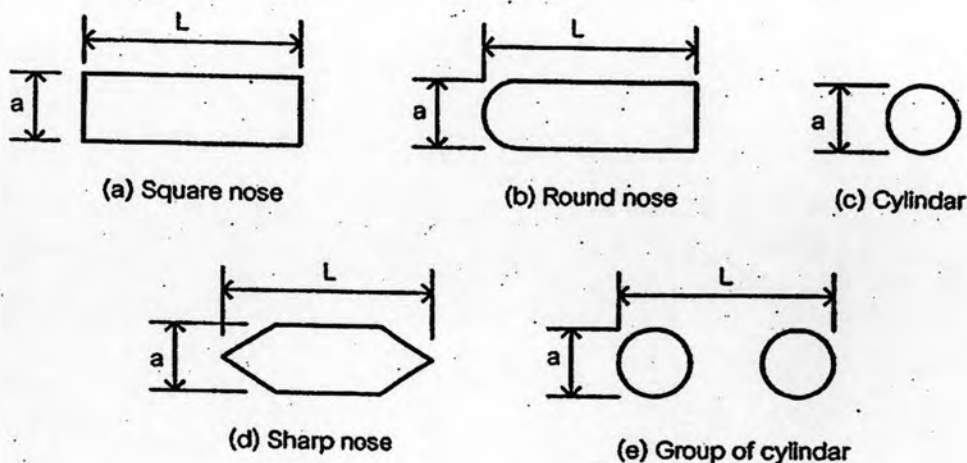
Correction Factor, for Pier Nose Shape	
Shape of Pier Nose	K_1, K_s
(a) Square nose	1.1
(b) Round nose	1.0
(c) Circular nose	1.0
(d) Group of cylinders	1.0
(e) Sharp nose	0.9

Correction Factor, K_2 , for angle of attack			
Angle	L/a = 4	L/a = 8	L/a = 12
0	1.0	1.0	1.0
15	1.5	2.0	2.5
30	2.0	2.75	3.5
45	2.3	3.3	4.3
90	2.5	3.9	5.0

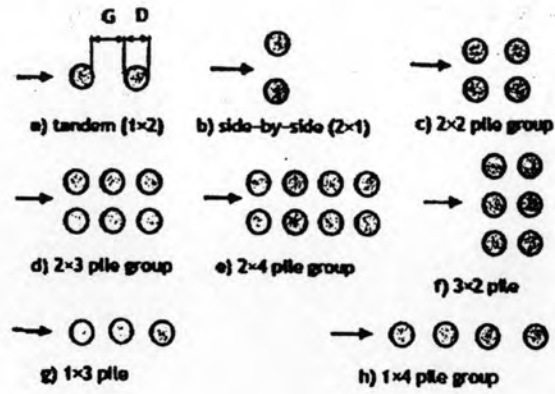
Angle = skew angle of flow
L = length of pier

ตาราง จ-4 ค่าปรับแก้ K_3 ในสมการ ของ Richardson (2001) [FHWA (HEC-18)]

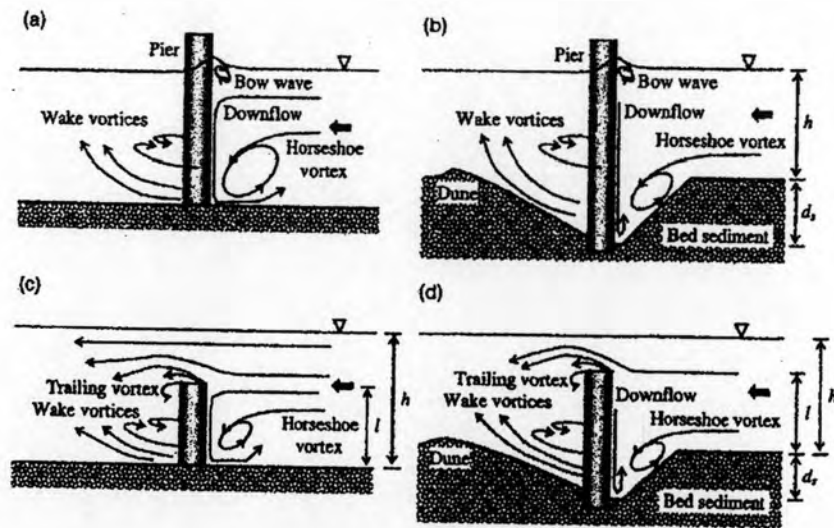
Increase in Equilibrium Pier Scour Depths, K_3 , for Bed Condition.		
Bed Condition	Dune Height (H)	K_3
Clear-Water Scour	N/A	1.1
Plane Bed and Antidune flow	N/A	1.1
Small Dunes	$3 > H \geq 0.6$	1.1
Medium Dunes	$9 > H \geq 3$	1.2 to 1.1
Large Dunes	$H \geq 9$	1.3



รูป จ-9 รูปแบบของตอม่อในสมการของ Richardson (2001) [FHWA (HEC-18)]



รูป จ-10 รูปแบบของกลุ่มเสาเข็มที่ใช้ในการทดลองของ Ashtiani และ Beheshti (2006)



รูป จ-11 ลักษณะการไหลของน้ำที่เสาทรงกระบอก จาก Dey, Raikar และ Roy (2008)

ตาราง ๑-5 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความลึกหลุมกัดเซาะ

ผู้ศึกษา, ปีการศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Cheiw, 1992	การป้องกันการกัดเซาะบริเวณตอม่อสะพาน	ทดลองในรางน้ำกว้าง 0.3 ม. ลึก 0.45 ม. ยาว 8 ม. ใช้ตอม่อทรงกระบอกขนาด 32 มม. วัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอ $d_{50}=0.33$ มม. โดยตอม่อมีการเจาะเป็นช่อง และใช้แหวนสวมรอบตอม่อภายใต้สภาวะการไหลที่ไม่มี การเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ	พบว่า การเจาะเสาดตอม่อเป็นช่องทำให้ลดการไหลพุ่งลงด้านล่างทำให้การกัดเซาะลดลงสูงสุด 20 % เมื่อความกว้างของช่องเจาะ $0.25D$ และลดลง 30 % เมื่อความกว้างของช่องเจาะ $0.5D$ เมื่อมีการใช้แหวนสวมรอบตอม่อทำให้ลดการกัดเซาะเช่นกัน
Cheiw, 1995	กลไกการวิบัติของชั้นหินทิ้ง (riprap) บริเวณตอม่อสะพาน	ทดลองในรางน้ำกว้าง 0.6 ม. ลึก 0.6 ม. ยาว 18 ม. ใช้ตอม่อทรงกระบอกขนาด 70 มม. วัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอ $d_{50}=0.96$ มม. หินทิ้ง 3 ขนาดภายใต้สภาวะการไหลที่ไม่มี การเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ	การวิบัติของชั้นหินทิ้งภายใต้สภาวะการไหลที่ไม่มี การเคลื่อนที่เป็นการวิบัติแบบ winnowing เป็นการกัดเซาะของวัสดุละเอียดจะเคลื่อนที่เข้าสู่ช่องว่างของหิน ส่งผลต่อประสิทธิภาพของชั้นหินทิ้งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหาย ป้องกันโดยเพิ่มความหนาและการจัดวางชั้นหินทิ้ง
Cheiw และ Lim, 1995	พฤติกรรมการวิบัติของชั้นหินทิ้ง (riprap) บริเวณตอม่อสะพาน	ทดลองในรางน้ำกว้าง 0.6 ม. ลึก 0.6 ม. ยาว 14 ม. ใช้ตอม่อทรงกระบอก 3 ขนาด มม. วัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอ 2 ขนาด หินทิ้ง 8 ขนาด ภายใต้สภาวะการไหลที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ	การวิบัติของชั้นหินทิ้งภายใต้สภาวะการไหลที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำมี 2 ลักษณะคือการที่หินถูกพัดพาไปกับการไหล และ การที่หินถูกฝังกลบโดยวัสดุท้องน้ำ โดยในการศึกษาพยายามหาเกณฑ์ที่ใช้แบ่งการวิบัติ และสร้างสมการความลึกของชั้นหิน

ตาราง ๑-5(ต่อ) การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความลึกหลุมกัดเซาะ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Lauchlan และ Melville, 2001	การใช้ชั้นหินทิ้ง (riprap) ในการป้องกันการกัดเซาะ บริเวณตอม่อสะพาน	ทดลองในรางน้ำกว้าง 0.6 ม. ใช้ตอม่อทรงกระบอกขนาด 70 มม. และ รางน้ำกว้าง 1.52 ม. ใช้ตอม่อ 200 มม. วัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดสม้าเสมอ $d_{50}=0.95$ มม. หินทิ้ง 2 ขนาดภายใต้สภาวะการไหลที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ	เมื่อท้องน้ำเคลื่อนที่ผ่านตอม่อจะเกิดการแกว่งตัวของระดับท้องน้ำทำให้ชั้นหินทิ้งวางตัวบนชั้นที่ไม่แน่น เมื่อท้องน้ำมีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นลอนคลื่น (dune) ทำให้เกิดความปั่นป่วนส่งผลให้ชั้นหินทิ้งเกิดยุบตัว ซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการวิบัติของชั้นหินทิ้งภายใต้สภาวะการไหลที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ
Cheiw, 2004	การกัดเซาะเฉพาะแห่งและการศึกษาเสถียรภาพของชั้นหินทิ้ง (riprap) บริเวณตอม่อสะพาน	ทดลองในรางน้ำกว้าง 0.6 ม. ลึก 0.6 ม. ยาว 18 ม. ใช้ตอม่อทรงกระบอกขนาด 50 มม. วัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดสม้าเสมอ $d_{50}=0.9$ มม หินทิ้งขนาด $d_{50}=10.4$ มม ภายใต้สภาวะการไหลที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ	พบว่าในกรณีไม่มีตอม่อระดับท้องน้ำจะลดลงตามเวลา เมื่อมีตอม่อพบว่าตอม่อไม่มีผลต่อรูปตัดตามยาวของท้องน้ำเมื่อเวลามากกว่า 24 ชั่วโมง และเสถียรภาพของชั้นหินทิ้งจะขึ้นอยู่กับขนาดของคลื่นท้องน้ำ
Zarrati, Nazariha และ Mashahir, 2006	การลดการกัดเซาะบริเวณกลุ่มเสาตอม่อสะพานโดยใช้แหวนสวม (collar) และชั้นหินทิ้ง(riprap)	ทดลองในรางน้ำกว้าง 0.75 ม. ลึก 0.8 ม. ยาว 12 ม. ตอม่อทรงกระบอกขนาด 40 มม. วัสดุท้องน้ำขนาดสม้าเสมอ $d_{50}=0.95$ มม. ทดลองเสาตอม่อ 2 ต้นโดยใช้แหวนสวมตอม่อแบบต่อเนื่องและแบบอิสระแต่ละต้น ร่วมกับกรณีที่มีหินทิ้งและไม่มี	จากการทดลองตอม่อ 2 ต้นจัดเรียงตามแนวทิศทางการไหล พบว่าการใช้แหวนสวมตอม่อร่วมกับหินทิ้งลดการกัดเซาะต้นหน้า 50 % ต้นหลัง 60 % การใช้แหวนสวมตอม่อที่แยกอิสระแต่ละต้นลดการกัดเซาะมากกว่าการใช้แหวนสวมที่ต่อเนื่อง และการใช้ตอม่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใช้แหวนสวมจะลดการกัดเซาะได้ดีกว่าตอม่อ 2 ต้นที่วางเรียงตามแนวการไหล

ตาราง ๑-5(ต่อ) การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความลึกหลุมกัดเซาะ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบและวิธีที่ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Dey, Sumer และ Fredsoe, 2006	การควบคุมการกัดเซาะบริเวณเสาเข็มภายใต้คลื่นและกระแสน้ำ	ทดลองในรางน้ำ 2 แบบ ได้แก่ รางน้ำที่มีกระแสน้ำและรางน้ำที่มีคลื่น ใน การทดลองภายใต้คลื่นใช้ ตอม่อทรงกระบอกขนาด 4 และ 6 ซม. มีการติดตั้ง splitter plate และการใช้ ลวดพันเสาเข็ม ขนาดของ วัสดุท้องน้ำ $d_{50}=0.2$ มม. และการทดลองภายใต้ กระแสน้ำใช้ตอม่อ ทรงกระบอกขนาด 20 ซม. มีการใช้ลวดพัน เสาเข็มขนาดของวัสดุท้อง น้ำ $d_{50}=0.26$ มม.	พบว่าในการศึกษาภายใต้คลื่นกรณีมีการติดตั้ง splitter plate ลดความลึกการกัดเซาะ 61.6 % ส่วนการพันลวดที่เสาเข็มเมื่ออัตราส่วนระหว่าง ขนาดเส้นลวดและขนาดของเสาเข็มมากขึ้น ความสามารถในการลดการกัดเซาะเพิ่มขึ้น ใน การศึกษาภายใต้กระแสน้ำการพันลวดที่เสาเข็ม ทำให้การกัดเซาะลดลงสูงสุด 46.3 % เนื่องจาก ลดกำลังของการไหลพุ่งลงและการม้วนวนรูป เกือกม้า การพันลวดใช้เกลียว 3 รอบ ทำมุม 15 องศากับแนวราบ ซึ่งการลดการกัดเซาะจะ ขึ้นอยู่กับขนาดของลวดและจำนวนรอบของ เกลียว

ภาคผนวก ข

สรุปสัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ภาคผนวก ข
สรุปสัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ตาราง ข-1 สัญลักษณ์และคำอธิบายที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

C_u	ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (uniformity coefficient)
D	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม
d_{50}	ขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ
d_s	ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด
d_{s1}	ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดของเสาเข็มต้นที่ 1
d_{s2}	ค่าความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็มรอบเสาเข็มต้นที่ 2
$d_{s2\beta}$	ค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมต่างๆ
d_{s2v}	ค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง
$d_{s3\beta}$	ค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 3 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมต่างๆ
d_{s3v}	ค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 3 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง
D_e	เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (effective diameter)
D_{ei}	เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลในแต่ละระนาบความลึกการไหลใดๆ
D_p	ความกว้างฉายเงาในระนาบระดับของเสาเข็ม
D_{pi}	ความกว้างฉายเงาในระนาบระดับความลึกการไหลใดๆ ของเสาเข็ม
Fr	ฟรูดนัมเบอร์
G	ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
H	ค่าระดับน้ำเหนือสันฝายสามเหลี่ยม
l_i	ตัวแปรบอกมิติความยาวในแนวเดียวกับทิศทางการไหล ที่ความลึกการไหลใดๆ
$K_{\beta 1}$	ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ในระนาบเดียวกับทิศทางการไหล
$K_{\beta 2}$	ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล
$K_{\beta 3}$	ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล
n	ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's roughness coefficient)
Q	อัตราการไหลของน้ำ
Q_{in}	อัตราการพัดพาตะกอนลงในหลุมกัดเซาะ
Q_{out}	อัตราการพัดพาตะกอนออกจากหลุมกัดเซาะ
Q_s	อัตราการทับถม/กัดเซาะ

ตาราง ข-1(ต่อ) สัญลักษณ์และคำอธิบายที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

R	รัศมีชลศาสตร์
Re	เรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหล
R_p	เรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ
S_0	ความลาดชันของท้องน้ำ
S_f	ความลาดชันของเส้นพลังงาน
S_s	ความถ่วงจำเพาะของวัสดุท้องน้ำ
T	อุณหภูมิ C°
U	ความเร็วเฉือนของการไหล (shear velocity)
U_c	ความเร็วเฉือนวิกฤตของการไหล (critical shear velocity)
V	ความเร็วเฉลี่ยการไหล
y	ความลึกการไหล
y_i	ความลึกการไหลใดๆ
w_i	ตัวแปรบอกมิติความยาวในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหล ที่ความลึกการไหลใดๆ
α	ระนาบการเอียงของเสาเข็ม (horizontal inclination plane)
β	มุมเอียงของเสาเข็ม (inclination angle)
ϕ	ตัวคูณถ่วงน้ำหนัก (weighting factor)
ν	ความหนืดจลน์ของน้ำ (kinematics viscosity)
ρ	ความหนาแน่นของน้ำ
ρ_s	ความหนาแน่นของวัสดุท้องน้ำ
σ_g	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายขนาด (gradation coefficient)
τ_0	หน่วยแรงเฉือนวิกฤต

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- ชื่อ นายพีระ ฉัตรจินตนาพร
- เกิด 29 สิงหาคม 2524 จังหวัด กรุงเทพมหานคร
- การศึกษา ปีการศึกษา 2547 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.โยธา)
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี
ปีการศึกษา 2548 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.)
ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ประสบการณ์ 2549-2550 ได้รับทุนผู้ช่วยสอน จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2550-2551 ได้รับทุนวิจัย จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

