



บทที่ 2

แนวทางการศึกษาและหลักการ

2.1 การศึกษาที่ผ่านมา

ดังเป็นที่ทราบแน่ชัดแล้วว่า กลไกการกัดเซาะรอบโครงสร้างฐานรากของอาคารชลศาสตร์ นั้นมีความสลับซับซ้อน และเกี่ยวสัมพันธ์กันอย่างลึกซึ้งกับชลศาสตร์การไหลของน้ำและตะกอน ตลอดจนลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างฐานรากเอง ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของหลุมกัดเซาะกับตัวแปรที่เกี่ยวข้องในทางทฤษฎีล้วนๆ ได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นการหาคำตอบจากปัญหาดังกล่าวจึงมุ่งไปที่การใช้แบบจำลองทางกายภาพทางชลศาสตร์ ประกอบกับเทคนิคในการวิเคราะห์มิติ (dimensional analysis) ในการรวมตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่างๆ เป็นกลุ่มตัวแปร แล้ววิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรที่ได้ในรูปของสมการ หรือกราฟ หรือตารางความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการประเมินหรือคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะดังกล่าว

ในเบื้องต้น มีการศึกษาถึงกลไกของกระบวนการกัดเซาะ เนื่องจากพฤติกรรมการไหลของน้ำรอบตอม่อสะพาน โดยมีผู้ศึกษาอยู่มากมายระบุว่า เมื่อการไหลเข้าปะทะกับตอม่อทำให้เกิดทิศทางการไหลพุ่งลงด้านล่าง (downflow) ส่งผลให้เกิดการไหลม้วนวนขึ้น (vortex system) ซึ่งเป็นกลไกสำคัญของการเกิดหลุมกัดเซาะ เช่น Keutner (1932), Tison (1940), Posey (1949), Chabert and Engeldinger (1956), Laursen and Toch (1956), Shen (1967), Melville and Raudkivi (1977), Raudkivi and Sutherland (1981), Dargahi (1990) เป็นต้น

จากนั้นก็มีผู้สนใจศึกษาวิจัยหาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะ กับขนาดและลักษณะรูปร่างเฉพาะของตอม่อ รวมทั้งตัวแปรการไหลต่างๆ ที่ซับซ้อนขึ้น เช่น ความลึกการไหล (flow depth), ความเร็วการไหล (flow velocity), ขนาดวัสดุท้องน้ำ (sediment size), เวลา (time), มุมปะทะการไหล และค่าฟรูดนัมเบอร์ (Froude number) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์และสร้างเป็นสมการเชิงประจักษ์ (empirical formula) ในการคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะที่ใช้ออกแบบโครงสร้างสะพาน เช่น Chabert and Engeldinger (1956), Neill (1964), Shen et al. (1969), Hancu (1971), Jain and Fischer (1979), Ettema (1980), Raudkivi and Sutherland (1981), Melville and Sutherland (1988), Richardson and Davis (1987, 1995, 2001), Melville and Chiew (1999), Francis et al. (2001) เป็นต้น

หลังจากมีการศึกษาในเรื่องต่างๆ ดังกล่าวเป็นจำนวนมาก ประกอบกับความรู้ความเข้าใจในหลักการข้างต้นมากพอ จึงมีผู้สนใจที่จะพยายามควบคุมและลดความลึกหลุมกัดเซาะลง เช่น การใช้หินทิ้ง (riprap) หรือ แหวนสวมรอบตอม่อ (collar) เพื่อเสริมสร้างเสถียรภาพให้กับโครงสร้างฐานรากที่มีความเสี่ยงต่อการกัดเซาะ แต่ยังคงความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานอยู่ได้ ดังปรากฏในการศึกษาของนักวิจัยมากมายที่เสนอแนะวิธีการต่างๆ ในการลดความลึกการกัดเซาะ เช่น Posey (1974), Odgaard and Wang (1987), Chiew (1992, 1995), Palora (1993), Jones et al. (1995), Melville and Hadfield (1999), Zarrati et al. (2006), Dey et al. (2006) เป็นต้น

สำหรับการศึกษาการกัดเซาะรอบโครงสร้างฐานราก โดยเฉพาะตอม่อสะพานที่เป็นที่รู้จักและเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย เพราะได้มีการศึกษาและรวบรวมผลการศึกษาที่ผ่านมาอย่างหลากหลายและต่อเนื่อง ซึ่งได้พิจารณาตัวแปรต่างๆ อย่างมากมาย ได้แก่ ผลการศึกษาของ Melville and Coleman (2000) และ Richardson and David (2001)

Melville และ Coleman (2000) ได้ปรับปรุงสมการจากผลการศึกษาที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานจากข้อมูลการทดลองของ Melville และ Sutherland (1988) โดยแสดงในรูปของตัวคูณปรับแก้ (K -factors) ที่ส่งผลต่อความลึกกัดเซาะ ซึ่งนิยมเรียกกันว่า New Zealand Pier Scour equation มีรายละเอียดของสมการดังนี้

$$d_s = K_{yb} K_l K_D K_s K_\theta K_t \quad (2-1)$$

เมื่อ	d_s	=	ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด
	K_{yb}	=	ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของค่าอัตราส่วนความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ
	K_l	=	ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของความเร็วกการไหล
	K_D	=	ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของขนาดวัสดุท้องน้ำ
	K_s	=	ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของรูปแบบของตอม่อ
	K_θ	=	ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของมุมปะทะการไหล
	K_t	=	ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของเวลาในการกัดเซาะ

Richardson (2001), [FHWA (HEC-18)] ปรับปรุงสมการ The Colorado State University (CSU) equation เสนอโดย Richardson and Davis (1995) โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพศึกษาถึงความสัมพันธ์ต่างๆ เพื่อประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะ ซึ่งเรียกสมการที่ปรับปรุงใหม่นี้ว่าสมการ FHWA Pier Scour Equation หรือสมการ HEC-18 โดยจะคำนึงถึงอิทธิพลความเร็วกการไหลที่อยู่ในรูปของค่าฟรูดนัมเบอร์ ดังนี้

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{a}{y_1} \right)^{0.65} Fr_1^{0.43} \quad (2-2)$$

โดยที่	y_s	=	ความลึกกัดเซาะสูงสุด
	y_1	=	ความลึกการไหล
	K_1	=	ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของรูปแบบของตอม่อ
	K_2	=	ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของมุมปะทะการไหล
	K_3	=	ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของเงื่อนไขท้องน้ำ
	K_4	=	ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของการเกิดขึ้นกระาะของขนาดวัสดุท้องน้ำที่ขนาดต่างกัน
	a	=	ความกว้างตอม่อ
	L	=	ความยาวตอม่อ
	Fr_1	=	ค่าฟรูดนัมเบอร์การไหล

และยังประยุกต์ใช้ได้กับการหาความลึกกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่ม โดยพิจารณาเป็นความกว้างประสิทธิผลของเสาเข็มกลุ่มทั้งหมด (a_{pg}^*) หาได้จาก

$$a_{pg}^* = a_{proj} K_{sp} K_m \quad (2-3)$$

เมื่อ a_{proj} คือ ผลรวมของขนาดเสาเข็มที่อยู่ในระนาบตั้งฉากกับการไหล (sum of non-overlapping projected widths), K_{sp} คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของระยะห่างระหว่างเสาเข็ม และ K_m คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากจำนวนเสาเข็มในกลุ่มเสาเข็ม

สำหรับการศึกษาที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มก็มีผลการศึกษานของ Hannah (1978), Zhao and Sheppard (1998), และ Ashtiani and Beheshti (2006) ซึ่งเป็นการศึกษาในลักษณะของเสากลุ่มรูปทรงกระบอกที่ตั้งตรง ส่วนการศึกษาเกี่ยวกับการกัดเซาะรอบเสาเข็มที่เอียงก็มีผลการศึกษานของ Bozkus and Yildiz (2004) ซึ่งเป็นการศึกษาของเสาเข็มเดี่ยวรูปทรงกระบอกและพิจารณาการเอียงในระนาบทิศทางเดียว คือ เอียงในระนาบทิศทางตามแนวการไหล ผลการศึกษาผลการเอียงของเสาเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะ โดย Bozkus and Yildiz (2004) และผลการศึกษานผลของการจัดวางกลุ่มของเสาเข็ม โดย Ashtiani and Beheshti (2006) สรุปได้ดังนี้คือ

Bozkus และ Yildiz (2004) ศึกษาวิจัยหาผลของการเอียงของตอม่อเดี่ยวรูปทรงกระบอกต่อความลึกหลุมกัดเซาะ โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพตอม่อเดี่ยวทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 50 มม. และ 100 มม. ที่มีการเอียงไปทางด้านซ้ายตามแนวทิศทางการไหลโดยมีการเอียงเป็นมุมกับแนวตั้ง 4 มุม คือ 2° , 5° , 10° และ 15° ทำการทดลองในรางน้ำสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดความยาว 11 เมตรและกว้าง 2 เมตร โดยใช้วัสดุท้องน้ำขนาดสม่ำเสมอที่มีขนาดเฉลี่ย (d_{50}) เท่ากับ 0.5 มม. โดยมีความหนาของวัสดุท้องน้ำ 20 ซม. ภายใต้สภาวะการไหลที่น้ำไม่มีตะกอนปน พบว่าความลึกการกัดเซาะจะลดลงตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น และในสรุปผลการศึกษายังให้ข้อสังเกตว่า การเอียงของเสาเข็มตามแนวทิศทางการไหลถึงจะมีข้อดีในแง่ของการลดความลึกของของหลุมกัดเซาะแต่ในทางปฏิบัติในการก่อสร้างจะมีข้อจำกัดของมุมที่เอียง และนอกจากนี้ยังคาดคะเนว่าถ้าการเอียงของเสาเข็มในทิศกลับกันน่าจะทำให้หลุมกัดเซาะเพิ่มมากขึ้นแต่ยังไม่ได้มีการศึกษาเรื่องดังกล่าวในรายงานนี้

Ashtiani และ Beheshti (2006) ได้ทดลองจัดวางกลุ่มเข็มแบบต่างๆ 8 แบบ และใช้ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (G) ตั้งแต่ 0 จนถึง $6D$ เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม พบว่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มที่จัดวางเป็นกลุ่มมีค่ามากกว่าความลึกกัดเซาะรอบตอม่อเดี่ยว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเสาเข็ม โดยที่ระยะห่างระหว่างเสาเข็มยิ่งน้อยความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้น เพราะพฤติกรรมการกัดเซาะรอบเข็มกลุ่มจะมีลักษณะที่คล้ายกับเป็นเสาเข็มต้นเดียว โดยการศึกษาพบว่าถ้าระยะห่างระหว่างเสาเข็มของกลุ่มเสาเข็มน้อยมากๆ ($G/D \leq 0.15$) กลุ่มของเสาเข็มดังกล่าวจะเหมือนกับการเป็นเสาเดี่ยวต้นเดียว ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ถ้าเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้นวางตามแนวการไหลต่อกัน (tandem arrangement) ความลึกหลุมกัดเซาะจะมากเป็น 1.2 เท่าของหลุมกัดเซาะต้นเดี่ยวที่ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม $G/D \cong 2$ และจะมีความลึกหลุมกัดเซาะเป็น 1.5 เท่าของหลุมกัดเซาะต้นเดี่ยว เมื่อมีการวางเสาเข็ม 2 ต้นแบบข้างเคียงกัน (side-by-side arrangement) ที่ระยะห่าง $G/D \cong 0.25$ และความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของหลุมกัดเซาะเดี่ยวสำหรับการจัดวางกลุ่มเสาเข็มแบบ 2×4 ต้น ที่มีระยะห่าง $G/D \cong 0.25$ ส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่ผลกระทบระหว่างกันของเสาเข็มส่งถึงกัน (interference effect) น้อยมากมีค่าอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับขนาดตอม่อ (G/D) ตั้งแต่ 2 ถึง 4 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการจัดวางของกลุ่มเข็ม รวมทั้งมุมปะทะการไหล

2.2 กลศาสตร์การกัดเซาะและการกัดเซาะเฉพาะแห่ง

การกัดเซาะเฉพาะแห่งอาจนิยามได้ว่า เป็นปรากฏการณ์ที่ระดับท้องน้ำบริเวณใกล้ตอม่อมีการลดลงทันทีทันใด เนื่องจากการไหลของน้ำเข้าปะทะกับตอม่อทำให้เกิดการกัดเซาะวัสดุท้องน้ำจนเป็นหลุมลึก ประเภทของการกัดเซาะเฉพาะแห่งอาจแบ่งโดย การนำพาตะกอนเข้าและออกจากหลุมกัดเซาะของวัสดุท้องน้ำได้

กระบวนการกัดเซาะสามารถอธิบายได้ตามหลักการคงมวลของสสาร (conservation of mass) ได้ตามความสัมพันธ์ 2-4 และแสดงความสัมพันธ์ในรูป 2-1

$$Q_S = Q_{OUT} - Q_{IN} \quad (2.4)$$

โดยที่

Q_S คือ อัตราการพัดพาของตะกอนของหลุมกัดเซาะ ในหน่วยของปริมาตรต่อเวลา

Q_{OUT} คือ อัตราการพัดพาตะกอนออกจากหลุมกัดเซาะ ในหน่วยของปริมาตรต่อเวลา

Q_{IN} คือ อัตราการพัดพาตะกอนลงในหลุมกัดเซาะ ในหน่วยของปริมาตรต่อเวลา

ดังนั้นสามารถแบ่งประเภทของการกัดเซาะเฉพาะแห่งได้ดังนี้

1) การกัดเซาะเนื่องจากสภาวะการไหลที่น้ำไม่มีตะกอนปน (clear-water scour, $Q_{OUT} > 0$ และ $Q_{IN} = 0$) ซึ่งจะเกิดเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำทางด้านเหนือน้ำของส่วนของโครงสร้าง หรือตะกอนท้องน้ำทางด้านเหนือน้ำของส่วนของโครงสร้างที่ถูกพัดพาจนเป็นตะกอนแขวนลอยเข้าสู่หลุมกัดเซาะน้อยกว่าความสามารถในการนำพาตะกอนของลำน้ำ เนื่องจากความเร็วเฉือน (shear velocity, U) ของการไหล มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ ความเร็วเฉือนวิกฤต (critical shear velocity, U_c) ของวัสดุที่เป็นตะกอนท้องน้ำ ซึ่งเป็นความเร็วเริ่มต้นที่ทำให้วัสดุท้องน้ำเริ่มเคลื่อนที่ การกัดเซาะในกรณีนี้จะทำให้เกิดความลึกการกัดเซาะสูงสุด เมื่อความเร็วเฉือนของการไหลไม่สามารถทำให้ตะกอนท้องน้ำที่กั้นหลุมเกิดการเคลื่อนที่ออกจากหลุมกัดเซาะได้อีกแล้ว

2) การกัดเซาะเนื่องจากสภาวะการไหลที่น้ำมีตะกอนปน (live-bed scour, $Q_{OUT} > 0$ และ $Q_{IN} > 0$) เป็นการกัดเซาะโดยมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำทางด้านเหนือน้ำเข้าสู่หลุมกัดเซาะ ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล (equilibrium scour depth) จะเกิดเมื่อมีความสมดุลระหว่างอัตราการพัดพาตะกอนออกจากหลุมกัดเซาะ และอัตราการพัดพาตะกอนเข้าสู่หลุมกัดเซาะ (Raudkivi และ Sutherland, 1981)

จากการศึกษาของ Raudkivi และ Sutherland (1981) ได้แบ่งปรากฏการณ์การกัดเซาะออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นเริ่มแรก (initial phase) จะปรากฏหลุมเล็กๆ บนผิวราบเรียบของท้องน้ำ สามารถมองเห็นได้ชัดเจน และความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

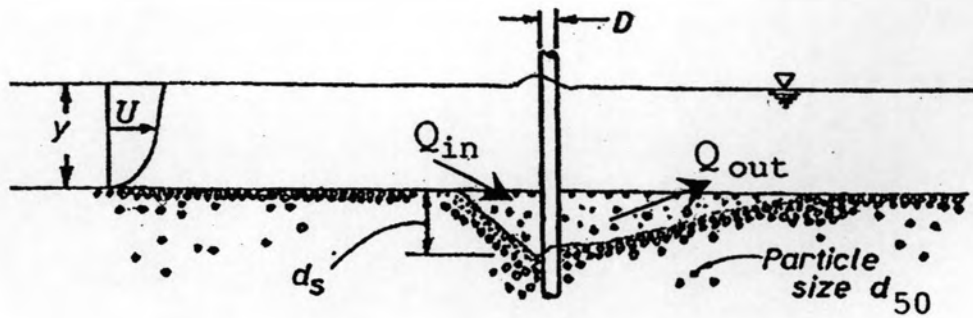
ขั้นสมดุล (equilibrium scour depth) ในขั้นนี้ความลึกการกัดเซาะจะเข้าใกล้สภาวะสมดุล คือ มีการกัดเซาะที่มีการทับถมของเม็ดตะกอนเข้าสู่หลุมกัดเซาะ อัตราการกัดเซาะจึงลดลงและเข้าสู่สภาวะที่เกือบคงที่ ให้ค่าการกัดเซาะสูงสุดชั่วคราว

ขั้นสูงสุด (maximum scour depth) หลุมกัดเซาะจะทรงตัวอยู่ในขั้นสภาวะสมดุลจนถึงเงื่อนไขหนึ่งจึงมีการกัดเซาะต่อ และถึงจุดความลึกกัดเซาะสูงสุดหรือเกิดเงื่อนไขที่ต้องยุติการกัดเซาะ ค่าความลึกสมดุลก็จะเป็นค่าความลึกการกัดเซาะสูงสุด

ในกรณีที่ค่าอัตราส่วนความเร็วเฉือนต่อความเร็วเฉือนวิกฤตประมาณเท่ากับ 1 ($U/U_c \approx 1$) อาจพิจารณาเป็นสภาวะการเริ่มต้นเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (threshold condition) ซึ่งจะเกิดความลึกการกัดเซาะสูงสุด โดยจะมีค่ามากกว่าประมาณ 10 % ของค่าความลึกกัดเซาะในสภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ส่วนการอธิบายความลึกของหลุมกัดเซาะ (scour depth) สัมพันธ์กับเวลา (time) และความเร็วการไหล (velocity) จะแยกพิจารณาตามประเภทของการกัดเซาะ เนื่องจากความลึกหลุมกัดเซาะที่เกิดขึ้นตามแต่ละประเภทของการกัดเซาะมีความแตกต่างกัน รูป 2-2 แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว

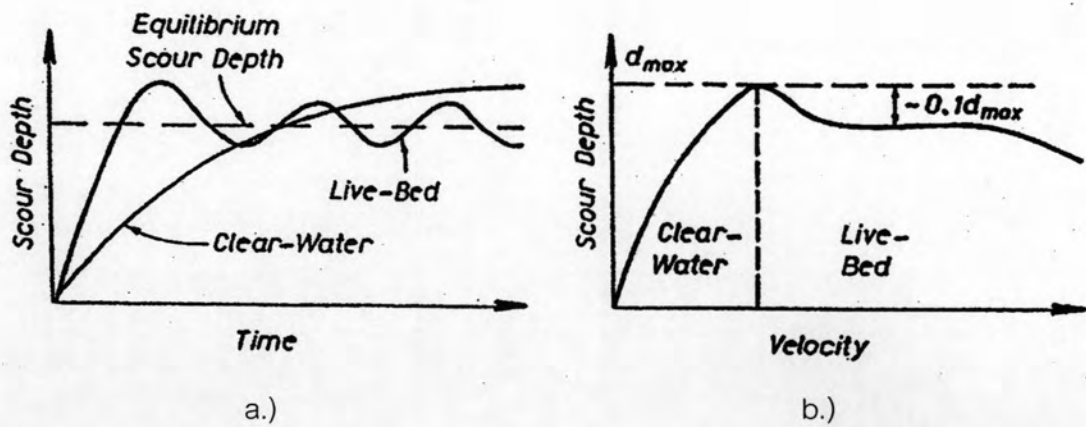
เมื่อพิจารณาความลึกของหลุมกัดเซาะกับเวลา ในสภาวะการไหลที่น้ำไม่มีตะกอนปน ความลึกหลุมกัดเซาะจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วเฉือนของการไหล ซึ่งทำให้ตะกอนท้องน้ำเกิดการเคลื่อนที่มีค่าน้อย และจะเกิดความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด เมื่อความเร็วเฉือนไม่สามารถทำให้ตะกอนท้องน้ำบริเวณหลุมการกัดเซาะเกิดการเคลื่อนที่ได้ ในส่วนของสภาวะการไหลที่น้ำมีตะกอนปน ความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความเร็วเฉือนของการไหลมีค่ามาก และในกรณีนี้จะมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำเข้าสู่หลุมกัดเซาะด้วย ดังนั้นความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันไป โดยจะเกิดความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลเมื่ออัตราการพัดพาตะกอนเข้าสู่หลุมกัดเซาะเท่ากับอัตราการพัดพาตะกอนออกจากหลุมกัดเซาะ

เมื่อพิจารณาความลึกหลุมกัดเซาะกับความเร็วการไหล ในสภาวะการไหลที่น้ำไม่มีตะกอนปน ความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น และความลึกหลุมกัดเซาะจะมากที่สุด เมื่อความเร็วการไหลเท่ากับความเร็วเฉือนวิกฤต ในส่วนของสภาวะการไหลที่น้ำมีตะกอนปน ความลึกของหลุมกัดเซาะจะน้อยลงเมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำปริมาณมากเข้าสู่หลุมกัดเซาะ (Raudkivi และ Sutherland, 1981)



รูป 2-1 การพัดพาตะกอนเข้าและออกจากหลุมกัดเซาะ

โดย Raudkivi และ Sutherland (1981)



รูป 2-2 ความลึกหลุมกัดเซาะสำหรับขนาดตอม่อและขนาดวัสดุท้องน้ำคงที่

(a) เป็นความสัมพันธ์กับเวลา และ (b) เป็นความสัมพันธ์กับความเร็วการไหล

โดย Raudkivi และ Sutherland (1981)

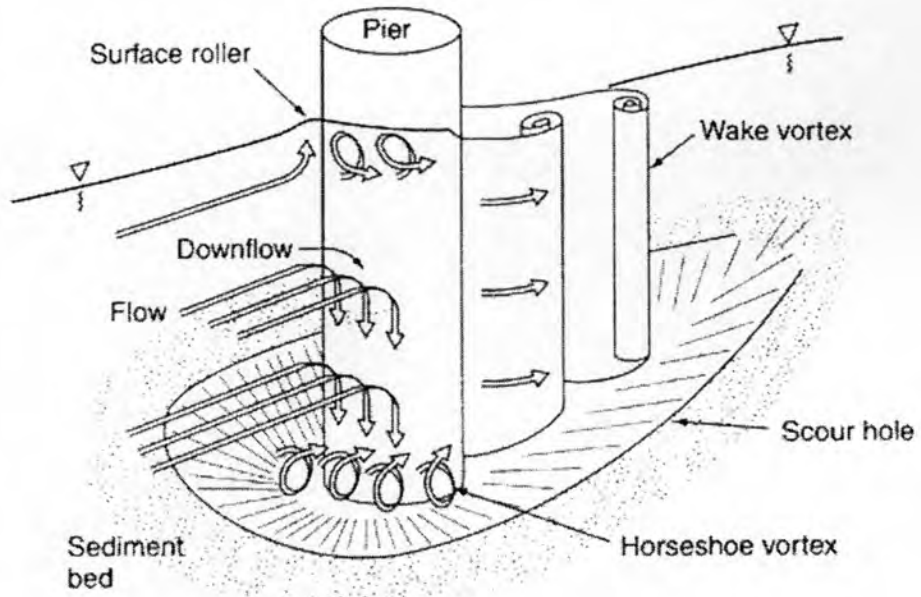
การกัดเซาะรอบตอม่อสะพานเป็นการกัดเซาะเฉพาะแห่งอันเป็นผลมาจากการไหลม้วนวน (vortex system) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการไหลเกิดการม้วนกลิ้งรอบตอม่อ (surface roller) การไหลม้วนวนจะช่วยสนับสนุนให้เกิดการกัดเซาะ (scouring) ที่สันตอม่อด้านเหนือน้ำ เนื่องจากทิศทางการไหลจะพุ่งลงด้านล่าง (downflow) เมื่อกระทบกับผิวตอม่อ และเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดทิศทางการไหลม้วนวนกลับในแนวราบที่ท้องน้ำ วัสดุท้องน้ำจะเคลื่อนที่โดยการไหลกลิ้งวนภายในหลุมกัดเซาะและม้วนวนรอบด้านข้างตอม่อในแนวราบ โดยการไหลม้วนวนจะเป็นแบบม้วนวนรูปเกือกม้า (horseshoe vortex) ดังแสดงในรูป 2-3 เมื่อความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้น กำลังของการไหลม้วนวนรูปเกือกม้าจะลดลง จนเข้าสู่สภาวะสมดุลของการกัดเซาะเงื่อนไขนั้นๆ

นอกจากการไหลม้วนวนรูปเกือกม้ารอบฐานของตอม่อแล้ว ยังมีการม้วนวนในแนวตั้งอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งจะเกิดทางด้านท้ายน้ำของตอม่อ เรียกว่า การม้วนวนด้านหลัง (wake vortex) ดังแสดงในรูป 2-3 เช่นกัน โดยทั้ง 2 ระบบ การไหลม้วนวนจะเคลื่อนย้ายวัสดุท้องน้ำออกจากบริเวณฐานของตอม่อจนเกิดการกัดเซาะ และการม้วนวนตามแนวการไหลจะค่อยๆ หายไปตามระยะทางด้านท้ายน้ำของตอม่อที่เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่อยครั้งเป็นสาเหตุของการตกตะกอนและทับถมทางด้านท้ายน้ำของตอม่อ

ความลึกการกัดเซาะสูงสุดของตอม่อสะพานจะเกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของสภาวะการไหลที่น้ำไม่มีตะกอนปน และสภาวะการไหลที่น้ำมีตะกอนปน เมื่อความเร็วเฉือนของการไหลบริเวณใกล้หลุมกัดเซาะเท่ากับความเร็ววิกฤตสำหรับการเริ่มต้นเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำ รูป 2-4 แสดงความสัมพันธ์ของ Entrainment function กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของความเร็วเฉือน (Shear Reynolds Number) ซึ่งได้ทำการศึกษาโดย Shields (1936) จากรูปแบ่งการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำเป็นสามส่วน คือ ส่วนที่อยู่เหนือเส้นที่บเป็นส่วนที่มีการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำ ส่วนที่อยู่ใต้เส้นที่บเป็นส่วนที่ไม่มีการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำ และบริเวณเส้นที่บคือส่วนที่วัสดุท้องน้ำกำลังจะเคลื่อนที่ (threshold of movement) โดยที่

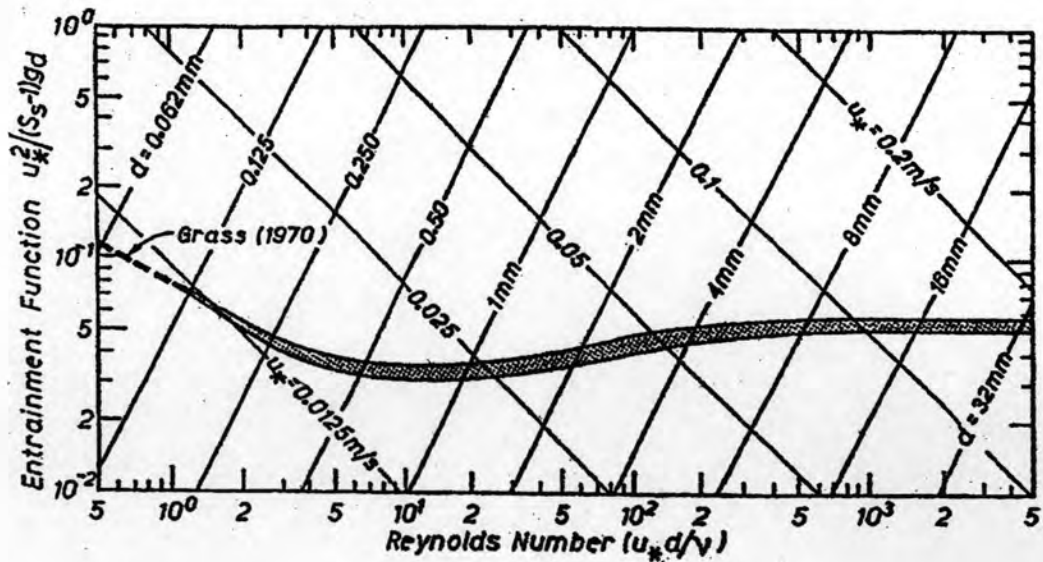
$$\text{Entrainment function} = \frac{U^2}{(S_s - 1)gd} \quad (2-5)$$

$$\text{Shear Reynolds Number} = \frac{U.d}{\nu} \quad (2-6)$$



รูป 2-3 การไหลผ่านตอม่อสะพานและกระบวนกรกัดเซาะ

ที่มา : Hamill (1999)



รูป 2-4 ความสัมพันธ์ของ Entrainment Function กับ Reynolds Number

ตามที่ Shields ได้ทำการศึกษาไว้ โดย Raudkivi และ Sutherland (1981)

เมื่อ S_s คือ ความถ่วงจำเพาะของวัสดุท้องน้ำ, g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, d คือ ขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ, ν คือ ความหนืดจลน์ (kinematic viscosity) ของของไหล และ U คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล ซึ่งเท่ากับ \sqrt{gSy} เมื่อ S คือ ค่าความลาดเอียงของเส้นพลังงาน และ y คือ ความลึกการไหล

2.3 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ

ในการศึกษาเรื่องการกัดเซาะรอบเสาเข็มที่เอียง ถูกจำกัดด้วยสมมุติฐานที่ว่า การไหลของน้ำเป็นการไหลแบบไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา (steady flow) ตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการกัดเซาะมีดังนี้

1) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของของไหล (variables characterizing the fluid) อันประกอบด้วย ความหนาแน่นของของไหล (density of fluid, ρ), ความหนืดจลน์ของของไหล (kinematics viscosity of fluid, ν) และความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (acceleration due to gravity, g)

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

3) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะการไหล (variables characterizing the flow) ประกอบด้วย ความลึกการไหล (depth of approach flow, y), ความเร็วการไหล (mean velocity of undisturbed flow, V), ความขรุขระของวัสดุท้องน้ำ (roughness of approach flow), ความลาดเอียงของท้องน้ำ (bed slope, S_b) และความลาดเอียงของเส้นพลังงาน (energy slope, S_p)

4) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของตอม่อ (variables characterizing the bridge pier) ประกอบด้วย รูปร่างตอม่อ (pier shape), มุมเอียงของเสาเข็ม (inclination angle, β), ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (pile diameter, D), ระนาบการเอียงของเสาเข็ม (inclination plane, α) และระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (pile spacing, G)

เพื่อเป็นการง่ายต่อการวิเคราะห์ตัวแปรจำนวนมากตามที่กล่าวมาในข้างต้น จึงได้ตั้งสมมุติฐานและข้อจำกัดดังนี้

1) วัสดุท้องน้ำที่จะใช้เป็นทราย (non-cohesive) ที่มีขนาดสม่ำเสมอ (uniform size)

2) ตัวแปรการไหล รางน้ำต้องมีความกว้างพอ เมื่อมีตอม่อขวางการไหลจะไม่ส่งผลให้เกิดการบีบตัวของรางน้ำ วัสดุท้องน้ำมีขนาดคละเดียวกันตลอดรางน้ำ การไหลเริ่มต้นอยู่ในสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และเป็นการไหลต่ำกว่าวิกฤต (subcritical flow)

3) คุณลักษณะของตอม่อ กำหนดใช้รูปร่างตอม่อเป็นเสาเข็มกลม (circular cylinder) และมีผิวเรียบ ขนาดเดียวกันทุกการทดลอง แต่มีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง และระนาบการเอียง

ดังนั้นจะเหลือตัวแปรที่นำมาใช้ในการพิจารณาความสัมพันธ์ ดังนี้

- ของไหล : ρ, ν, g

- การไหล : y, V

- ตอม่อสะพาน : D, β, α

และจะได้ว่า ความลึกการกัดเซาะสูงสุด (d_s) ขึ้นกับตัวแปรดังต่อไปนี้

$$d_s = f(\rho, \nu, g, y, V, D, \beta, \alpha) \quad (2-7)$$

การกัดเซาะรอบเสาเข็มที่เอียง เกี่ยวข้องกับหน่วยพื้นฐาน 3 หน่วย คือ มวล (mass) ความยาว (length) และเวลา (time) ดังนั้นตัวแปรอิสระทั้ง 8 ตัวข้างต้น สามารถลดรูปเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้ 3 กลุ่ม ตามทฤษฎีวิเคราะห์มิติ (dimensional analysis) โดยใช้ตัวแปร ρ, D , และ g เป็นตัวแปรซ้ำ จะสามารถเขียนฟังก์ชันอธิบายความสัมพันธ์ความลึกการกัดเซาะในรูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (dimensionless parameter) ได้ดังนี้

$$\frac{d_s}{D} = \Phi \left[\frac{VD}{\nu}, \frac{V^2}{gD}, \frac{y}{D}, \beta, \alpha \right] \quad (2-8)$$

ซึ่งกลุ่มตัวแปรเหล่านี้ใช้เป็นแนวทางในการอธิบายความสัมพันธ์ของรูปแบบความลึกหลุมกัดเซาะ และพฤติกรรมการไหลของน้ำ ในการศึกษานี้

2.4 แบบจำลองชลศาสตร์

การศึกษาค้นคว้าด้วยวิธีการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ เนื่องด้วยความซับซ้อนของตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการกัดเซาะรอบตอม่อ จึงได้ออกแบบสร้างและดำเนินการทดลอง ตลอดจนอุปกรณ์ที่ใช้ ให้มีความเหมาะสมกับลักษณะของปัญหาที่สนใจเริ่มปฏิบัติงานจริง เพื่อใช้เป็นแนวทางปฏิบัติงานและลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นระหว่างปฏิบัติงาน

แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาได้สร้างและดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ของภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีรายละเอียดดังนี้

1) แบบจำลองกระแสน้ำ จำลองการไหลในรางน้ำเปิด หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความยาว 18.0 ม. กว้าง 0.60 ม. และสูง 0.75 ม. ผังด้านข้างเป็นกระจกไชนา 1.20 ซม. พื้นรางเป็นเหล็กหนา 6 มม. ยกกระดานห้องรางสูงประมาณ 15 ซม. ด้วยวัสดุที่ไม่มีการกัดเซาะ (rigid bed or false floor) โดยปูด้วยแผ่นอะคริลิกสีขาวตลอดรางน้ำเปิด ยกเว้นส่วนที่ทำการศึกษาการกัดเซาะในช่วงตอนกลางของรางน้ำ สภาพท้องน้ำเป็นทรายละเอียดขนาดเฉลี่ย 0.27 มม. (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก-4) ปูยาว 3 ม. ในระนาบเดียวกับพื้นวัสดุที่ไม่มีการกัดเซาะ ความลาดเอียงของท้องรางน้ำสามารถปรับได้โดยใช้แม่แรงยกซึ่งหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า พร้อมระบบนำน้ำเข้าสู่รางโดยท่อขนาด \varnothing - 6 นิ้ว จากถังน้ำขนาดความจุประมาณ 30 ลูกบาศก์เมตร บนชั้นดาดฟ้าของตึกที่ทำการทดลอง (ตึกวิศวกรรม 5) ซึ่งมีความสูงจากรางน้ำประมาณ 30 ม. ที่ท้ายรางน้ำเปิดติดตั้งประตูเปิด-ปิดน้ำแบบบานยก (sluice gate) ทำหน้าที่ควบคุมความลึกการไหลของน้ำในรางน้ำเพื่อกำหนดให้สภาพการไหลเป็นการไหลแบบต่ำกว่าวิกฤต (subcritical flow) มีถังเหล็กรับน้ำใช้เป็นตัววัดอัตราการไหลแบบฝายสันคมรูปตัววี (V-notch weir) แล้วปล่อยน้ำลงไปที่บ่อเก็บน้ำด้านล่างของรางและใช้เครื่องสูบน้ำ 4 ตัวในการสูบน้ำกลับขึ้นไปบนถังสูง ซึ่งต้องรักษาระดับน้ำในถังสูงให้คงที่ เพื่อให้ระบบหมุนเวียนน้ำมีอัตราการปล่อยน้ำออกจากถังคงที่ ดังรูป 2-5 และแสดงส่วนประกอบต่างๆ ของแบบจำลองพร้อมภาพประกอบโดยละเอียดในภาคผนวก ก-1

2) แบบจำลองตอม่อ รูปแบบของตอม่อที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีลักษณะเป็นเสาเข็มกลุ่มที่มีการเอียงของเสาเข็มต้นที่อยู่ด้านนอก ซึ่งจะตัดพิจารณาเฉพาะเสาเข็มต้นที่อยู่ใกล้และคาดว่า จะได้รับอิทธิพลของเสาเข็มต้นที่เอียงในกลุ่มเข็มออกมาเป็นแบบจำลองตอม่อ โดยใช้ท่อพลาสติก (PVC) ทรงกระบอกขนาด 3.40 ซม. เป็นเสาเข็ม รองรับด้วยแผ่นอะคริลิกหนา 8 มม. เนื่องจากแบบจำลองรางน้ำมีขนาดกว้าง 60 ซม. รวมทั้งแบบจำลองตอม่อมีลักษณะเป็นเสาเข็มกลุ่ม ถ้าออกแบบให้มีขนาดใหญ่กว่าจะทำให้เกิดการบีบตัวของรางน้ำเป็นเหตุให้เกิดการกัดเซาะจากทาง

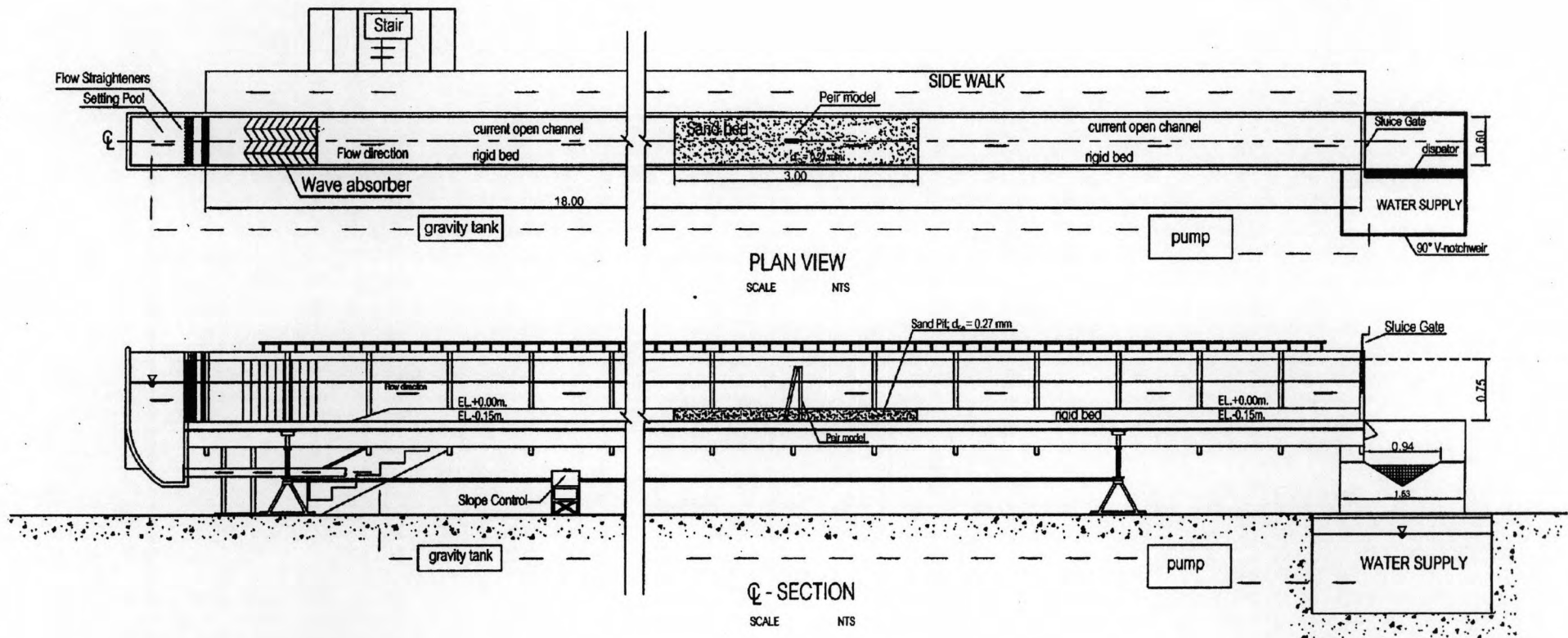
น้ำที่ถูกบีบแคบลง และหากใช้ขนาดเสาที่เล็กกว่าจะไม่สามารถทดลองให้ครอบคลุมที่ความลึก การไหลที่สูงได้ เพราะจะเกิดการไขว้ซ้อนกันของเสาเข็มที่เอียงและเสาเข็มตั้งตรงตันถัดไป ดังนั้น ในการศึกษาจะกำหนดให้มีรูปแบบและการเปลี่ยนแปลง 3 กรณี ดังนี้ (ขนาดและรายละเอียด ต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ก-2)

กรณีที่ 1 เสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น และมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง (β) ของเสาเข็มต้น หน้า 1 ต้น ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ($\alpha = 90$ องศา) ตั้งแต่ $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15$ และ 20° มี ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม $G = 2D$ เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ดังรูป 2-7(ก)

กรณีที่ 2 เสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น และมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง (β) ของเสาเข็มต้น หน้า 1 ต้น ในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล ($\alpha = 45$ องศา) ตั้งแต่ $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15$ และ 20° มี ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม $G = 2D$ เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ดังรูป 2-7(ข)

กรณีที่ 3 เสาเข็มตั้งตรง 1 ต้น และมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง (β) ของเสาเข็มต้น หน้า 1 ต้น ในระนาบเดียวกับทิศทางการไหล ($\alpha = 0$ องศา) ตั้งแต่ $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15$ และ 20° มี ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม $G = 2D$ เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ดังรูป 2-7(ค)

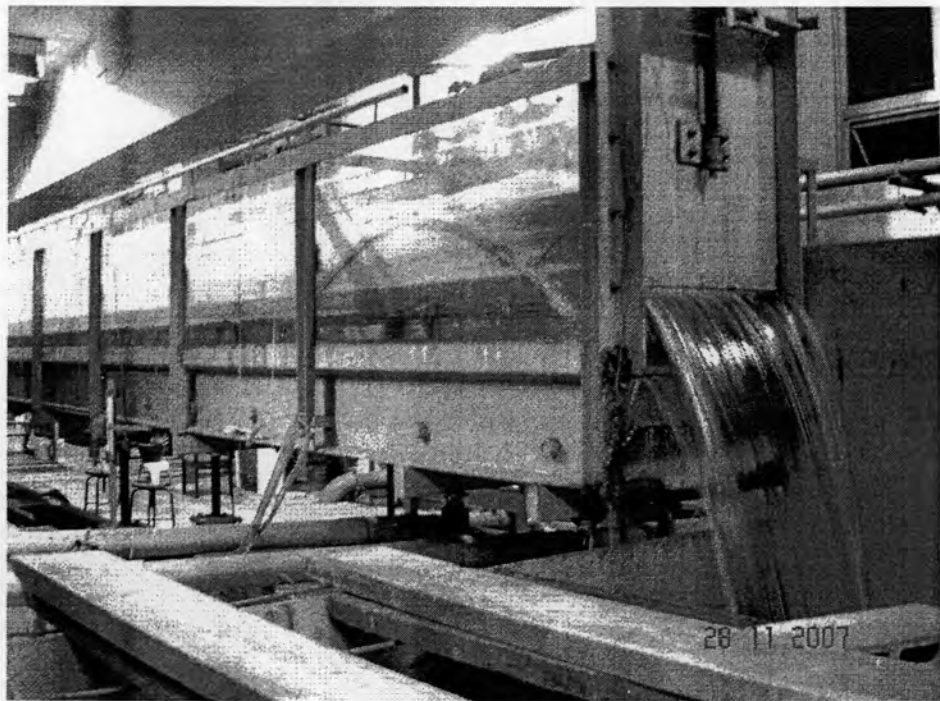
รวมกรณีการศึกษาทั้งหมด 15 กรณีศึกษา



รูป 2-5 รายละเอียดแบบจำลองชลศาสตร์กระแสน้ำ

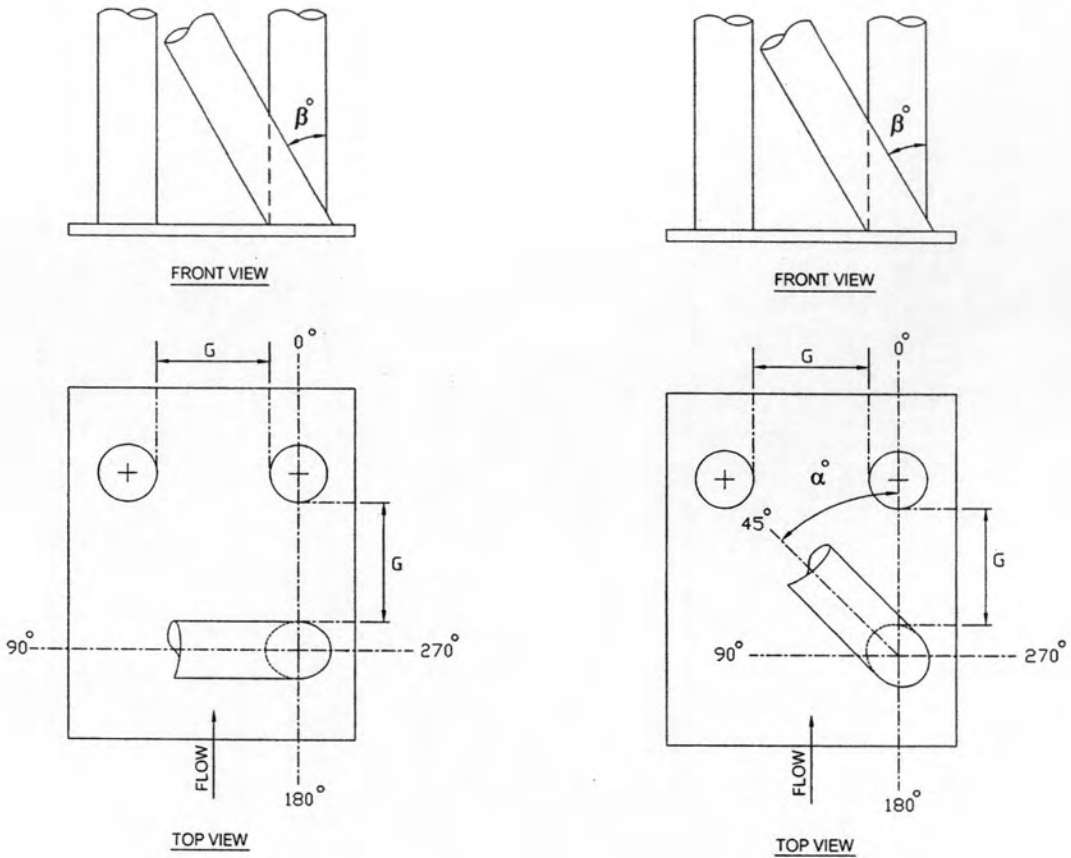


ก) รางน้ำเปิดเมื่อมองจากทางด้านต้นรางน้ำ



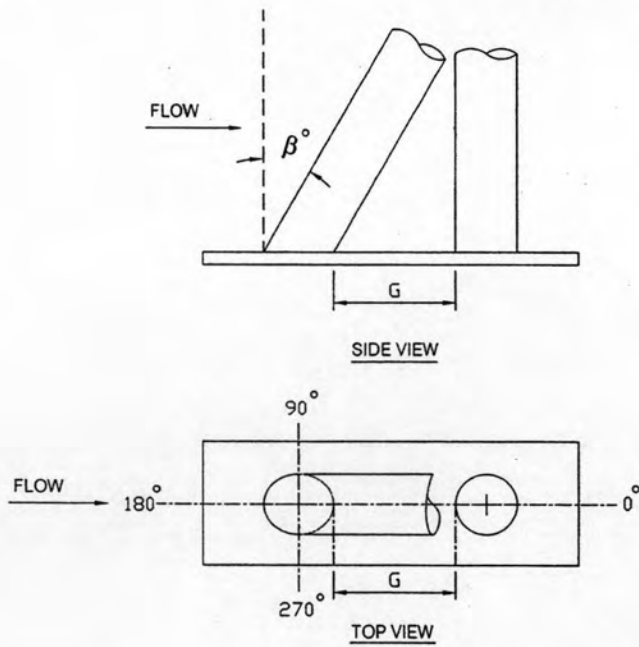
ข) รางน้ำเปิดเมื่อมองจากทางด้านท้ายรางน้ำ

รูป 2-6 รางน้ำเปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume)



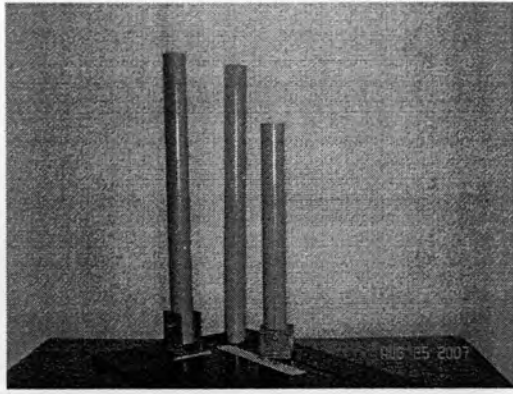
รูป 2-7(ก)

รูป 2-7(ข)

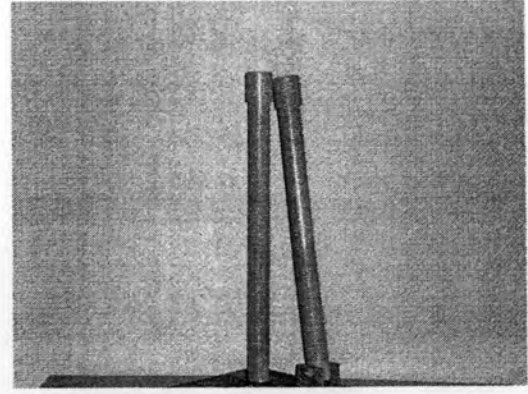


รูป 2-7(ค)

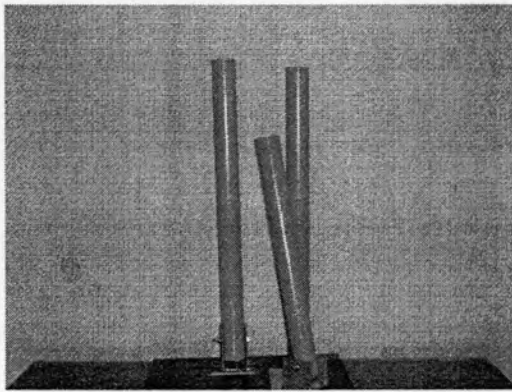
รูป 2-7 แบบจำลองเสาเข็มกลุ่ม (ก) เสาเข็มเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล (ข) เสาเข็มเอียงในระนาบขนานกับทิศทางการไหล (ค) เสาเข็มเอียงในระนาบเดียวกับทิศทางการไหล



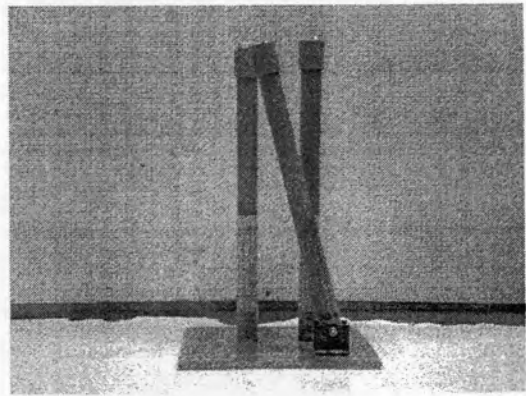
ก) แบบจำลองเสาเข็มกรณีตั้งตรง 3 ต้น



ข) แบบจำลองเสาเข็มเอียงในระนาบการไหล



ค) แบบจำลองเสาเข็มในระนาบการเอียง
ทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล



ง) แบบจำลองเสาเข็มในระนาบการเอียง
ตั้งฉากกับทิศทางการไหล

รูป 2-8 ตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง