



บทที่ 4

การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์

จุดมุ่งหมายของการศึกษานี้เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของการเอียงของเสาชิมในกลุ่มเสาชิมที่มีต่อความลึกกัดเซาะของเสาชิมที่เอียง และเสาชิมใกล้เคียงที่ตั้งตรงในกลุ่มเสาชิม โดยแยกการทดลองออกเป็น 3 ส่วน แบ่งเป็น 15 กรณีศึกษา รวมการทดลองทั้งสิ้น 168 การทดลอง ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ทั้งนี้การนำเสนอผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองจะแยกพิจารณาออกเป็น 3 ส่วน เนื่องด้วยการเปลี่ยนระนาบการเอียงของเสาชิมใน 3 ระนาบตั้ง (horizontal inclination plane) คือ ระนาบตั้งแนวเดียวกับทิศทางการไหล โดยมีมุมของระนาบเอียง (angle of inclination plane, α) เท่ากับ 0° ระนาบตั้งในแนวทแยงกับทิศทางการไหล โดยมีมุมของระนาบเอียง (angle of inclination plane, α) เท่ากับ 45° และระนาบตั้งในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหล โดยมีมุมของระนาบเอียง (angle of inclination plane, α) เท่ากับ 90° ซึ่งในแต่ละระนาบการเอียงจะทดลองกับเสาชิมที่ต่างจำนวนกัน ขึ้นอยู่กับเสาชิมข้างเคียงที่คาดว่าจะได้รับผลจากการเอียงของเสาชิมตามระนาบการเอียงนั้นๆ โดยที่การเอียงของเสาชิมในระนาบการเอียงตามแนวการไหลจะใช้เสาชิมจำนวน 2 ต้น ส่วนการเอียงของเสาชิมในระนาบการเอียงทแยงและตั้งฉากกับทิศทางการไหลจะใช้เสาชิมจำนวน 3 ต้นเท่ากัน

จากการศึกษาที่ผ่านมาความลึกหลุมกัดเซาะ (d_s) ในเสาชิมกลุ่ม ขึ้นกับ ขนาดเสาชิม (D) ความเร็วการไหล (V) ความลึกการไหล (y) ขนาดวัสดุท้องน้ำ (d_{50}) ระยะห่างระหว่างเสาชิม (G) และรูปแบบการจัดวางเสาชิม แต่จากการทดลองเพื่อให้ได้ผลมาวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของมุมเอียงเสาชิม (β) จึงได้คงปัจจัย ขนาดเสาชิม (D) ขนาดวัสดุท้องน้ำ (d_{50}) และระยะห่างระหว่างเสาชิม (G) ให้มีค่าเท่ากันทุกการทดลอง รูปแบบการจัดวางเสาชิมจะมีลักษณะแบบเดียวกัน ส่วนตัวแปรความเร็วการไหล (V) ซึ่งอยู่ในกลุ่มตัวแปรของค่าฟรูดนัมเบอร์ (V/\sqrt{gy}) นั้นจะถูกกำหนดให้มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละการทดลอง ส่วนกลุ่มตัวแปรของค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ (VD/v) จะไม่นำมาพิจารณา เนื่องเพราะการศึกษานี้มีช่วงของค่าดังกล่าวที่ไม่กว้างมากพอที่จะเห็นถึงความแตกต่างของค่าความลึกหลุมกัดเซาะอย่างชัดเจนจึงได้ละผลดังกล่าว ดังนั้นจากการใช้เทคนิควิเคราะห์มิติ (dimensional analysis) สามารถเขียนฟังก์ชันอธิบายความสัมพันธ์ความลึกการกัดเซาะในรูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (dimensionless parameter) ของสมการ 2-8 ใหม่ได้เป็น

$$\frac{d_s}{D} = \Phi \left[\frac{y}{D}, \beta, \alpha \right] \quad (4-1)$$

โดยตัวแปรของปัญหาที่เป็นตัวแปรตาม คือ (d_s/D) จะถูกนำมาวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระ คือ กลุ่มตัวแปรการไหลที่อยู่ในรูปของค่าความลึกการไหลที่สัมพันธ์กับขนาดเสาเข็ม (y/D) และตัวแปรมุมเอียงของเสาเข็ม (inclination angle, β) โดยแยกวิเคราะห์ในแต่ละมุมของระนาบการเอียงของเสาเข็ม (angle of inclination plane, α) พร้อมทั้งการวิเคราะห์ผลของมุมเอียงร่วมกับระนาบการเอียงของเสาเข็ม ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความลึกหลุมกัดเซาะ ดังกล่าวต่อไปนี้

4.1 ความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้น และ 3 ต้นที่ตั้งตรง

เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการศึกษา เพื่อดูถึงผลการเอียงของเสาเข็มต้นหน้าในเสาเข็มกลุ่มต่อความลึกหลุมกัดเซาะของกลุ่มเสาเข็ม และกลุ่มเสาเข็มที่ใช้ในการศึกษานี้ได้กำหนด เป็นกลุ่มเสาเข็ม 2 ต้น ที่วางเรียงตามแนวการไหลต่อกัน (tandem arrangement) มีระยะห่างระหว่างเสาเป็นสองเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม และกลุ่มเสาเข็ม 3 ต้น ที่วางเป็นสามเหลี่ยมมุมฉาก โดยมีเสาเข็มต้นหน้า (ต้นที่ปรับเอียงในระนาบและมุมต่างๆ) เป็นยอดของสามเหลี่ยม ส่วน 2 ต้นหลังจะเป็นฐานของสามเหลี่ยมที่วางห่างกัน 2 เท่าเส้นผ่านศูนย์กลางเสา และอยู่ในระนาบแนวเดียวกัน (ระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล)

เพื่อเป็นการศึกษาให้ทราบถึงผลการเอียงของเสาเข็มต้นหน้าต่อขนาดความลึกหลุมกัดเซาะของกลุ่มเสาเข็มทั้งหมด จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาถึงความลึกของหลุมกัดเซาะของกลุ่มเสาเข็ม 2 ต้น และ 3 ต้น ดังกล่าวในกรณีตั้งตรง เพื่อให้เป็นการอ้างอิงในการวิเคราะห์เปรียบเทียบ (comparative analysis) กับกรณีที่มีการเอียงของเสาเข็มต้นหน้าที่ระนาบและมุมต่างๆ ดังกล่าว

จากการศึกษาที่ผ่านมาถึงผลของกลุ่มเสาเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะ Hannah (1978) และ Ataie-Ashtiani and Beheshti (2006) ซึ่งให้เห็นว่าผลของกลุ่มเสาเข็มทำให้ขนาดหลุมกัดเซาะเปลี่ยนแปลงไปในแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยขนาดของหลุมกัดเซาะที่เพิ่มขึ้นนั้น ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเสาเข็ม จำนวนเสาเข็ม และตำแหน่งการจัดวางของกลุ่มเสาเข็ม ดังนั้นเมื่อมีการวิเคราะห์ในเชิงเปรียบเทียบกับความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มเดี่ยวแล้ว ผลของกลุ่มเสาเข็มก็จัดอยู่ในรูปสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (K_{Gmn}) ในสมการทั่วไปของความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มเดี่ยว (ดูรายละเอียดในภาคผนวก จ)

ดังนั้นในการวิเคราะห์หาค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาชิมกลุ่มที่ตั้งตรง 3 ต้น ใน การศึกษานี้ จึงได้ใช้แนวทางการศึกษาที่ผ่านมาเพื่อหาความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะกับ ตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

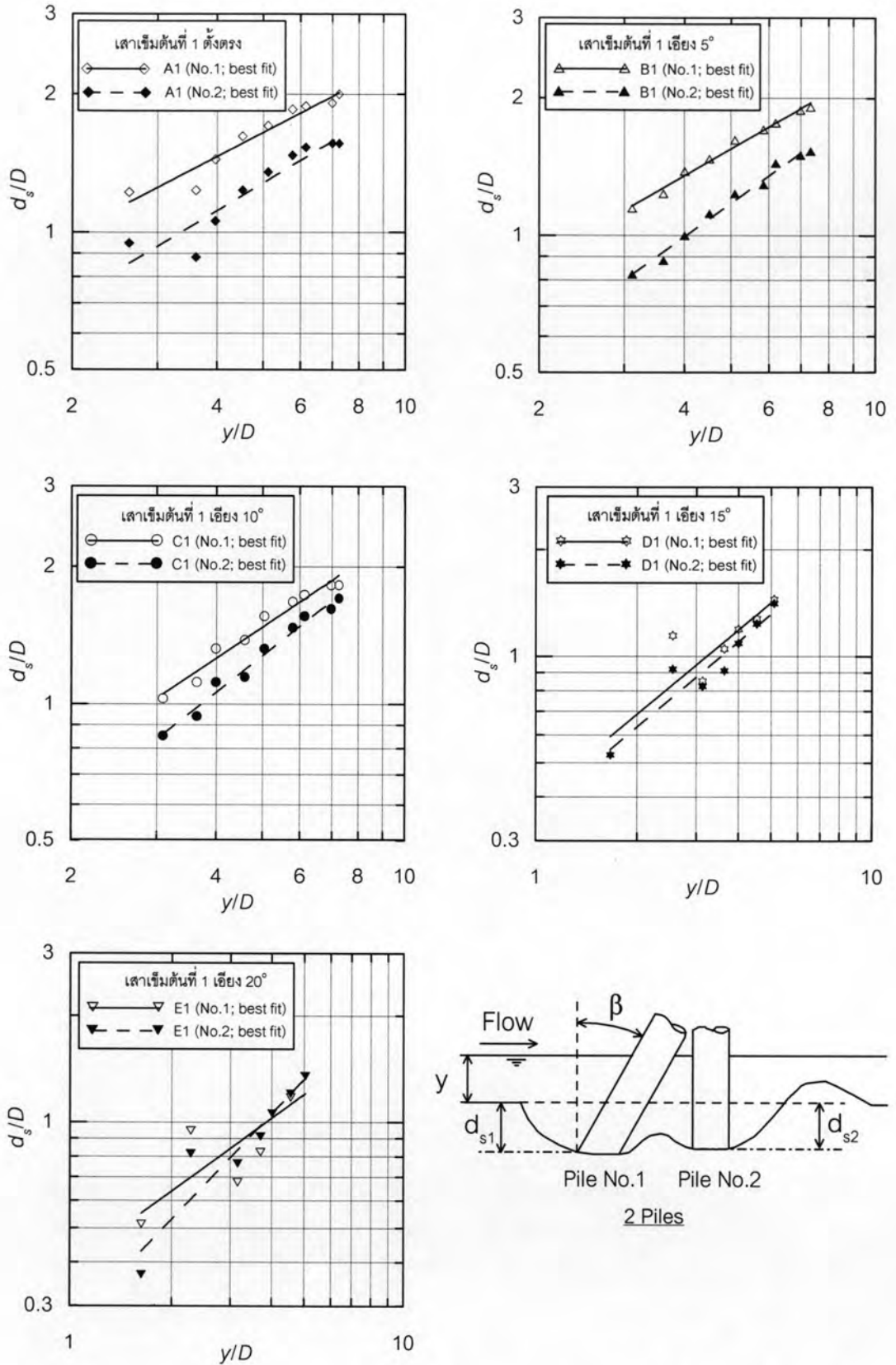
ผลการศึกษาที่ผ่านมาค่าความลึกการไหล (y) และค่าความเร็วการไหล (V) จัดเป็นตัวแปร การไหลที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะ [Laurson and Toch (1956), Ettema (1980), Raudkivi (1986), FHWA (2001)] ดังกล่าวข้างต้นในการทดลองนี้ได้พยายามคง ค่าพารามิเตอร์ให้เท่ากันทุกการทดลอง เพื่อผลของความลึกการไหลจากการวิเคราะห์ ทำให้ตัวแปรการไหลที่เกี่ยวข้องกับความลึกหลุมกัดเซาะจากการใช้เทคนิควิเคราะห์มิติ (dimensional analysis) จะขึ้นอยู่กับค่าความลึกการไหล (y) ซึ่งอยู่ในรูปของค่าความลึกการไหล ที่สัมพันธ์กับขนาดเสาชิม (y/D) ดังนั้น เมื่อพิจารณาเฉพาะกรณีเสาชิมตั้งตรงสามารถเขียน สมการ 4-1 ใหม่ได้เป็น

$$\frac{d_s}{D} = \phi \left[\frac{y}{D} \right] \quad (4-2)$$

จากการศึกษาที่ผ่านมา [Laurson (1952)] ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความ ลึกหลุมกัดเซาะ (d_s) กับค่าความลึกการไหล (y) ที่แปรผันตามกัน ดังนั้น เมื่อนำค่าอัตราส่วนความ ลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาชิม (d_s/D) มาหาความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนความลึกการไหลต่อ ขนาดเสาชิม (y/D) โดยแยกตามระนาบการเอียงของเสาชิมในระนาบการเอียงตามทิศทางการ ไหล ($\alpha = 0^\circ$) เอียงในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล ($\alpha = 45^\circ$) และเอียงในระนาบตั้งฉากกับ ทิศทางการไหล ($\alpha = 90^\circ$) ดังแสดงในรูป 4-1, 4-2 และ 4-3 ตามลำดับ ทำให้สามารถกำหนด สมการความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของชุดข้อมูลนั้นๆ ที่อยู่ในรูปแบบของสมการ 4-3 คือ

$$\frac{d_s}{D} = a \left(\frac{y}{D} \right)^b \quad (4-3)$$

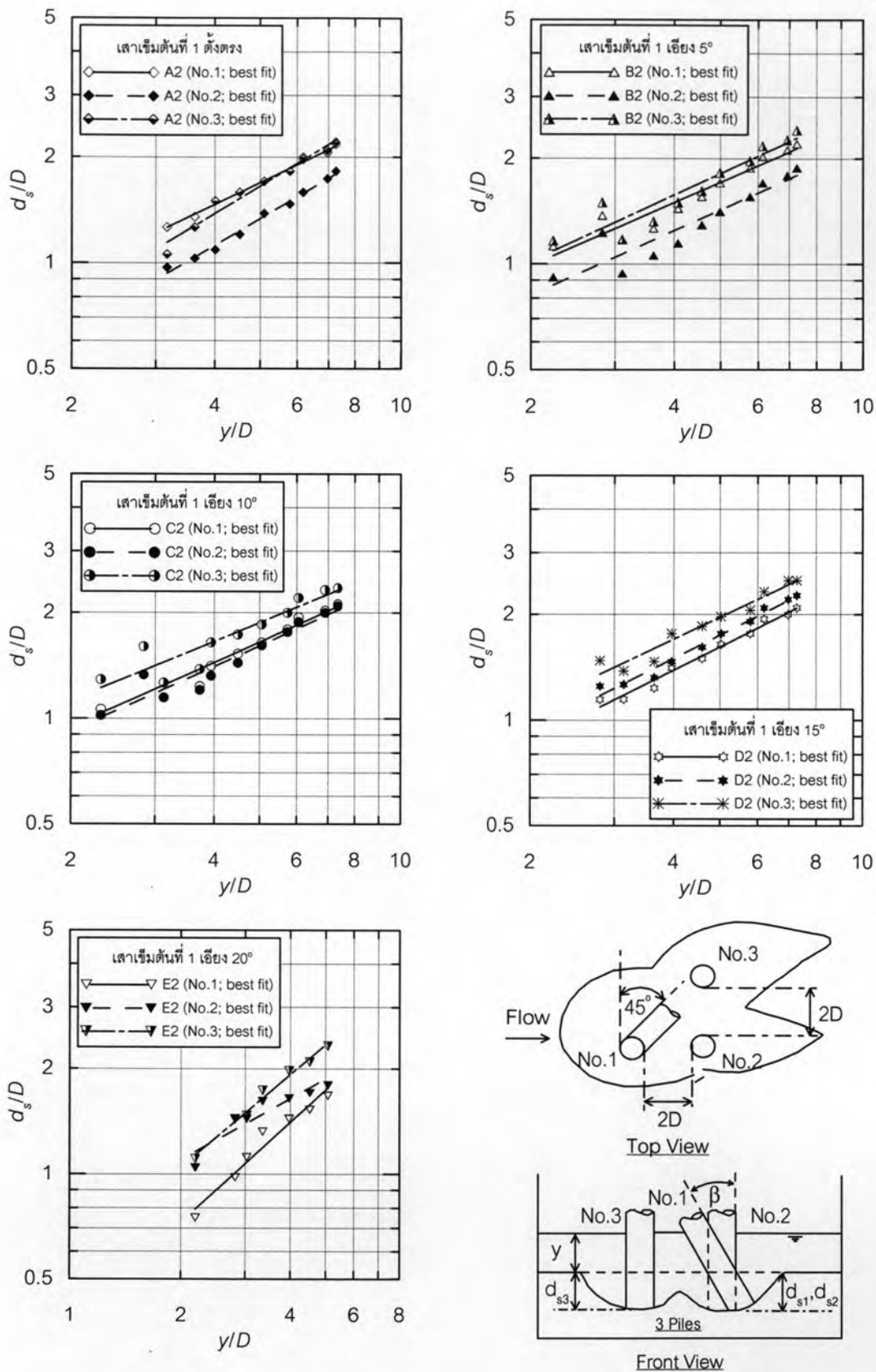
เมื่อ a คือ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ และ b คือ ค่าสัมประสิทธิ์เลขยกกำลัง ซึ่งแสดงค่า สัมประสิทธิ์ทั้งสองของแต่ละชุดข้อมูลในตาราง 4-1 ถึง 4-3



รูป 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม กับ ความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม ของเสาต้นที่ 1 และต้นที่ 2 แยกตามมุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเอียงในระนาบตามทิศทางการไหล

ตาราง 4-1 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดกับข้อมูลการทดลองของมุมเอียงต่างๆ ในระนาบตามแนวการไหล ($\alpha = 0^\circ$)

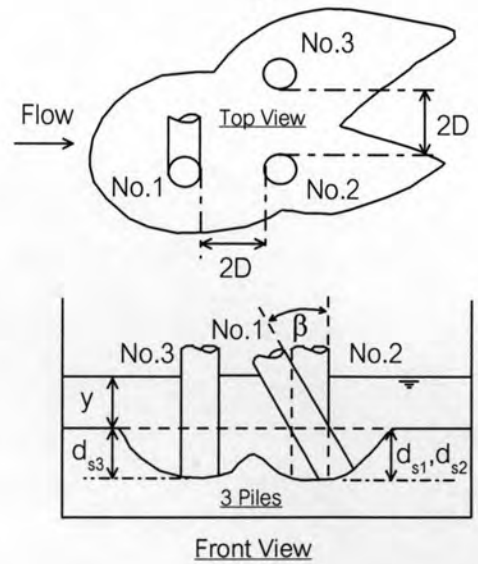
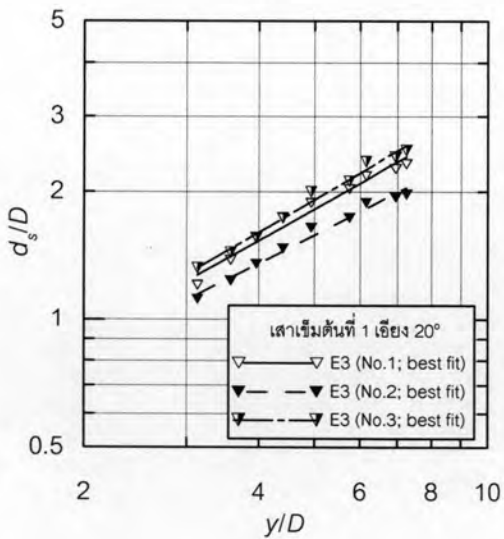
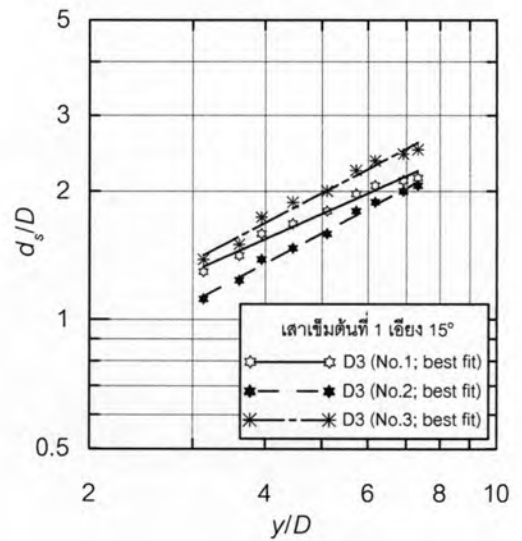
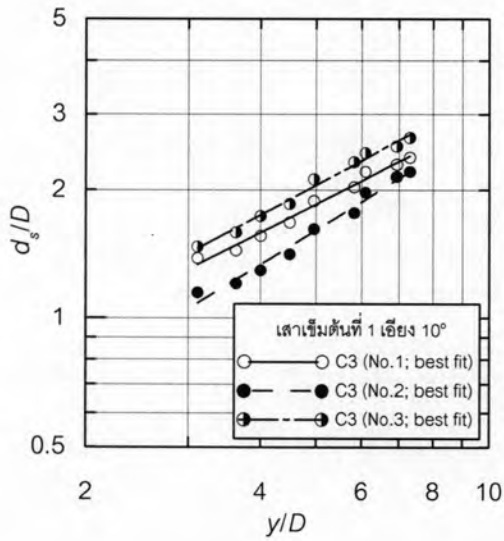
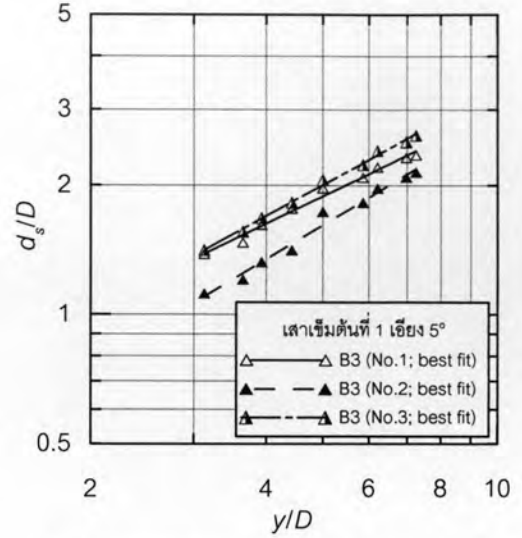
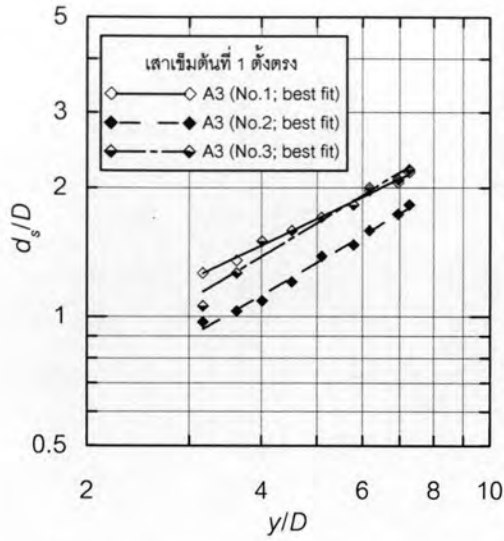
เสาเข็ม	มุมเอียงจากแนวดิ่ง (β)	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ ค่าเลขยกกำลัง และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์		
		a	b	correlation (R^2)
ต้นที่ 1	0°	0.69	0.54	0.993
	5°	0.58	0.61	0.998
	10°	0.48	0.70	0.995
	15°	0.40	0.79	0.961
	20°	0.39	0.69	0.940
ต้นที่ 2	0°	0.47	0.62	0.987
	5°	0.35	0.76	0.992
	10°	0.34	0.82	0.989
	15°	0.36	0.80	0.981
	20°	0.26	0.90	0.979



รูป 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม กับ ความลึกการไหล ต่อขนาดเสาเข็ม ของเสาต้นที่ 1 ต้นที่ 2 และต้นที่ 3 แยกตามมุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเอียงในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล

ตาราง 4-2 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดกับข้อมูลการทดลองของมุมเอียงต่างๆ ในระนาบที่แย้งกับทิศทางการไหล ($\alpha = 45^\circ$)

เสาเข็ม	มุมเอียงจากแนวดิ่ง (β)	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ ค่าเลขยกกำลัง และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์		
		a	b	correlation (R^2)
ต้นที่ 1	0°	0.60	0.64	0.998
	5°	0.65	0.60	0.989
	10°	0.62	0.60	0.991
	15°	0.54	0.67	0.997
	20°	0.38	0.95	.0992
ต้นที่ 2	0°	0.38	0.78	0.995
	5°	0.53	0.61	0.981
	10°	0.61	0.61	0.976
	15°	0.58	0.68	0.986
	20°	0.74	0.58	0.989
ต้นที่ 3	0°	0.45	0.80	0.995
	5°	0.67	0.63	0.983
	10°	0.77	0.55	0.982
	15°	0.70	0.64	0.994
	20°	0.57	0.80	0.998



รูป 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม กับ ความลึกการไหล ต่อขนาดเสาเข็ม ของเสาต้นที่ 1 ต้นที่ 2 และต้นที่ 3 แยกตามมุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล

ตาราง 4-3 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดกับข้อมูลการทดลองของมุมเอียงต่างๆ ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ($\alpha = 90^\circ$)

เสาเข็ม	มุมเอียงจากแนวดิ่ง (β)	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ ค่าเลขยกกำลัง และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์		
		a	b	correlation (R^2)
ต้นที่ 1	0°	0.60	0.64	0.998
	5°	0.65	0.66	0.998
	10°	0.61	0.68	0.998
	15°	0.66	0.60	0.997
	20°	0.53	0.76	0.996
ต้นที่ 2	0°	0.38	0.78	0.995
	5°	0.43	0.82	0.997
	10°	0.42	0.83	0.997
	15°	0.50	0.73	0.998
	20°	0.52	0.63	0.997
ต้นที่ 3	0°	0.45	0.80	0.995
	5°	0.60	0.74	0.998
	10°	0.64	0.72	0.998
	15°	0.63	0.71	0.997
	20°	0.54	0.79	0.997

ผลการศึกษที่ผ่านมาดังกล่าวข้างต้น พบว่า ความลึกหลุมกัดเซาะกับความลึกการไหล และขนาดเสาเข็ม ที่อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ดังสมการ 4-2 นั้น มีรูปแบบของสมการความสัมพันธ์ดังสมการ 4-3 โดยมีค่าเลขยกกำลัง (b) น้อยกว่า 1.0 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเพิ่มขึ้นของขนาดความลึกหลุมกัดเซาะ (d_s) ตามขนาดของเสาเข็ม (D) และความลึกการไหล (y) ในอัตราที่ลดลง ซึ่งค่าเลขยกกำลัง (b) มีความผันแปรระหว่าง 0.2 ถึง 1.0

นอกจากนี้ในการศึกษาถึงผลต่อรูปแบบของเสา (pier geometry) ไม่ว่าจะเป็น รูปร่างของเสา (pier shape) เสาที่มีหลากหลายองค์ประกอบ (complex pier) หรือว่า เสาที่มีการจัดวางเป็นเสาเข็มกลุ่ม (pile group) เป็นต้น ก็พบว่าความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปร (d_s/D และ y/D) ยังคงซึ่งรูปแบบความสัมพันธ์หรือสมการความสัมพันธ์คงเดิม นั่นก็คือสมการ 4-3 และมีค่าเลขยกกำลัง (b) ที่ค่อนข้างคงที่หรือเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย แต่ค่าที่เปลี่ยนแปลงไปของสมการกำหนดความสัมพันธ์ดังกล่าวอย่างมีนัย ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (a) แสดงให้เห็นว่า รูปแบบของเสาต่อม่อที่เปลี่ยนไปจากรูปแบบต่อม่อมาตรฐาน (รูปทรงกระบอก) ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดความลึกหลุมกัดเซาะที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดความลึกหลุมกัดเซาะของเสาต่อม่อมาตรฐานรูปทรงกระบอกในทางที่เพิ่มหรือลดลง ตามแต่ลักษณะที่เปลี่ยนไป ซึ่งก็คือ การยกตัวขึ้นหรือลงของชุดข้อมูลนั่นเอง โดยไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์เลขยกกำลัง (b) แต่อย่างใด

ในการศึกษาถึงผลการเอียงของเสาเข็ม ก็ถือว่าการเอียงของเสาเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเสาเข็มเช่นเดียวกัน ทั้งในแง่ของการเปลี่ยนขนาด (ขนาด projection width) และ ความสูงของเสา (ความยาวเสาที่สัมผัสน้ำ) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่น่าจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนไปของขนาดความลึกหลุมกัดเซาะ ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดความลึกหลุมกัดเซาะของเสาต่อม่อรูปทรงกระบอกตั้งตรงเช่นเดียวกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรค่าความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม (d_s/D) กับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) จากข้อมูลการศึกษานี้ของเสาตั้งตรง และเอียงในระนาบและมุมต่างๆ ดังรูป 4-1 ถึง 4-3 ก็พบว่าความสัมพันธ์เป็นไปในทางเดียวกัน ทำให้สามารถใช้สมการ 4-3 มาอธิบายข้อมูลความสัมพันธ์ในการศึกษานี้ได้ โดยมีค่าเลขยกกำลัง (b) ที่ใกล้เคียงกัน แต่มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (a) ที่แตกต่างกันออกไป

อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของค่าเลขยกกำลัง (b) ที่ไม่เท่ากันน่าจะมีสาเหตุเนื่องเพราะความผันผวนของข้อมูลที่เกิดขึ้นจากการเก็บตัวอย่างเพียงครั้งเดียว (single-sample data) ในแต่ละการทดลอง ซึ่งถ้าหากมีการเก็บตัวอย่างในแต่ละการทดลองซ้ำหลายครั้ง (multi-sample data) ก็น่าจะสามารถลดความผันผวนของข้อมูลลงได้ ดังนั้น ในการวิเคราะห์จึงอยู่บนสมมติฐานที่ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม (d_s/D) กับค่าความลึกการไหลต่อ

ขนาดเสาเข็ม (y/D) มีลักษณะความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน โดยมีค่าเลขยกกำลัง (b) ในสมการเป็นค่าเดียวกัน ที่ได้จากการใช้ค่าเลขยกกำลังในทุกกรณีมาพิจารณาหาเป็นค่าเฉลี่ยของค่าเลขยกกำลัง (b) ที่ถือว่าเป็นค่าเลขยกกำลัง (b) ของสมการความสัมพันธ์ในทุกกรณี

ทำให้สามารถหาสมการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s1}/D) กับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) ในกรณีเสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น และในกรณีเสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น โดยมีค่าเลขยกกำลัง (b) เฉลี่ยเท่ากับ 0.65 ได้ดังสมการ 4-4 และ 4-5 ตามลำดับ

$$\frac{d_{s1}}{D} = 0.58 \left(\frac{y}{D} \right)^{0.65} \quad (4-4)$$

$$\frac{d_{s1}}{D} = 0.60 \left(\frac{y}{D} \right)^{0.65} \quad (4-5)$$

สมการ 4-4 และ 4-5 เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 ในกรณีเสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น และในกรณีเสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น ตามลำดับ ซึ่งจะใช้เป็นกรณีเปรียบเทียบกับค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 ที่มีมุมเอียงต่างๆ โดยสมการ 4-4 จะใช้เปรียบเทียบกับค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 ที่มีระนาบการเอียงแนวเดียวกับทิศทางการไหล ($\alpha = 0^\circ$)

ส่วนสมการ 4-5 ใช้เปรียบเทียบกับค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 ในระนาบการเอียงทแยงมุมกับทิศทางการไหล ($\alpha = 45^\circ$) และในระนาบการเอียงตั้งฉากกับทิศทางการไหล ($\alpha = 90^\circ$) ซึ่งสมการทั้ง 2 มีรูปแบบที่เหมือนกัน บ่งบอกถึงลักษณะทางกายภาพของความลึกหลุมกัดเซาะที่มีต่อค่าความลึกการไหลเป็นแบบเดียวกันทั้ง 2 สมการ ต่างกันตรงที่ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ ทั้งนี้เนื่องจากผลของจำนวนเสาเข็มที่ใช้ในการทดลองไม่เท่ากันดังที่กล่าวไปแล้วในตอนต้น ทำให้ในกรณีเสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น ค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 จะได้รับผลจากการมีเสาเข็มต้นที่ 3 ที่อยู่ข้างเคียง เป็นเหตุให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะมีมากกว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ในกรณีเสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น ประมาณ 3% ดังรูป 4-4

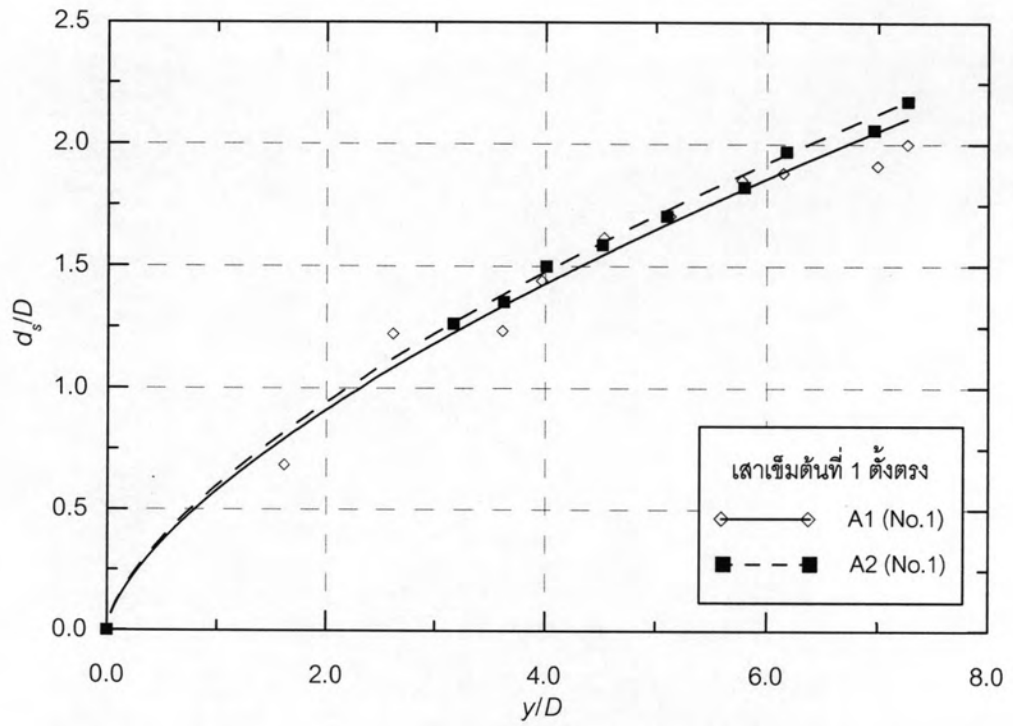
ส่วนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม กับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม ของเสาต้นที่ 2 ในกรณีเสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น และเสาต้นที่ 2 และต้นที่ 3 ในกรณีเสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น สามารถกำหนดความสัมพันธ์ได้ตามสมการ 4-6, 4-7 และ 4-8 ตามลำดับ ดังนี้

$$\text{เสาเข็มต้นที่ 2 กรณีตั้งตรง 2 ต้น} \quad \frac{d_{s2}}{D} = 0.45 \left(\frac{y}{D} \right)^{0.65} \quad (4-6)$$

$$\text{เสาเข็มต้นที่ 2 กรณีตั้งตรง 3 ต้น} \quad \frac{d_{s2}}{D} = 0.48 \left(\frac{y}{D} \right)^{0.65} \quad (4-7)$$

$$\text{เสาเข็มต้นที่ 3 กรณีตั้งตรง 3 ต้น} \quad \frac{d_{s3}}{D} = 0.60 \left(\frac{y}{D} \right)^{0.65} \quad (4-8)$$

เช่นเดียวกัน สมการกำหนดความสัมพันธ์ทั้ง 3 สมการ มีรูปแบบที่เหมือนกัน ต่างกันตรงที่ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ โดยเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้นที่วางเรียงตามแนวการไหลต่อกัน (tandem arrangement) ค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ย่อมจะต้องน้อยกว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นแรก ดังแสดงในรูป 4-1 และ 4-2 ซึ่งเป็นไปตามผลการศึกษาที่ผ่านมาของ Hannah (1978) และ Ashtiani and Beheshti (2006) จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณในสมการ 4-6 และ 4-7 มีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณในสมการ 4-4 และ 4-5 ตามลำดับ ส่วนเสาเข็มต้นที่ 3 กรณีตั้งตรง 3 ต้น สมการ 4-8 จะมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณและค่าเลขยกกำลังที่เท่ากับสมการ 4-5 เนื่องจากเสาเข็มต้นที่ 3 ได้รับการปะทะจากกระแสน้ำโดยตรงเช่นเดียวกับเสาเข็มต้นที่ 1 และบ่งชี้ถึงอิทธิพลของเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง ในกรณีเสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 แต่อย่างใด



รูป 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาค้ำยันที่ 1 ต่อขนาดเสาค้ำกับความลึกการไหลต่อขนาดเสาค้ำ กรณีเสาค้ำยันตั้งตรง 2 ต้น และ 3 ต้น

4.2 ผลของมุมเอียงเสาเข็มกับความลึกหลุมกัดเซาะ

ในหัวข้อนี้วิเคราะห์ถึงผลของการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงเสาเข็มจากแนวดิ่ง (β) 5 มุมเอียง ในแต่ละระนาบการเอียง (α) 3 ระนาบ ที่มีต่อความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่เอียง โดยแยกพิจารณาออกเป็น 3 ส่วน ตามระนาบการเอียงของเสาเข็ม และจากหัวข้อ 4.1 ที่กล่าวถึงผลของตัวแปรการไหลที่อยู่ในรูปอัตราส่วนความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) ที่มีต่อค่าความลึกหลุมกัดเซาะ ในกรณีเสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น และ 3 ต้น สามารถเขียนสมการ 4-2 ที่เป็นฟังก์ชันกับมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ได้เป็น

$$\frac{d_{s1}}{D} = \Phi \left[\frac{y}{D}, \beta \right] \quad (4-9)$$

สมการ 4-9 ใช้เป็นฟังก์ชันที่อธิบายผลของการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงจากกรณีเสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น โดยมีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงในระนาบเดียวกับทิศทางการไหลและมีเสาเข็มต้นที่ 2 อยู่ห่างไปทางท้ายน้ำเป็นระยะสองเท่าขนาดเสาเข็ม ($G = 2D$) และอธิบายผลของการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงจากกรณีเสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น โดยมีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล และในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ซึ่งมีเสาเข็มต้นที่ 2 อยู่ห่างไปทางท้ายน้ำเป็นระยะ 2 เท่าของขนาดเสาเข็ม ($G = 2D$) และมีเสาเข็มต้นที่ 3 อยู่ห่างจากเสาเข็มต้นที่ 2 ไปทางซ้ายเป็นระยะ 2 เท่าของขนาดเสาเข็ม ($G = 2D$) ดังกล่าวต่อไปนี้

4.2.1 ผลของมุมเอียงเสาเข็มกรณีเอียงอยู่ในระนาบเดียวกับทิศทางการไหล ($\alpha = 0^\circ$)

จากหัวข้อ 4.1 นำค่าสัมประสิทธิ์เลขยกกำลัง (b) เท่ากับ 0.65 ที่ได้จากการเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์เลขยกกำลัง (b) ของเสาเข็มต้นที่ 1 ที่เอียงทำมุม (β) ต่างๆ ในระนาบการเอียง 3 ระนาบ มาใช้ประกอบพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s1}/D) กับอัตราส่วนค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) ได้ดังรูป 4-5 โดยแยกตามมุมเอียงของเสาเข็มต้นแรก ตั้งแต่เสาเข็มตั้งตรงจนถึงเสาเข็มเอียง 20° และรวมทุกมุมในรูปเดียวกันแสดงในรูป 4-6 และทำการวิเคราะห์โดยพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟจะลดลงจากกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง เมื่อมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 เพิ่มขึ้น จากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงสมการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s1}/D) ขึ้นกับอัตราส่วนค่าความลึกการไหลต่อ

ขนาดเสาเข็ม (y/D) ที่เปลี่ยนไปตามมุมเอียงต่างๆ มีรูปแบบความสัมพันธ์ดังสมการ 4-3 และแสดงค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ในตาราง 4-4

ตาราง 4-4 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ของมุมเอียงต่างๆ ($\alpha = 0^\circ$)

ค่าสัมประสิทธิ์ และ ค่าเลขยกกำลัง	มุมเอียงจากแนวดิ่ง (β) ในระนาบเดียวกับทิศทางการไหล			
	5° (B1; No.1)	10° (C1; No.1)	15° (D1; No.1)	20° (E1; No.1)
a	0.55	0.52	0.48	0.43
b	0.65	0.65	0.65	0.65
correlation (R^2)	0.998	0.995	0.961	0.939

จากสมการกำหนดความสัมพันธ์ที่ได้ในแต่ละมุมเอียง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์เลขยกกำลัง (b) เฉลี่ยโดยประมาณเท่ากันทุกมุมเอียง จะเห็นถึงความแตกต่างเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์ตัวคุณ (a) ทำให้ทราบถึงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่มีต่อค่าความลึกการไหลที่ไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นความแตกต่างเดียวที่เกิดขึ้น มาจากลักษณะทางกายภาพของการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงจากแนวดิ่งของเสาเข็มในระนาบเดียวกับทิศทางการไหล ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกหลุมกัดเซาะ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ตัวคุณ (a) ของแต่ละมุมเอียงกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวคุณ (a) ในสมการ 4-4 กรณีเสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น เพื่อหาค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 (K_{β_1}) คูณกับสมการของเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง ให้ได้สมการความสัมพันธ์ของเสาเข็มต้นที่ 1 ที่เอียงทำมุมต่างๆ ดังนั้นจากสมการ 4-4 เขียนใหม่ได้เป็น

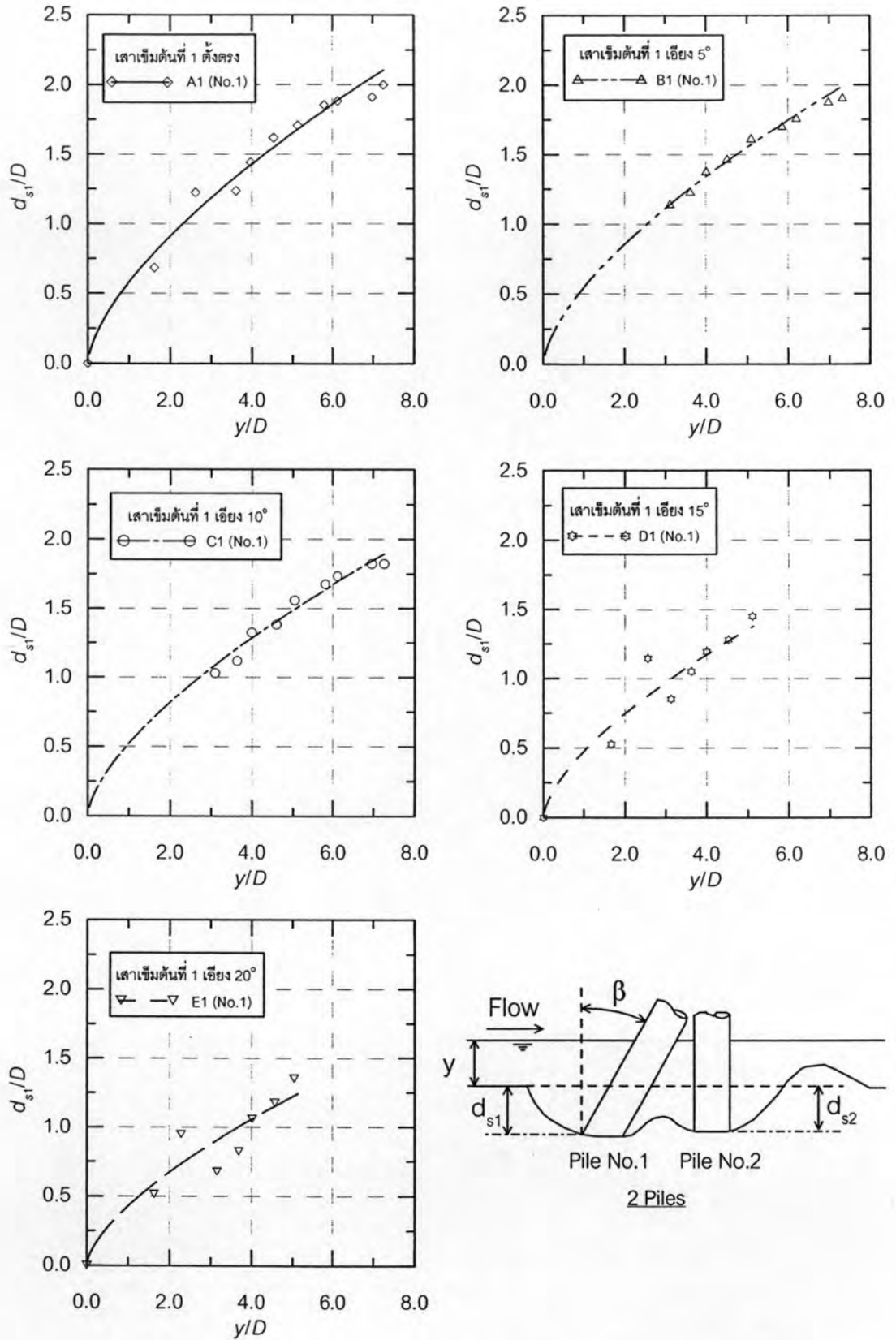
$$\frac{d_{s1}}{D} = 0.58K_{\beta_1} \left(\frac{y}{D} \right)^{0.65} \quad (4-10)$$

โดยที่ค่า K_{β_1} คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 มีลักษณะลดลงตามมุมเอียงจากแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีอัตราการลดลงของขนาดความลึกหลุมกัดเซาะในแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ดังแสดงในรูป 4-7 และในตาราง 4-5

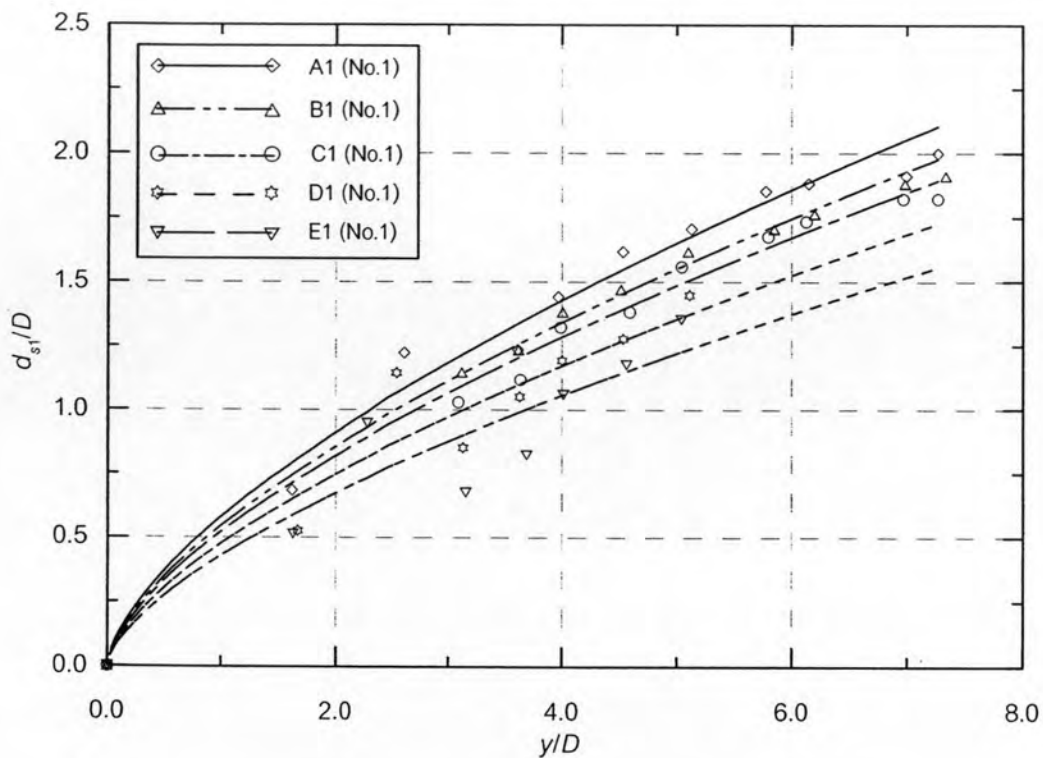
ตาราง 4-5 ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 (K_{β_1}) ในระนาบเอียงตามแนวการไหล

ชื่อกรณีศึกษา	มุมเอียงของเสาเข็ม (β)	K_{β_1}
A1 (Pile No.1)	0°	1.00
B1 (Pile No.1)	5°	0.94
C1 (Pile No.1)	10°	0.90
D1 (Pile No.1)	15°	0.82
E1 (Pile No.1)	20°	0.74

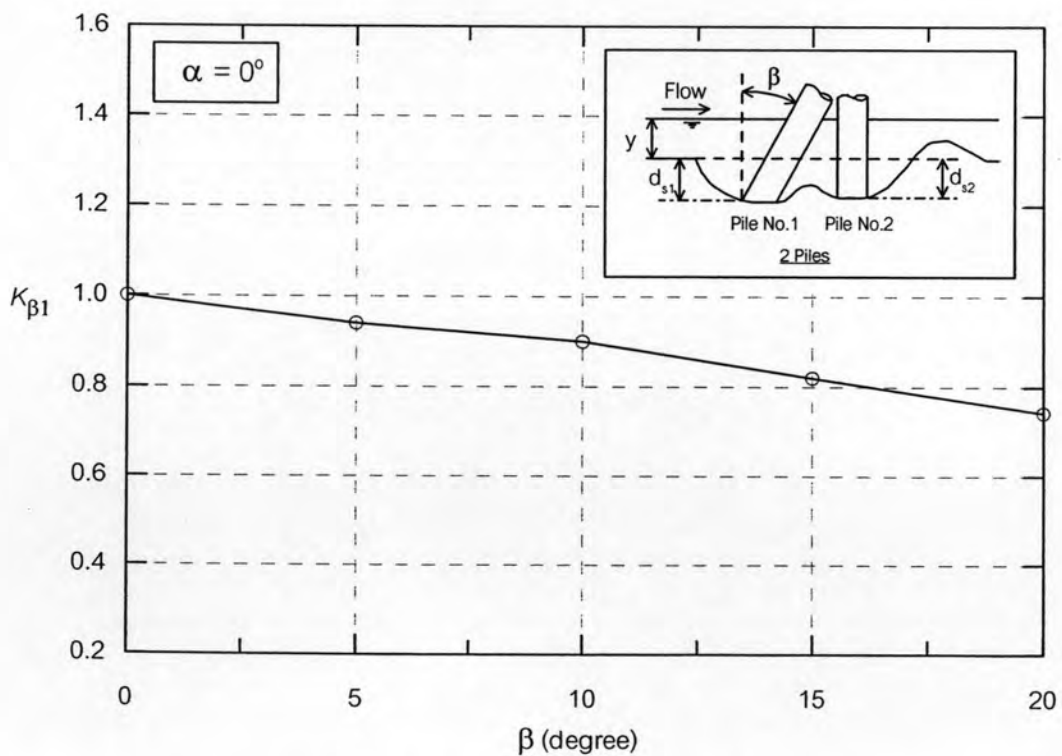
จากกราฟความสัมพันธ์ที่แสดงไว้ในรูป 4-6 จะเห็นว่าเมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงจากแนวตั้ง ในระนาบการเอียงแนวเดียวกับทิศทางการไหล สมการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_s/D) กับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) จะเปลี่ยนไป โดยสามารถใช้ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ในระนาบการเอียงตามแนวการไหล (K_{β_1}) คูณกับสมการของเสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น เพื่อให้ได้สมการความสัมพันธ์ของมุมเอียงนั้นๆ ทั้งนี้จะเห็นว่าเมื่อมุมเอียงจากแนวตั้งของเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงไปทางซ้ายมากขึ้น ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียง (K_{β_1}) จะลดลง ดังรูป 4-7 บ่งบอกถึงความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าลดลง 6%, 10%, 18% และ 26% สำหรับมุมเอียง (β) ของเสาเข็มต้นที่ 1 ทำมุม 5°, 10°, 15° และ 20° จากแนวตั้ง ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่ามุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 จะมีอิทธิพลต่อความลึกหลุมกัดเซาะอย่างมีนัยสำคัญ



รูป 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาค้ำยันที่ 1 ต่อขนาดเสาค้ำยันกับความลึกการไหลต่อขนาดเสาค้ำยัน เมื่อแยกตามมุมเอียงของเสาค้ำยันในระนาบตามแนวทิศทางการไหล



รูป 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็มกับความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม เมื่อรวมทุกมุมอยู่ในรูปเดียวกัน



รูป 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ $K_{\beta 1}$ กับมุมเอียงเสาเข็ม ในกรณีเสาเข็มเอียงในระนาบเดียวกับทิศทางการไหล

4.2.2 ผลของมุมเอียงเสาสีเสริมกรณีเอียงในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล ($\alpha = 45^\circ$)

วิเคราะห์ค่าความลึกหลุมกัดเซาะกรณีเสาสีเสริมต้นที่ 1 เอียงทำมุม 0° จนถึง 20° กับแนวตั้ง ในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหลของน้ำ ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาสีเสริมต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาสีเสริม (d_s/D) กับอัตราส่วนค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาสีเสริม (y/D) ดังรูป 4-8 ซึ่งแบ่งตามมุมเอียงต่างๆ 5 มุม และแสดงเฉพาะค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาสีเสริมต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาสีเสริมของทุกมุมรวมกัน ดังรูป 4-9 จากกราฟความสัมพันธ์ในรูป 4-8 สามารถแสดงสมการกำหนดเส้นแนวโน้มของเสาสีเสริมต้นที่ 1 เอียงในระนาบทแยงกับทิศทางการไหลเป็นมุม 5° , 10° , 15° และ 20° ให้อยู่ในรูปสมการ 4-3 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาสีเสริมต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาสีเสริม (d_s/D) กับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาสีเสริม (y/D) ดังมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ได้จากการใช้ค่าเฉลี่ยของค่าเลขยกกำลัง (b) ประมาณเท่ากับ 0.65 แสดงในตาราง 4-6

ตาราง 4-6 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ของมุมเอียงต่างๆ ($\alpha = 45^\circ$)

ค่าสัมประสิทธิ์ และ ค่าเลขยกกำลัง	มุมเอียงจากแนวตั้ง (β) ในระนาบทแยงมุมกับทิศทางการไหล			
	5° (B2; No.1)	10° (C2; No.1)	15° (D2; No.1)	20° (E2; No.1)
a	0.59	0.58	0.56	0.54
b	0.65	0.65	0.65	0.65
correlation (R^2)	0.989	0.991	0.997	0.985

ใช้สมการ 4-5 กรณีเสาสีเสริมตั้งตรง 3 ต้น เป็นสมการตั้งต้น เปรียบเทียบกับค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่เกิดจากการเอียงของเสาสีเสริมต้นที่ 1 ในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล เมื่อพิจารณาค่าเลขยกกำลัง (b) และค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (a) ที่ได้จากสมการกำหนดความสัมพันธ์ของเสาสีเสริมต้นที่ 1 เอียงทำมุมต่างๆ กับสมการกรณีเสาสีเสริมตั้งตรง 3 ต้น โดยมีค่าเลขยกกำลังประมาณเท่ากัน และมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณจะมีค่าลดลงจากกรณีเสาสีเสริมต้นที่ 1 ตั้งตรง และจะลดลงเรื่อยๆ ตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น

พิจารณาเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณของแต่ละมุมเอียงกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณในสมการ 4-5 ของกรณีเสาสีเสริมตั้งตรง 3 ต้น เพื่อหาค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงของเสาสีเสริมต้นที่ 1 (K_{β_2}) มาคูณกับสมการของเสาสีเสริมต้นที่ 1 ตั้งตรง เพื่อให้ได้สมการความสัมพันธ์ของเสาสีเสริมต้นที่ 1 ที่เอียงทำมุมต่างๆ ดังนั้นจากสมการ 4-5 เขียนใหม่ได้เป็น

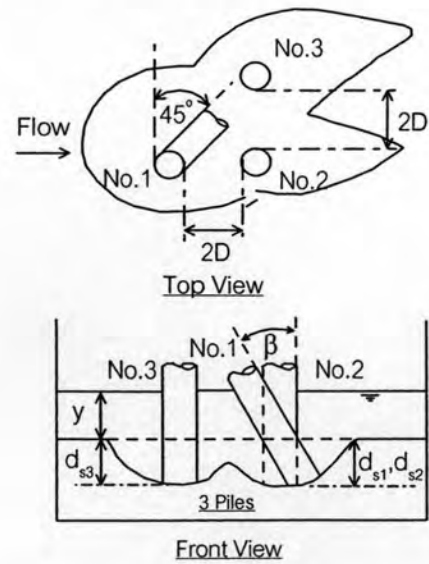
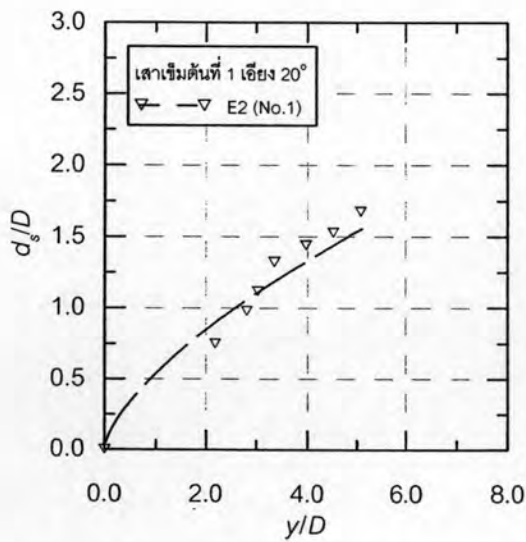
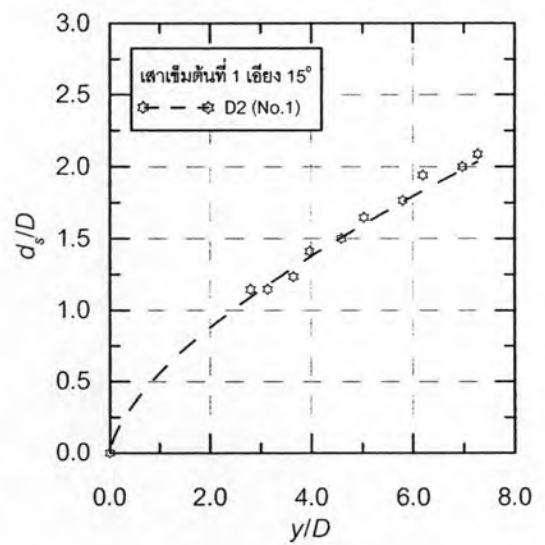
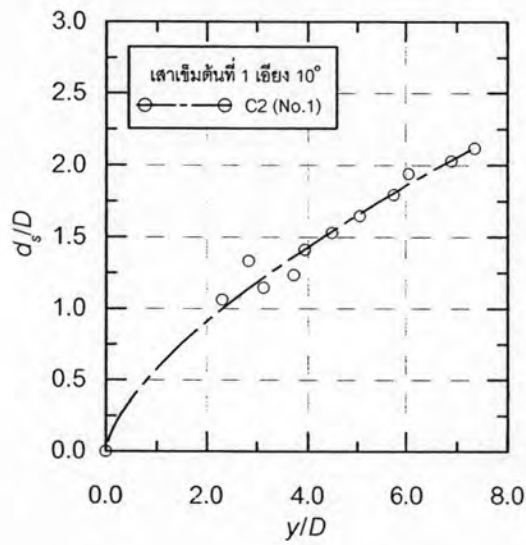
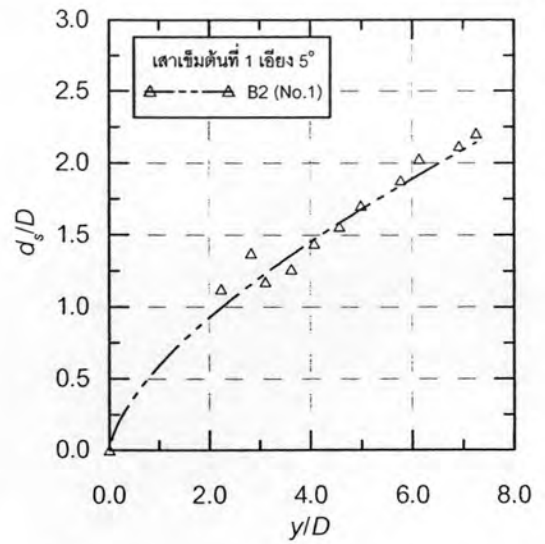
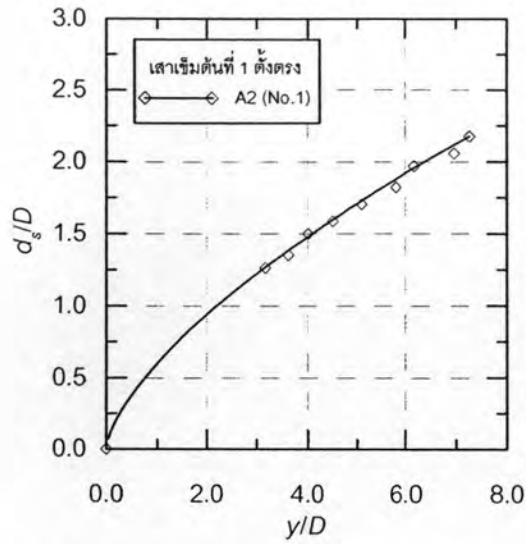
$$\frac{d_{s1}}{D} = 0.60K_{\beta 2} \left(\frac{y}{D} \right)^{0.65} \quad (4-11)$$

เมื่อค่า $K_{\beta 2}$ คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหลของเสาเข็มต้นที่ 1 มีลักษณะลดลงตามมุมเอียงจากแนวตั้งที่เพิ่มขึ้นดังแสดงรูป 4-10 และแสดงในตาราง 4-7

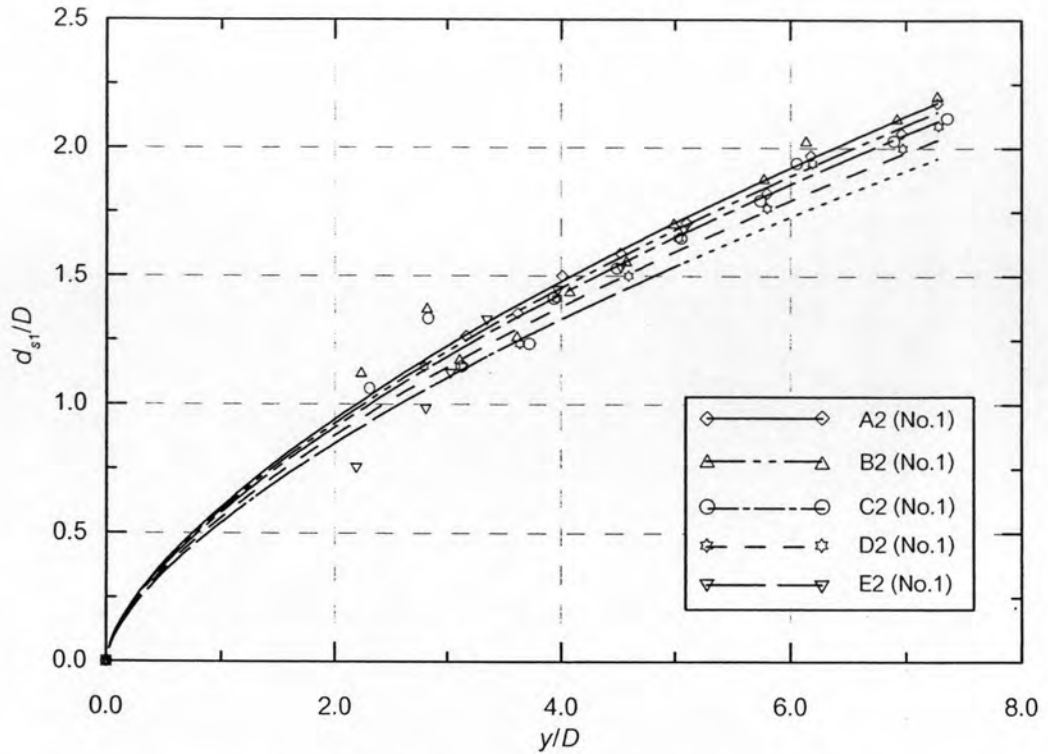
ตาราง 4-7 ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ($K_{\beta 2}$) ในระนาบทแยงกับแนวการไหล

ชื่อกรณีศึกษา	มุมเอียงของเสาเข็ม (β)	$K_{\beta 2}$
A2 (Pile No.1)	0°	1.00
B2 (Pile No.1)	5°	0.99
C2 (Pile No.1)	10°	0.97
D2 (Pile No.1)	15°	0.94
E2 (Pile No.1)	20°	0.91

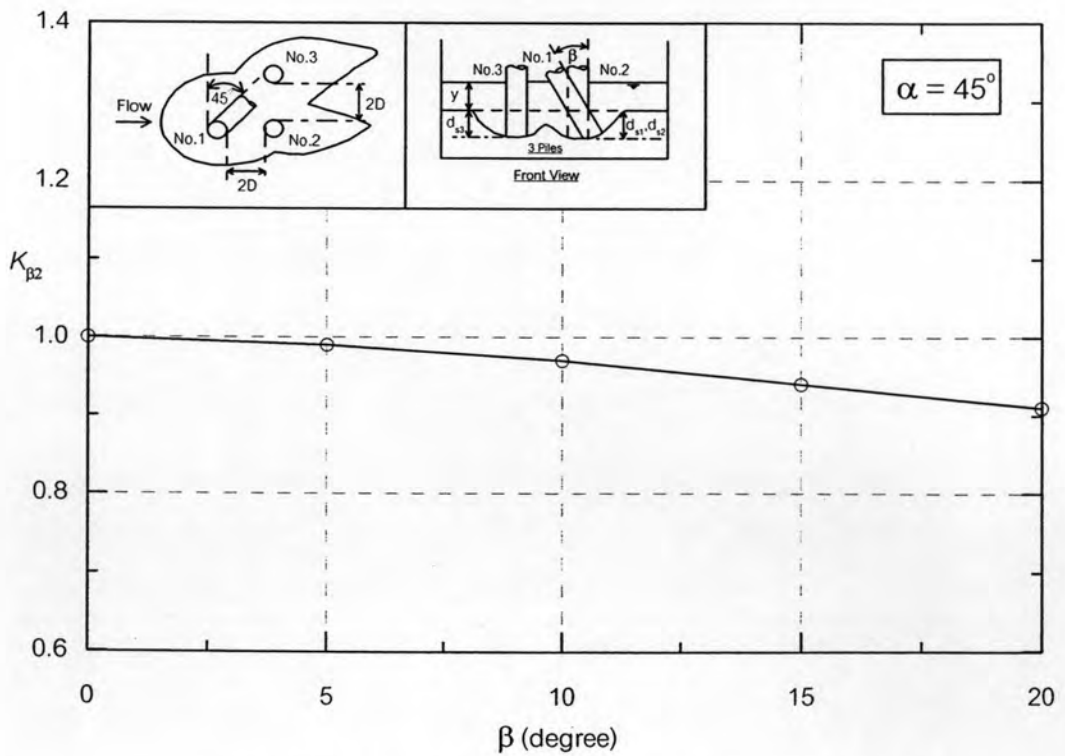
จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมต่างๆ ในระนาบทแยงมุมกับทิศทางการไหล เปรียบเทียบกับเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้นมีน้อยมาก ดังแสดงในรูป 4-9 และเมื่อพิจารณารูป 4-10 ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล ($K_{\beta 2}$) จะมีค่าลดลงไม่มากนักตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วงการเปลี่ยนมุมเอียงจากตั้งตรงเป็น 5° และ 10° ค่าความลึกหลุมกัดเซาะลดลงจากกรณีเสาเข็มตั้งตรงประมาณ 1% และ 3% ตามลำดับ ส่วนเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงเพิ่มขึ้นเป็น 15° และ 20° ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะลดลงประมาณ 6% และ 9% ตามลำดับ ดังนั้นผลของการเอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล ไม่มีนัยต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่แตกต่างไปจากเสาเข็มตั้งตรง



รูป 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาค้ำยันที่ 1 ต่อขนาดเสาค้ำยันกับความลึกการไหลต่อขนาดเสาค้ำยัน เมื่อแยกตามมุมเอียงเสาค้ำยันกรณีเอียงในระนาบที่ขนานกับทิศทางการไหล



รูป 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็มกับความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม เมื่อรวมทุกมุมอยู่ในรูปเดียวกัน



รูป 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ K_{β_1} กับมุมเอียงเสาเข็ม ในกรณีเสาเข็มเอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล

4.2.3 ผลของมุมเอียงเสาชิมกรณีเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ($\alpha = 90^\circ$)

ในกรณีเสาชิมต้นที่ 1 ตั้งตรงของกรณีศึกษาจะใช้ผลการทดลองชุดเดียวกับเสาชิมต้นที่ 1 ตั้งตรงของกรณีศึกษาเสาชิมเอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.1 เนื่องจากมีรูปแบบที่เหมือนกัน ต่างกันตรงระนาบการเอียงของเสาชิมต้นที่ 1 เท่านั้น

การวิเคราะห์จะพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาชิมต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาชิม (d_{s1}/D) กับอัตราส่วนค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาชิม (y/D) ได้ดังรูป 4-11 ซึ่งแยกแต่ละมุมเอียง โดยกำหนดให้ค่าเลขยกกำลัง (b) มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.65 เท่ากันทุกมุมเอียง จะได้สมการกำหนดความสัมพันธ์ในรูปสมการ 4-3 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) แสดงในตาราง 4-8

ตาราง 4-8 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ของมุมเอียงต่างๆ ($\alpha = 90^\circ$)

ค่าสัมประสิทธิ์ และ ค่าเลขยกกำลัง	มุมเอียงจากแนวตั้ง (β) ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล			
	5° (B3; No.1)	10° (C3; No.1)	15° (D3; No.1)	20° (E3; No.1)
a	0.67	0.66	0.62	0.65
b	0.65	0.65	0.65	0.65
correlation (R^2)	0.998	0.998	0.996	0.995

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (a) ที่ได้จากสมการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาชิมต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาชิม (d_{s1}/D) กับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาชิม (y/D) ในกรณีเอียงทำมุมต่างๆ เปรียบเทียบกับกรณีเสาชิมต้นที่ 1 ตั้งตรง พบว่ามีความแตกต่างในค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ นำความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาชิมต้นที่ 1 ตั้งตรง ต่อขนาดเสาชิม (d_{s1}/D) กับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาชิม (y/D) ของแต่ละมุมเอียงในระนาบการเอียงตั้งฉากกับทิศทางการไหลให้อยู่ในรูปเดียวกันในรูป 4-12 จะเห็นถึงความแตกต่างของค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่มีมากขึ้นกว่าขนาดความลึกหลุมกัดเซาะในกรณีเสาชิมตั้งตรง และเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณของแต่ละมุมเอียงมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณในสมการ 4-5 ซึ่งเป็นของกรณีเสาชิมต้นที่ 1 ตั้งตรง จะได้ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงของเสาชิมต้นที่ 1 ($K_{\beta 3}$) เมื่อนำมาคูณกับสมการของเสาชิมต้นที่ 1 ตั้งตรง จะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาชิมต้นที่ 1 ทำมุมเอียงต่างๆ ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ดังสมการ

$$\frac{d_{s1}}{D} = 0.60K_{\beta 3} \left(\frac{y}{D} \right)^{0.65} \quad (4-12)$$

เมื่อค่า K_{β_3} คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเสาเข็มต้นที่ 1 ดังในรูป 4-13 และแสดงค่าในตาราง 4-9

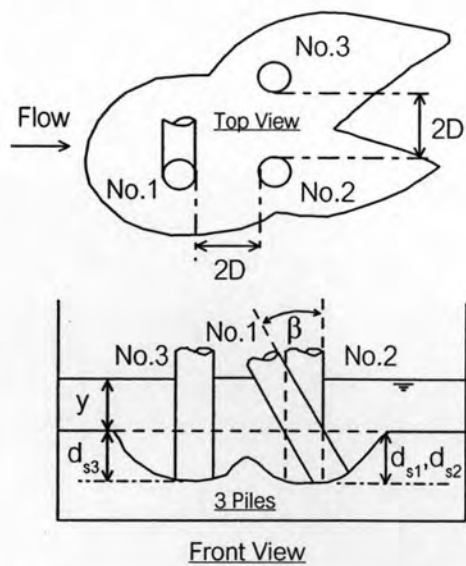
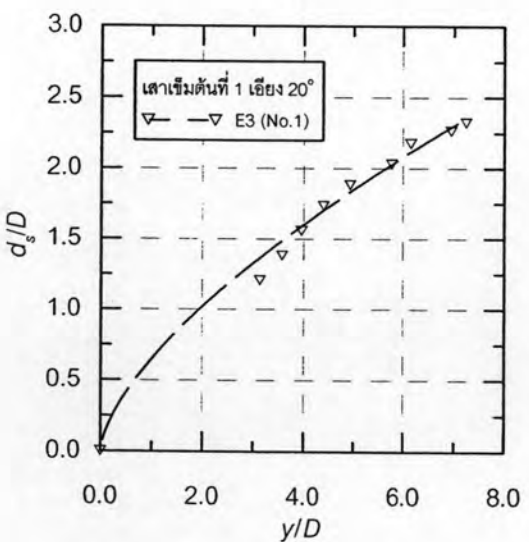
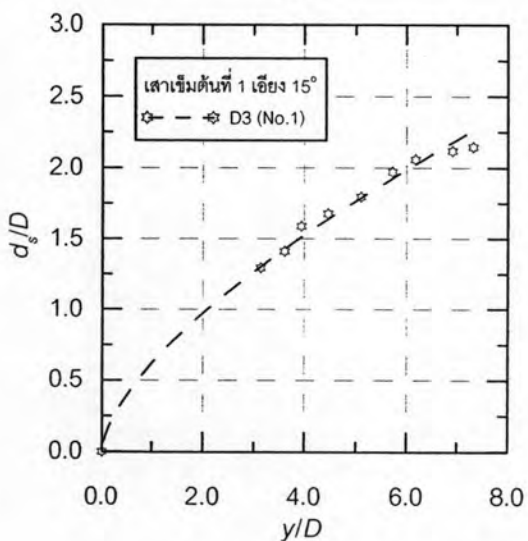
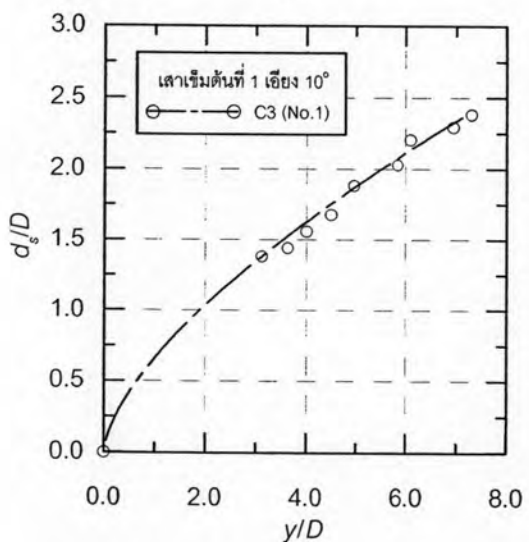
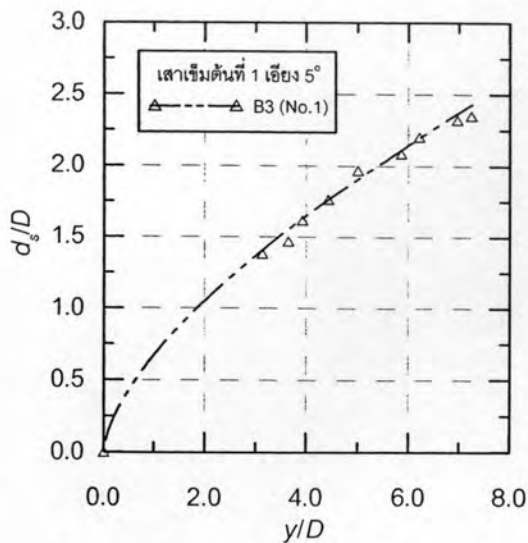
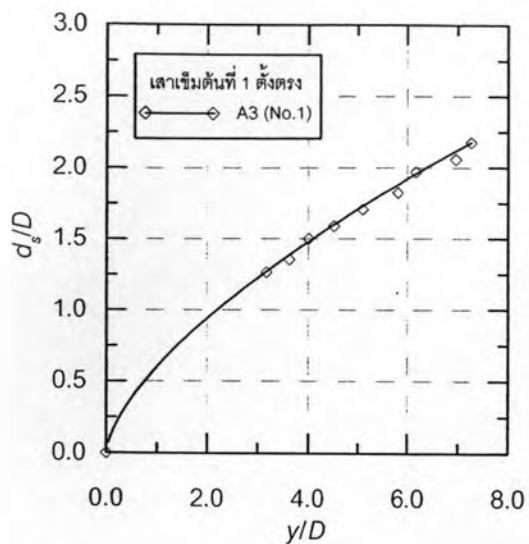
ตาราง 4-9 ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 (K_{β_3}) ในระนาบตั้งฉากกับการไหล

ชื่อกรณีศึกษา	มุมเอียงของเสาเข็ม (β)	K_{β_3}
A3 (Pile No.1)	0°	1.00
B3 (Pile No.1)	5°	1.12
C3 (Pile No.1)	10°	1.10
D3 (Pile No.1)	15°	1.03
E3 (Pile No.1)	20°	1.08

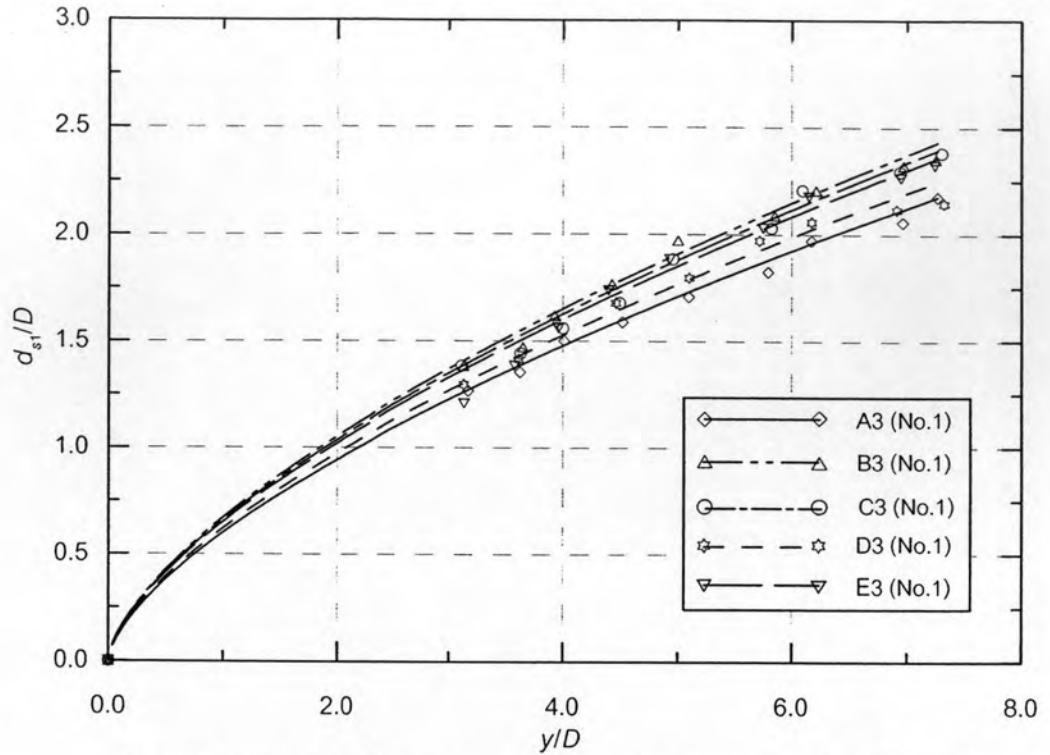
พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s1}/D) กับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) ที่รวมทุกมุมอยู่ในรูปเดียวกัน ดังรูป 4-12 จะพบว่า ที่ค่าความลึกการไหลเดียวกัน ค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s1}/D) กรณีตั้งตรง จะมีค่าต่ำกว่าเสาเข็มที่เอียงทำมุมจากแนวตั้ง 5°, 10°, 15° และ 20° โดยเมื่อเสาเข็มเอียง 5° เส้นแนวโน้มจะยกตัวสูงที่สุด และจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 เอียง 10° และ 15° ตามลำดับ แต่ที่มุมเอียง 20° เส้นแนวโน้มของค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s1}/D) กลับยกตัวสูงกว่ากรณีเสาเข็มเอียง 15°

จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (a) ระหว่างสมการกำหนดความสัมพันธ์ของเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง กับสมการที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ทำให้ได้ค่าปรับแก้ (K_{β_3}) เมื่อเสาเข็มเอียงทำมุม 5°, 10°, 15° และ 20° จะมีค่ามากกว่า 1.0 นั่นคือ ค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล โดยจะมีค่าความลึกหลุมกัดเซาะมากที่สุดที่มุมเอียง 5° ประมาณ 12% และเมื่อมุมเอียงของเสาเข็มเปลี่ยนเป็น 10° และ 15° ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะมีค่ามากกว่ากรณีเสาเข็มตั้งตรงประมาณ 10% และ 3% ตามลำดับ แต่ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะกลับมามีค่ามากกว่า 8% เมื่อเสาเข็มเอียง 20°

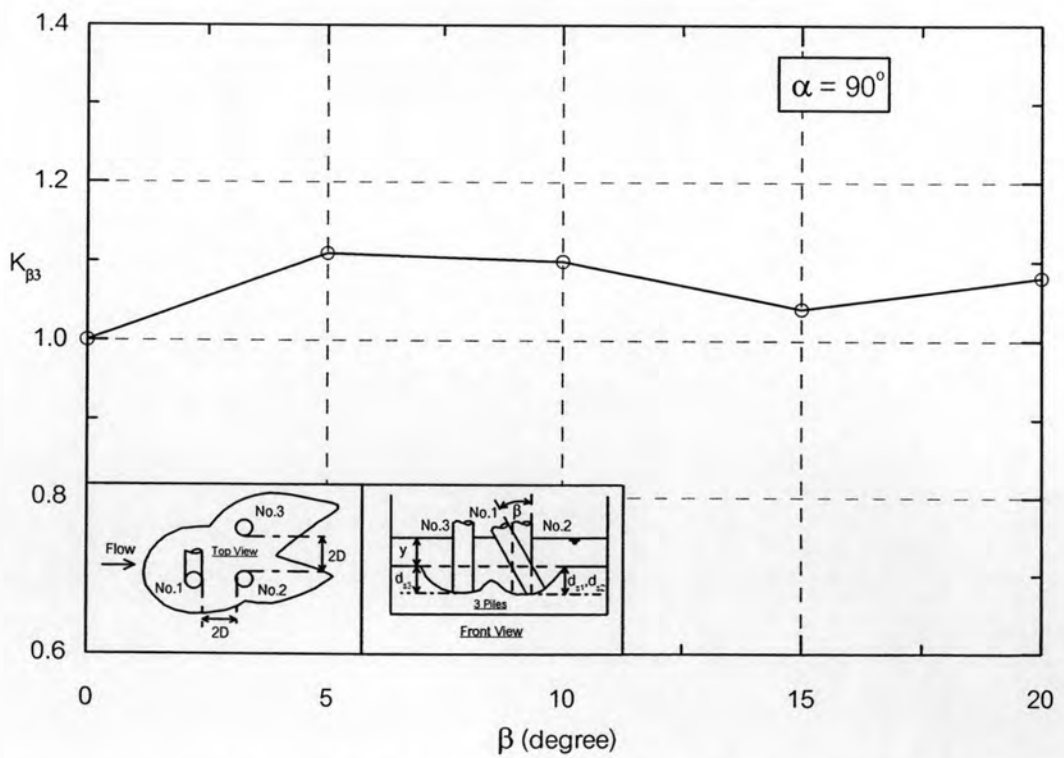
ดังนั้น การเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ในระนาบการเอียงตั้งฉากกับแนวการไหลส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะให้มีลักษณะที่เพิ่มขึ้น แต่แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงไม่เป็นไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ ขนาดหลุมกัดเซาะไม่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น



รูป 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็มกับความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม เมื่อแยกตามมุมเอียงเสาเข็มกรณีเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล



รูป 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็มกับความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม เมื่อรวมทุกมุมอยู่ในรูปเดียวกัน



รูป 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ K_{β_3} กับมุมเฉียงเสาเข็ม ในกรณีเสาเข็มเฉียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล

4.3 ผลของมุมเอียงของเสาเข็มที่มีต่อเสาเข็มต้นถัดไป

การวิเคราะห์ผลของเสาเข็มเอียงที่มีต่อความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นข้างเคียงในกลุ่มเสาเข็ม จะแยกพิจารณาตามระนาบการเอียงของเสาเข็ม เนื่องจากการศึกษานี้ได้ทดลองเอียงเสาเข็มในระนาบต่างๆ คือ เอียงในระนาบเดียวกับการไหล เอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล และเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล

โดยระนาบการเอียงของเสาเข็มจะมีอิทธิพลต่อความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นข้างเคียงแตกต่างกันออกไป ซึ่งการเอียงของเสาเข็มในระนาบแนวเดียวกับการไหลคาดว่าจะส่งผลต่อเสาเข็มต้นที่วางในแนวเดียวกับการไหลไปทางด้านท้ายน้ำของเสาเข็มต้นที่เอียง รวมเสาเข็มที่ใช้จำนวน 2 ต้น ส่วนการเอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหลและเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล เสาเข็มข้างเคียงที่คาดว่าจะได้รับผลของมุมเอียงมีจำนวน 2 ต้น โดยมีการจัดวางเป็นลักษณะ 3 เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งมีเสาเข็มต้นหน้าที่เอียงเป็นยอดสามเหลี่ยม และ 2 ต้นหลังที่ถัดจากต้นหน้าเป็นแนวฐานสามเหลี่ยมที่วางอยู่ในแนวเดียวกัน มีระยะห่างระหว่างเสาเป็นสองเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ($G = 2D$) และถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ทุกการทดลอง ดังผลการวิเคราะห์ต่อไปนี้

4.3.1 ผลที่มีต่อเสาเข็มต้นถัดไปกรณีเสาเข็มที่เอียงในระนาบเดียวกับแนวการไหล

ในกรณีเสาเข็มเอียงในระนาบเดียวกับแนวการไหล ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม (d_s/D) ขึ้นกับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) แสดงดังรูป 4-14 ที่รวมข้อมูลการทดลองของเสาเข็มต้นที่ 1 (แทนด้วยจุดโปร่ง) และเสาเข็มต้นที่ 2 (แทนด้วยจุดทึบ) โดยกำหนดให้ค่าเลขยกกำลัง (b) เป็นค่าเฉลี่ยที่ประมาณเท่ากับในแต่ละเส้นแนวโน้ม ความสัมพันธ์ พบว่าที่ความลึกการไหลเดียวกันเส้นแนวโน้มที่ใช้เป็นตัวแทนของชุดข้อมูลค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 จะยกตัวสูงกว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 เมื่อมุมเอียงเปลี่ยนจากกรณีตั้งตรงเป็น 5° , 10° และ 15° ตามลำดับ หมายความว่า ค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 จะมีค่ามากกว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 ที่ความลึกการไหลเดียวกัน แต่เมื่อมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุม 20° เส้นแนวโน้มของเสาเข็มต้นที่ 1 จะเป็นเส้นเดียวกันกับเส้นแนวโน้มของเสาเข็มต้นที่ 2 นั่นคือ ค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2

จากรูปความสัมพันธ์ 4-14 สามารถแสดงสมการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s2}/D) ขึ้นกับอัตราส่วนค่าความลึกการไหลต่อ

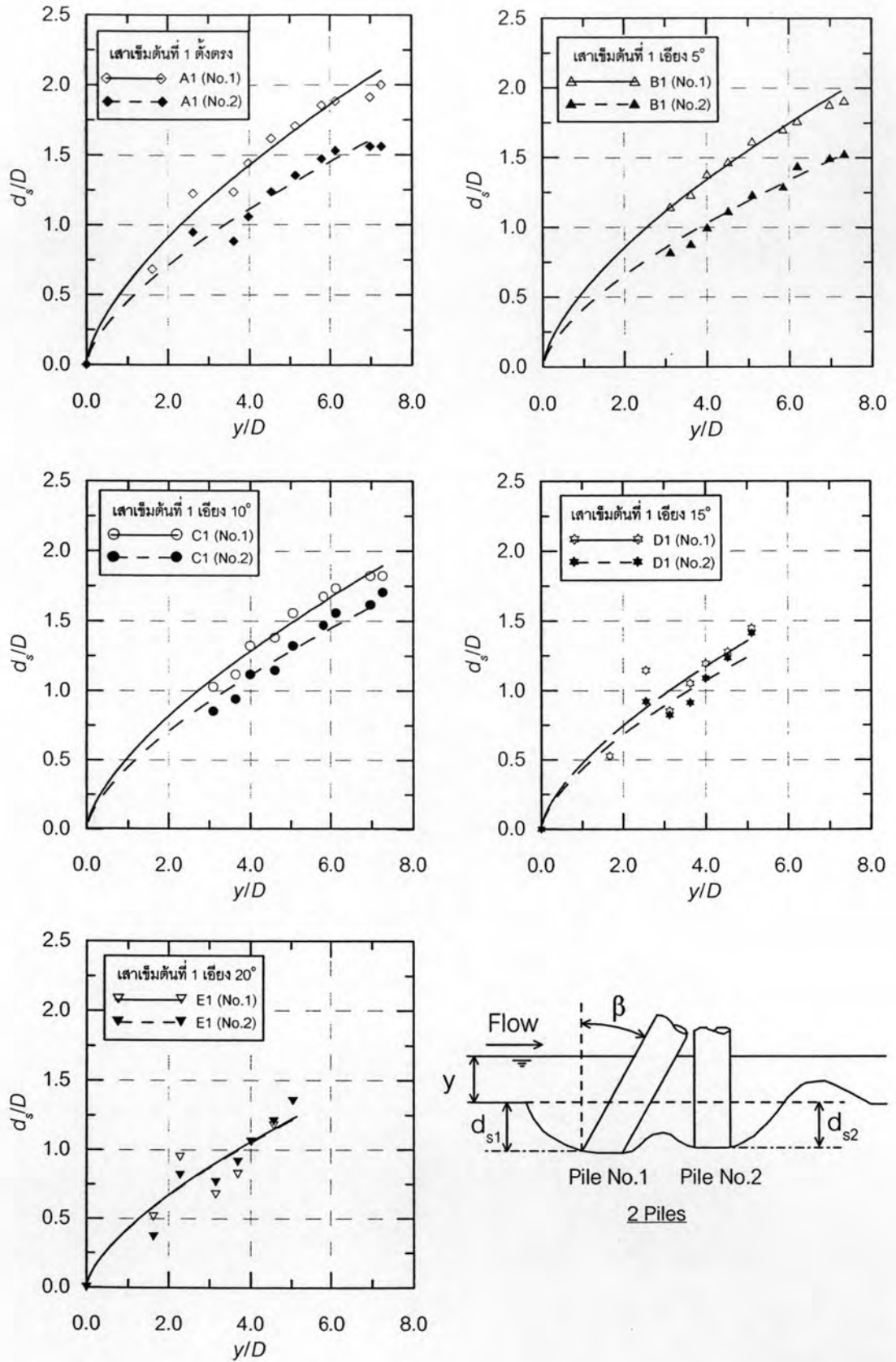
ขนาดเสาเข็ม (y/D) ที่เปลี่ยนไปตามมุมเอียงต่างๆ ของเสาเข็มต้นที่ 1 มีรูปแบบความสัมพันธ์ดังสมการ 4-3 และแสดงค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ในตาราง 4-10

ตาราง 4-10 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ของเสาเข็มต้นที่ 2 ($\alpha = 0^\circ$)

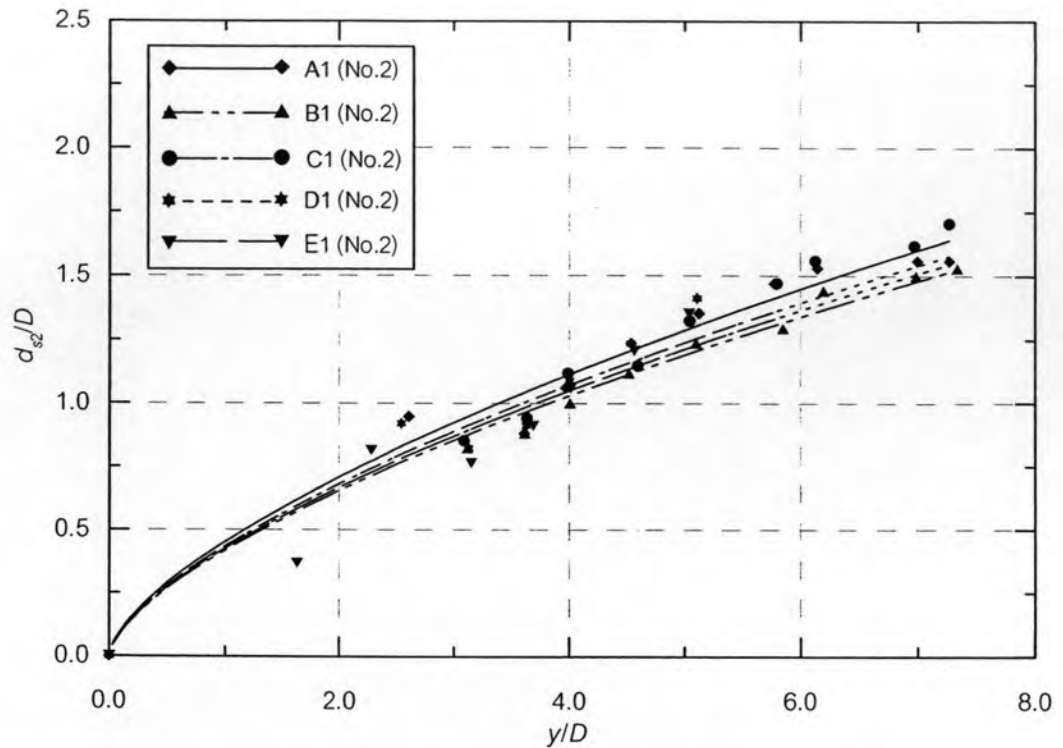
ค่าสัมประสิทธิ์ และ ค่าเลขยกกำลัง	มุมเอียงจากแนวดิ่ง (β) ในระนาบเดียวกับทิศทางการไหล			
	5° (B1; No.2)	10° (C1; No.2)	15° (D1; No.2)	20° (E1; No.2)
a	0.42	0.45	0.44	0.43
b	0.65	0.65	0.65	0.65
correlation (R^2)	0.992	0.991	0.978	0.967

นำความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_s/D) กับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) ที่รวมทุกมุมอยู่ในรูปเดียวกัน ดังรูป 4-15 ในการพิจารณาถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของขนาดความลึกหลุมกัดเซาะที่เกิดขึ้น และจากสมการ 4-6 ซึ่งเป็นสมการของเสาเข็มต้นที่ 2 ในกรณีเสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น มาเปรียบเทียบกับหาการเปลี่ยนแปลงของค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ที่เกิดจากเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงในระนาบเดียวกับแนวมการไหล โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (a) ของสมการ 4-6 เป็นตัวเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณของเสาต้นที่ 2 ในตาราง 4-10 ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ตามการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาต้นที่ 1 ดังแสดงในรูป 4-16 และตาราง 4-11

จากความสัมพันธ์ในรูป 4-19 และแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ในตาราง 4-11 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุม 5°, 15° และ 20° ในระนาบตามทิศทางการไหล ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะมีค่าน้อยกว่าเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรงประมาณ 7.5%, 3.8% และ 5.7% ตามลำดับ ซึ่งจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียง 10° อาจกล่าวได้ว่าไม่มีความชัดเจนของการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ในแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นหรือว่าลดลง เมื่อมีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมต่างๆ ประกอบกับเปอร์เซ็นต์ที่เปลี่ยนไปจากค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรงมีน้อย ดังนั้นผลของเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงในระนาบแนวเดียวกับทิศทางการไหล ไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2



รูป 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม กับ ความลึกการไหล ต่อขนาดเสาเข็ม เมื่อแยกตามมุมเอียงเสาเข็ม กรณีเอียงในระนาบตามทิศทางการไหล



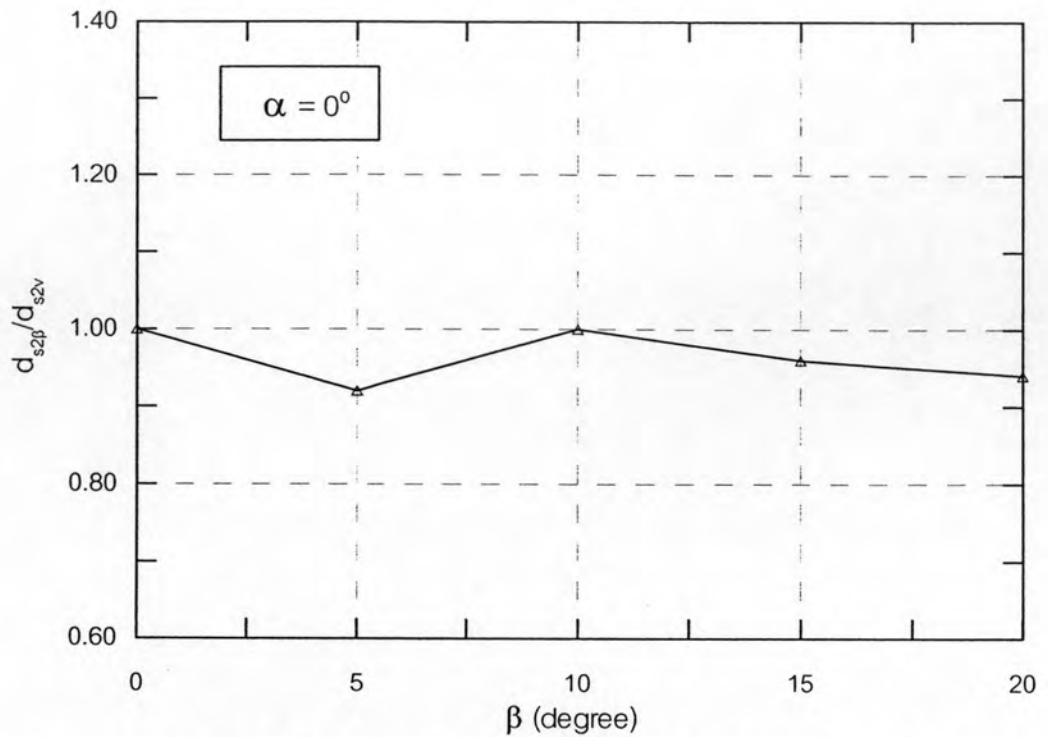
รูป 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ต่อขนาดเสาเข็มกับความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม เมื่อรวมทุกมุมเอียงอยู่ในรูปเดียวกัน

ตาราง 4-11 การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ($\alpha = 0^\circ$)

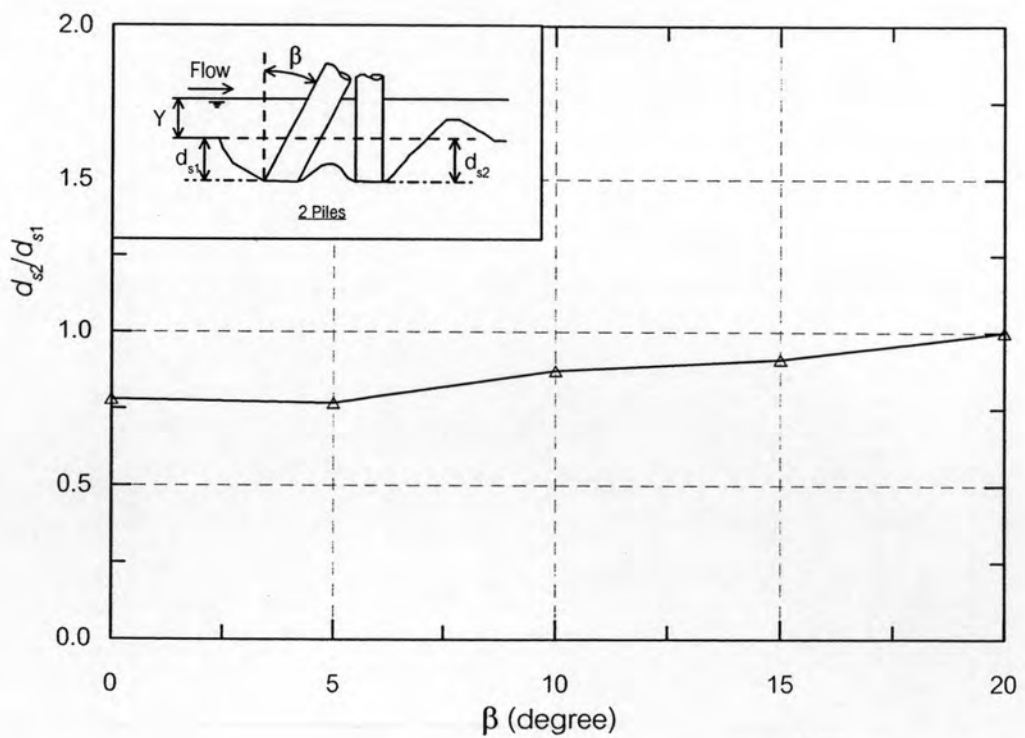
ชื่อกรณีศึกษา	มุมเอียงของเสาเข็ม	การเปลี่ยนแปลง (%)	ลักษณะการเปลี่ยนแปลง
B1 (Pile No.2)	5°	-7.5	ลดลง
C1 (Pile No.2)	10°	0	ไม่มีการเปลี่ยนแปลง
D1 (Pile No.2)	15°	-3.8	ลดลง
E1 (Pile No.2)	20°	-5.7	ลดลง

ตาราง 4-12 ความแตกต่างระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 กับต้นที่ 2 ($\alpha = 0^\circ$)

ชื่อกรณีศึกษา	มุมเอียงจากแนวตั้ง	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง	ลักษณะการเปลี่ยนแปลง
A1	0°	-22%	ต้นที่ 2 < ต้นที่ 1
B1	5°	-23%	ต้นที่ 2 < ต้นที่ 1
C1	10°	-13%	ต้นที่ 2 < ต้นที่ 1
D1	15°	-9%	ต้นที่ 2 < ต้นที่ 1
E1	20°	0%	ต้นที่ 2 \approx ต้นที่ 1



รูป 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกก้นชะของเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียง ทำมุมต่างๆ ต่อความลึกก้นชะของเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรงกับ มุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบเดียวกับแนวการไหล



รูป 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกก้นชะเสาเข็มต้นที่ 2 ต่อ ความลึกก้นชะเสาเข็มต้นที่ 1 กับ มุมเอียงเสาเข็ม

เปรียบเทียบค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 กับค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ที่มุมเอียงต่างๆ โดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (a) ในตาราง 4-4 ของเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมต่างๆ เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณในตาราง 4-10 ของเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมเดียวกัน พบว่าเสาเข็มต้นที่ 2 จะมีค่าความลึกหลุมกัดเซาะน้อยกว่าเสาเข็มต้นที่ 1 ประมาณ 22%, 23%, 13% และ 9% เมื่อเสาเข็มมีมุมเอียง 0° , 5° , 10° และ 15° ตามลำดับ และจะมีค่าเท่ากับค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 ที่มุมเอียง 20° ดังความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาต้นที่ 2 ต่อความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาต้นที่ 1 (d_{s2}/d_{s1}) กับมุมเอียงของเสาเข็ม (β) ในรูป 4-17 พร้อมทั้งแสดงค่าความแตกต่างระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 กับต้นที่ 2 ไว้ในตาราง 4-12

4.3.2 ผลที่มีต่อเสาเข็มต้นถัดไปกรณีเสาเข็มที่เอียงในระนาบทแยงกับแนวการไหล

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม (d_s/D) ขึ้นกับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) จะพิจารณาความสัมพันธ์ดังกล่าวที่รวมข้อมูลการทดลองของเสาเข็มต้นที่ 1, 2 และ 3 อยู่ในรูปเดียวกัน โดยแยกตามมุมเอียงต่างๆ 5 มุม ดังรูป 4-18 จะเห็นว่ากรณีเสาเข็มตั้งตรงทั้ง 3 ต้น ชุดข้อมูลค่าความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็มของเสาเข็มต้นที่ 1 และต้นที่ 3 มีความแตกต่างไม่มากนักเมื่อพิจารณาที่ค่าความลึกการไหลเดียวกัน ทำให้เส้นแนวโน้มที่ลากผ่านชุดข้อมูลทั้ง 2 ใช้เส้นเดียวกัน ส่วนเส้นแนวโน้มที่เป็นตัวแทนของเสาเข็มต้นที่ 2 จะอยู่ต่ำกว่าเส้นของเสาเข็มต้นที่ 1 และต้นที่ 3 และเมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมกับแนวตั้งเป็นมุม 5° , 10° , 15° และ 20° ในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล เห็นได้ชัดเจนว่าเส้นแนวโน้มของเสาเข็มต้นที่ 2 และ 3 จะยกตัวสูงขึ้นตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น โดยเส้นแนวโน้มของเสาเข็มต้นที่ 2 จะยกตัวขึ้นสูงกว่าเสาเข็มต้นที่ 1 เมื่อมุมเอียงเพิ่มเป็น 15° และ 20° ตามลำดับ

จากรูป 4-18 ค่าความลึกหลุมกัดเซาะ (d_s) ของเสาเข็มต้นที่ 1 ต้นที่ 2 และต้นที่ 3 จะแปรผันตามค่าความลึกการไหล (y) ในลักษณะเดียวกัน จึงใช้ค่าเลขยกกำลัง (b) ที่เฉลี่ยเท่ากัน ในการกำหนดความสัมพันธ์ สามารถแสดงสมการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s2}/D) และค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 3 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s3}/D) ที่ขึ้นกับอัตราส่วนค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) ที่เปลี่ยนไปตามมุมเอียงต่างๆ ของเสาเข็มต้นที่ 1 ให้มีรูปแบบความสัมพันธ์ดังสมการ 4-3 และแสดงค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ในตาราง 4-13 สำหรับเสาเข็มต้นที่ 2 และตาราง 4-14 สำหรับเสาเข็มต้นที่ 3 ดังนี้

ตาราง 4-13 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ของเสาเข็มต้นที่ 2 ($\alpha = 45^\circ$)

ค่าสัมประสิทธิ์ และ ค่าเลขยกกำลัง	มุมเอียงจากแนวดิ่ง (β) ในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล			
	5° (B1; No.2)	10° (C1; No.2)	15° (D1; No.2)	20° (E1; No.2)
<i>a</i>	0.50	0.57	0.62	0.65
<i>b</i>	0.65	0.65	0.65	0.65
correlation (R^2)	0.981	0.989	0.997	0.986

ตาราง 4-14 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ของเสาเข็มต้นที่ 3 ($\alpha = 45^\circ$)

ค่าสัมประสิทธิ์ และ ค่าเลขยกกำลัง	มุมเอียงจากแนวดิ่ง (β) ในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล			
	5° (B1; No.2)	10° (C1; No.2)	15° (D1; No.2)	20° (E1; No.2)
<i>a</i>	0.63	0.65	0.70	0.75
<i>b</i>	0.65	0.65	0.65	0.65
correlation (R^2)	0.983	0.981	0.994	0.992

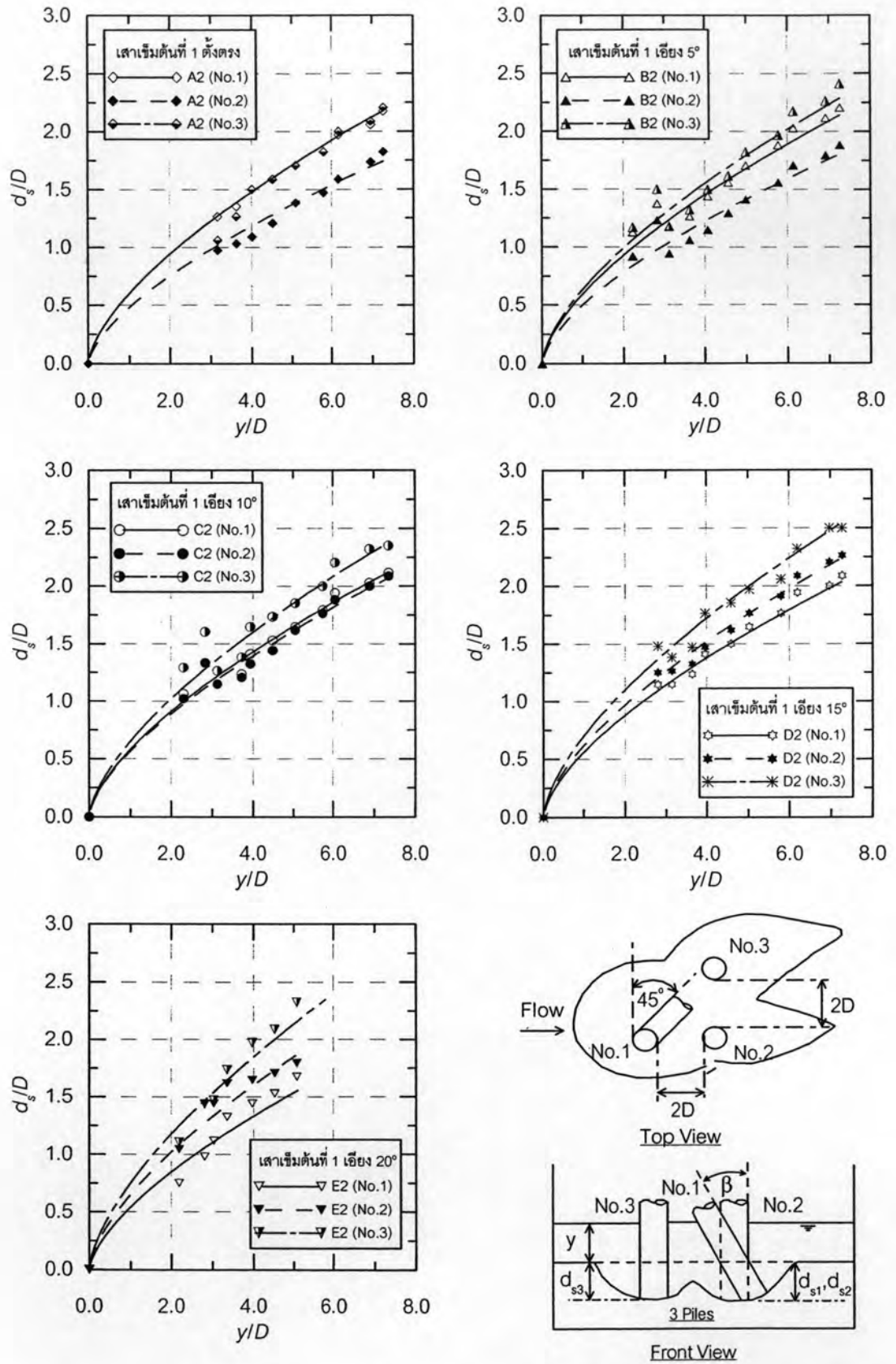
วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 และเสาเข็มต้นที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s2}/D) และค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s3}/D) กับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) ที่รวมทุกมุมอยู่ในรูปเดียวกันเพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของค่าความลึกหลุมกัดเซาะ (d_s) ที่เปลี่ยนไปกับค่าความลึกการไหล (y) ดังรูป 4-19 และรูป 4-20 ตามลำดับ พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (*a*) ในสมการ 4-7 และ 4-8 ซึ่งเป็นสมการกำหนดความสัมพันธ์ของเสาเข็มต้นที่ 2 และต้นที่ 3 ในกรณีที่เสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณในตาราง 4-13 และ 4-14 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะ ทั้งในเสาเข็มต้นที่ 2 และเสาเข็มต้นที่ 3

การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่เกิดกับเสาเข็มต้นที่ 2 จากรูป 4-19 เส้นแนวโน้มจะยกตัวสูงขึ้นตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้นของเสาเข็มต้นที่ 1 ซึ่งจะมีค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่มากกว่าเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง ประมาณ 3.6%, 18.0%, 28.6% และ 35.7% เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุม 5°, 10°, 15° และ 20° ในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล ตามลำดับ ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาต้นที่ 2 ที่มีเสาต้นที่ 1 เอียง ต่อค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาต้นที่ 2 ที่มีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรง ($d_{s2\beta}/d_{s2v}$) กับมุมเอียงของเสาต้นที่ 1 (β) ในรูป 4-21 และแสดงการเปลี่ยนแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ในตาราง 4-15

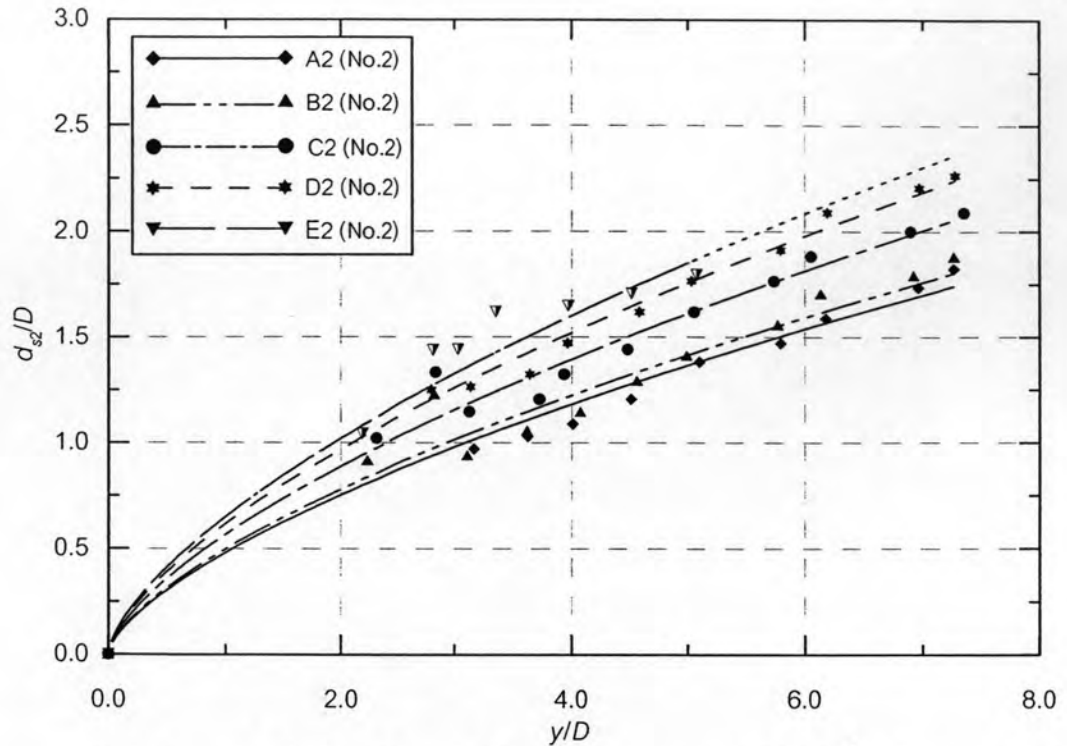
ส่วนลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมต่างๆ จะมีมากขึ้นเมื่อมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงเพิ่มขึ้น ดังรูป 4-20 ซึ่งจะมีค่ามากกว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง ประมาณ 5.7%, 8.6%, 17.2% และ 25.7% เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุม 5°, 10°, 15° และ 20° ตามลำดับ ดังความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาต้นที่ 2 ที่มีเสาต้นที่ 1 เอียง ต่อค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาต้นที่ 3 ที่มีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรง ($d_{s3\beta}/d_{s3v}$) กับมุมเอียงของเสาต้นที่ 1 (β) ในรูป 4-22 และแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ในตาราง 4-16

พิจารณาค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 และเสาเข็มต้นที่ 3 เปรียบเทียบกับค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ของแต่ละมุมเอียง เพื่อดูถึงค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นของเสาเข็มต้นที่ 1 กับเสาเข็มต้นที่ 2 และเสาเข็มต้นที่ 1 กับเสาเข็มต้นที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล พบว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 จะมีค่าน้อยกว่าเสาเข็มต้นที่ 1 ประมาณ 20%, 16% และ 3% เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 มีมุม 0°, 5° และ 10° ตามลำดับ แต่เมื่อมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงเพิ่มขึ้นเป็น 15° และ 20° ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะมีค่ามากกว่าเสาเข็มต้นที่ 1 ประมาณ 9% และ 19% ตามลำดับ ตามความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาต้นที่ 2 ต่อเสาต้นที่ 1 (d_{s2}/d_{s1}) กับมุมเอียงของเสาเข็ม (β) ในรูป 4-23 ดังแสดงค่าความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ในตาราง 4-17

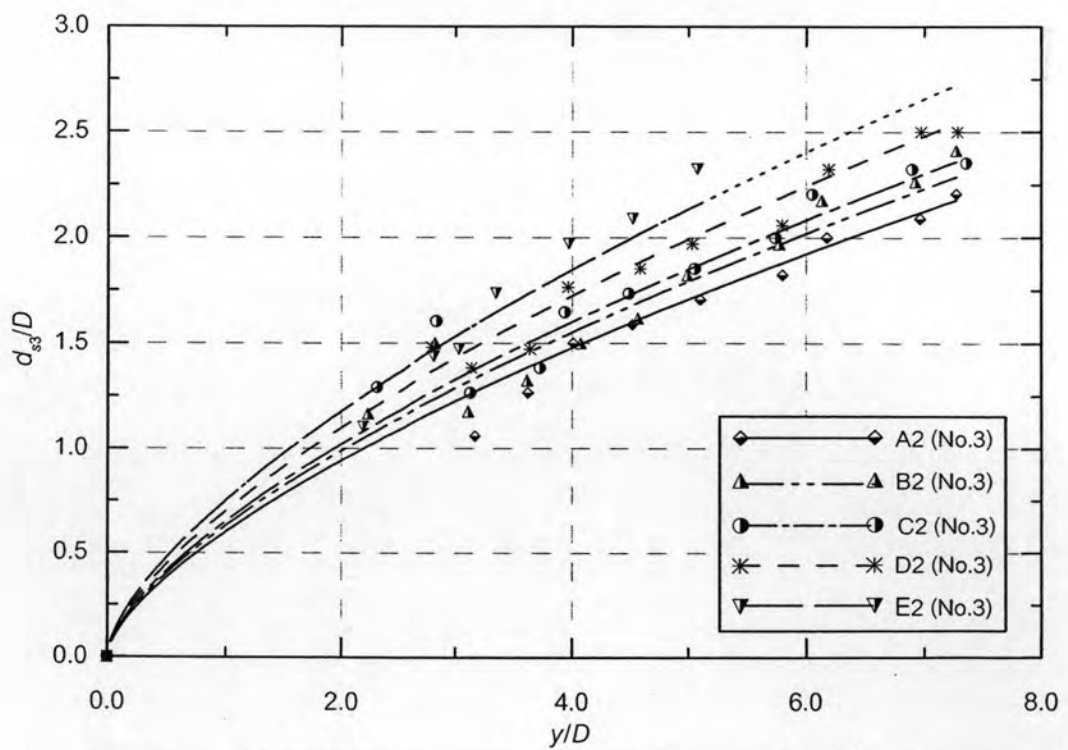
ส่วนค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ในกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง จะมีค่าไม่แตกต่างจากเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง แต่เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 5°, 10°, 15° และ 20° ค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 จะมีมากกว่าเสาเข็มต้นที่ 1 โดยจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ประมาณ 7.2%, 11.8%, 24.2% และ 37.5% ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาต้นที่ 3 ต่อเสาต้นที่ 1 (d_{s3}/d_{s1}) กับมุมเอียงของเสาเข็ม (β) ดังรูป 4-24 ดังแสดงค่าความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ในตาราง 4-18



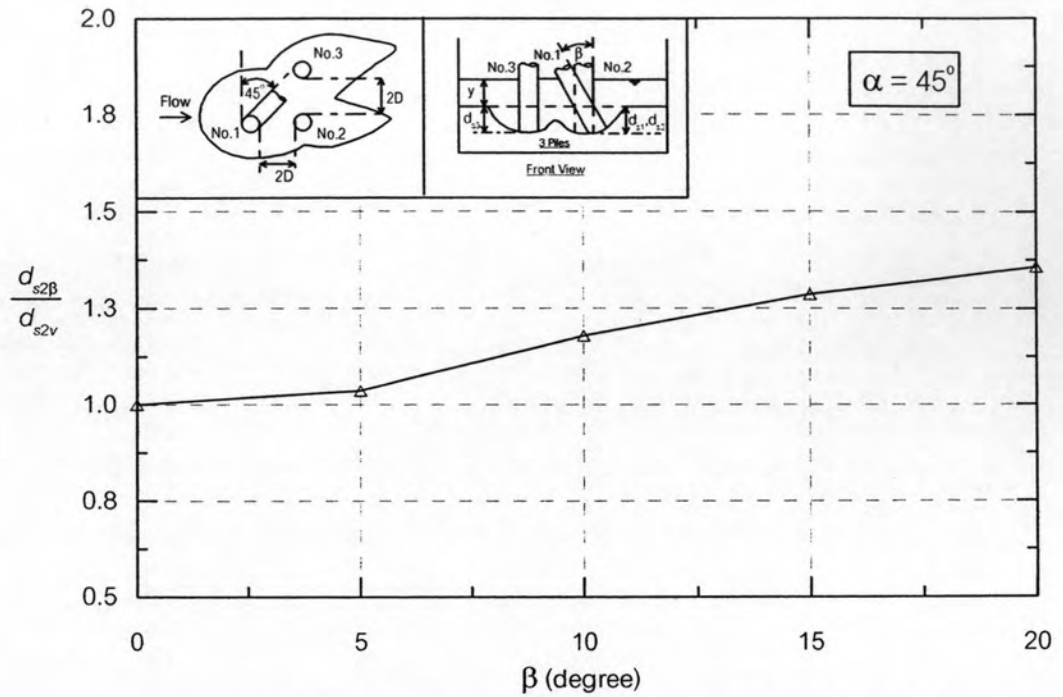
รูป 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม กับ ความลึกการไหล ต่อขนาดเสาเข็ม ของเสาต้นที่ 1 ต้นที่ 2 และต้นที่ 3 แยกตามมุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเอียงในระนาบทแยงกับทิศทางกรไหล



รูป 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ต่อขนาดเสาเข็ม กับความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม กรณีเอียงในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล



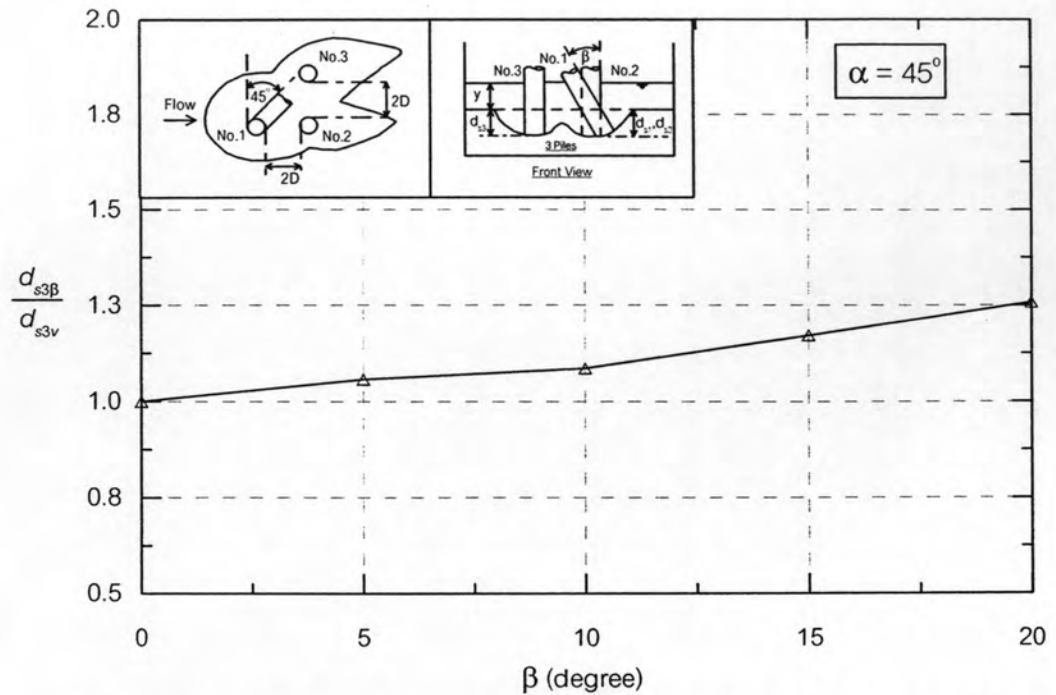
รูป 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ต่อขนาดเสาเข็ม กับความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม กรณีเอียงในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล



รูป 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมต่างๆ ต่ความลึกกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรงกับ มุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล

ตาราง 4-15 การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ($\alpha = 45^\circ$)

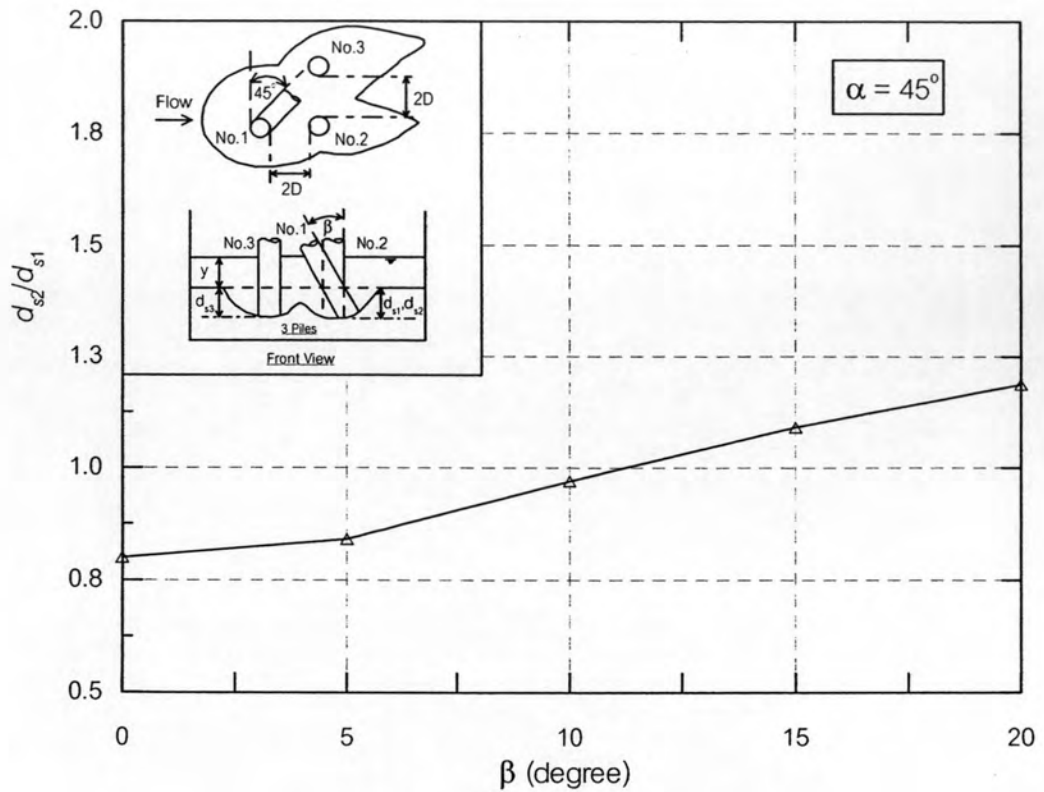
ชื่อกรณีศึกษา	มุมเอียงของเสาเข็ม	การเปลี่ยนแปลง (%)	ลักษณะการเปลี่ยนแปลง
B2 (Pile No.2)	5°	3.6	เพิ่มขึ้น
C2 (Pile No.2)	10°	18.0	เพิ่มขึ้น
D2 (Pile No.2)	15°	28.6	เพิ่มขึ้น
E2 (Pile No.2)	20°	35.7	เพิ่มขึ้น



รูป 4-22 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 3 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียง ทำมุมต่างๆ ต่อความลึกกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 3 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรงกับ มุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล

ตาราง 4-16 การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ($\alpha = 45^\circ$)

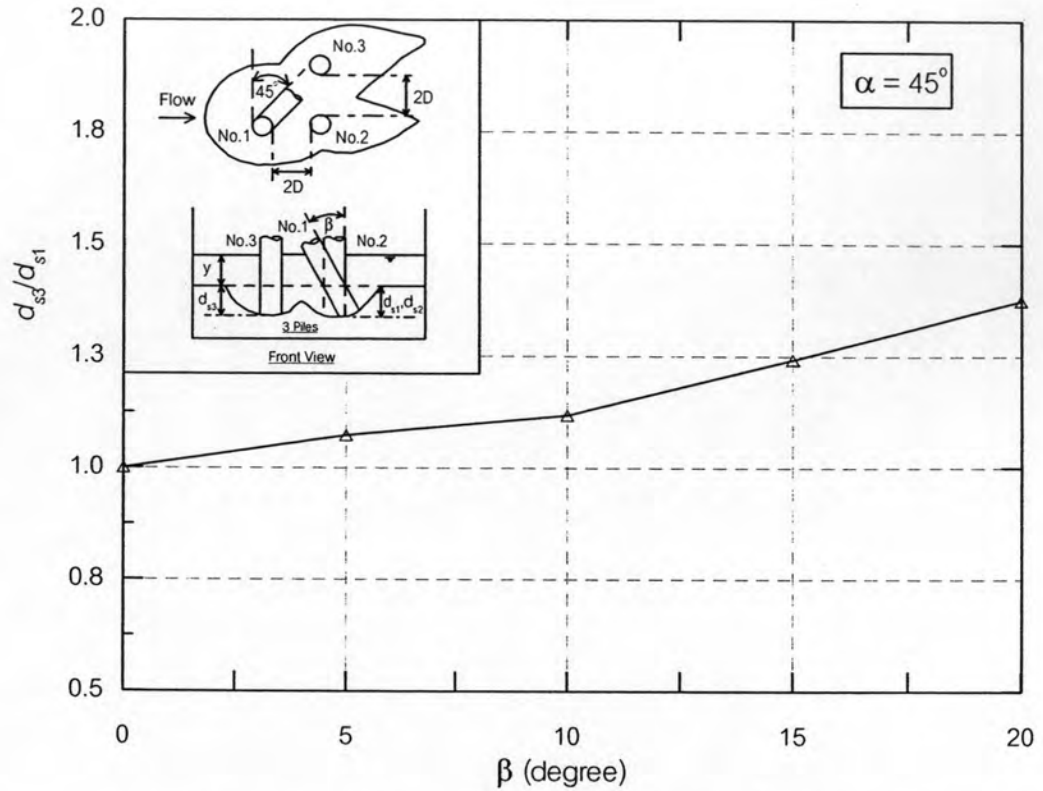
ชื่อกรณีศึกษา	มุมเอียงของเสาเข็ม	การเปลี่ยนแปลง (%)	ลักษณะการเปลี่ยนแปลง
B2 (Pile No.3)	5°	5.7	เพิ่มขึ้น
C2 (Pile No.3)	10°	8.6	เพิ่มขึ้น
D2 (Pile No.3)	15°	17.2	เพิ่มขึ้น
E2 (Pile No.3)	20°	25.7	เพิ่มขึ้น



รูป 4-23 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต้นที่ 2 ต่อความลึกหลุมกัดเซาะต้นที่ 1 กับมุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเอียงทแยงกับทิศทางกรไหล

ตาราง 4-17 ความแตกต่างระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 กับต้นที่ 2 ($\alpha = 45^\circ$)

ชื่อกรณีศึกษา	มุมเอียงจากแนวดิ่ง	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง	ลักษณะการเปลี่ยนแปลง
A2	0°	-20.0	ต้นที่ 2 < ต้นที่ 1
B2	5°	-16.0	ต้นที่ 2 < ต้นที่ 1
C2	10°	-3.0	ต้นที่ 2 < ต้นที่ 1
D2	15°	+9.0	ต้นที่ 2 > ต้นที่ 1
E2	20°	+19.0	ต้นที่ 2 > ต้นที่ 1



รูป 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต้นที่ 3 ต่อความลึกหลุมกัดเซาะต้นที่ 1 กับมุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเอียงทแยงกับทิศทางการไหล

ตาราง 4-18 ความแตกต่างระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 กับต้นที่ 3 ($\alpha = 45^\circ$)

ชื่อกรณีศึกษา	มุมเอียงจากแนวดิ่ง	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง	ลักษณะการเปลี่ยนแปลง
A2	0°	0%	ต้นที่ 3 \approx ต้นที่ 1
B2	5°	+7.2%	ต้นที่ 3 > ต้นที่ 1
C2	10°	+11.8%	ต้นที่ 3 > ต้นที่ 1
D2	15°	+24.2%	ต้นที่ 3 > ต้นที่ 1
E2	20°	+37.5%	ต้นที่ 3 > ต้นที่ 1

4.3.3 ผลที่มีต่อเสาค้ำยันต้นถัดไปกรณีเสาค้ำยันเอียงในระนาบตั้งฉากกับแนวการไหล

อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาค้ำยัน (d_s/D) ขึ้นกับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาค้ำยัน (y/D) ที่รวมข้อมูลการทดลองของเสาค้ำยันที่ 1, 2 และ 3 อยู่ในรูปเดียวกัน โดยแยกตามมุมเอียงต่างๆ 5 มุม ดังรูป 4-25 ซึ่งในกรณีเสาค้ำยันตั้งตรง 3 ต้น จะใช้ข้อมูลชุดเดียวกันกับกรณีเสาค้ำยันเอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล ส่วนในกรณีเอียงทำมุม 5° , 10° , 15° และ 20° พบว่าที่ค่าความลึกการไหลเดียวกัน ความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาค้ำยันที่ 3 จะมีค่ามากที่สุด ตามด้วยค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาค้ำยันที่ 1 และเสาค้ำยันที่ 2 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเส้นแนวโน้มของเสาค้ำยันที่ 2 และเสาค้ำยันที่ 3 ที่มีมุมเอียงต่างๆ พบว่าในกรณีเสาค้ำยันตั้งตรง 3 ต้น จะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาค้ำยันที่ 2 และเสาค้ำยันที่ 3 ต่ำกว่าต้นเดียวกันจากกรณีเสาค้ำยันที่ 1 เอียงทำมุมกับแนวตั้ง จากผลดังกล่าวอาจวิเคราะห์เบื้องต้นได้ว่า เมื่อเสาค้ำยันที่ 1 มีมุมเอียง 5° , 10° , 15° และ 20° จะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาค้ำยันที่ 2 และต้นที่ 3 มากกว่ากรณีเสาค้ำยันที่ 2 และเสาค้ำยันที่ 3 ในกรณีเสาค้ำยันที่ 1 ตั้งตรง

จากรูป 4-25 สามารถแสดงสมการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาค้ำยันที่ 2 ต่อขนาดเสาค้ำยัน (d_{s2}/D) และค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาค้ำยันที่ 3 ต่อขนาดเสาค้ำยัน (d_{s3}/D) ที่ขึ้นกับอัตราส่วนค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาค้ำยัน (y/D) ที่เปลี่ยนไปตามมุมเอียงต่างๆ ของเสาค้ำยันที่ 1 ให้มีรูปแบบความสัมพันธ์ดังสมการ 4-3 โดยกำหนดให้ใช้ค่าเลขยกกำลังเฉลี่ยที่เท่ากัน และแสดงค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ในตาราง 4-19 สำหรับเสาค้ำยันที่ 2 และตาราง 4-20 สำหรับเสาค้ำยันที่ 3 ดังนี้

ตาราง 4-19 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ของเสาค้ำยันที่ 2 ($\alpha = 90^\circ$)

ค่าสัมประสิทธิ์ และ ค่าเลขยกกำลัง	มุมเอียงจากแนวตั้ง (β) ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล			
	5° (B1; No.2)	10° (C1; No.2)	15° (D1; No.2)	20° (E1; No.2)
a	0.58	0.58	0.57	0.57
b	0.65	0.65	0.65	0.65
correlation (R^2)	0.992	0.990	0.998	0.997

ตาราง 4-20 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ของเสาเข็มต้นที่ 3 ($\alpha = 90^\circ$)

ค่าสัมประสิทธิ์ และ ค่าเลขยกกำลัง	มุมเอียงจากแนวตั้ง (β) ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล			
	5° (B1; No.2)	10° (C1; No.2)	15° (D1; No.2)	20° (E1; No.2)
<i>a</i>	0.72	0.73	0.71	0.70
<i>b</i>	0.65	0.65	0.65	0.65
correlation (R^2)	0.998	0.997	0.997	0.994

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 และเสาเข็มต้นที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s2}/D) และค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s3}/D) กับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) ที่รวมทุกมุมอยู่ในรูปเดียวกัน ดังรูป 4-26 และรูป 4-27 ตามลำดับ พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (*a*) ในสมการ 4-7 และ 4-8 ซึ่งเป็นสมการกำหนดความสัมพันธ์ของเสาเข็มต้นที่ 2 และต้นที่ 3 ในกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณในตาราง 4-19 และ 4-20 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะ ทั้งในเสาเข็มต้นที่ 2 และเสาเข็มต้นที่ 3

จากรูป 4-26 จะเห็นถึงเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของเสาเข็มต้นที่ 2 ในกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุม 5°, 10°, 15° และ 20° ยกตัวสูงกว่าเสาเข็มต้นที่ 2 ในกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาต้นที่ 2 ที่มีเสาต้นที่ 1 เอียง ต่อค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาต้นที่ 2 ที่มีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรง ($d_{s2\beta}/d_{s2v}$) กับมุมเอียงของเสาต้นที่ 1 (β) ในรูป 4-28 และในตาราง 4-21 แสดงให้เห็นถึงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ในแต่ละมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ซึ่งมีค่ามากกว่าเสาเข็มต้นที่ 2 ในกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง เท่าๆ กันในแต่ละมุมเอียง ประมาณ 20% หรือกล่าวได้ว่า เสาเข็มต้นที่ 1 เอียงจากแนวตั้งเพิ่มขึ้นเป็น 5° จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ให้มีค่ามากขึ้นจากเสาเข็มต้นที่ 2 กรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง แต่เมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นเป็น 10°, 15° และ 20° ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะมีความแตกต่างจากมุมเอียง 5° อย่างไม่มีนัยสำคัญ

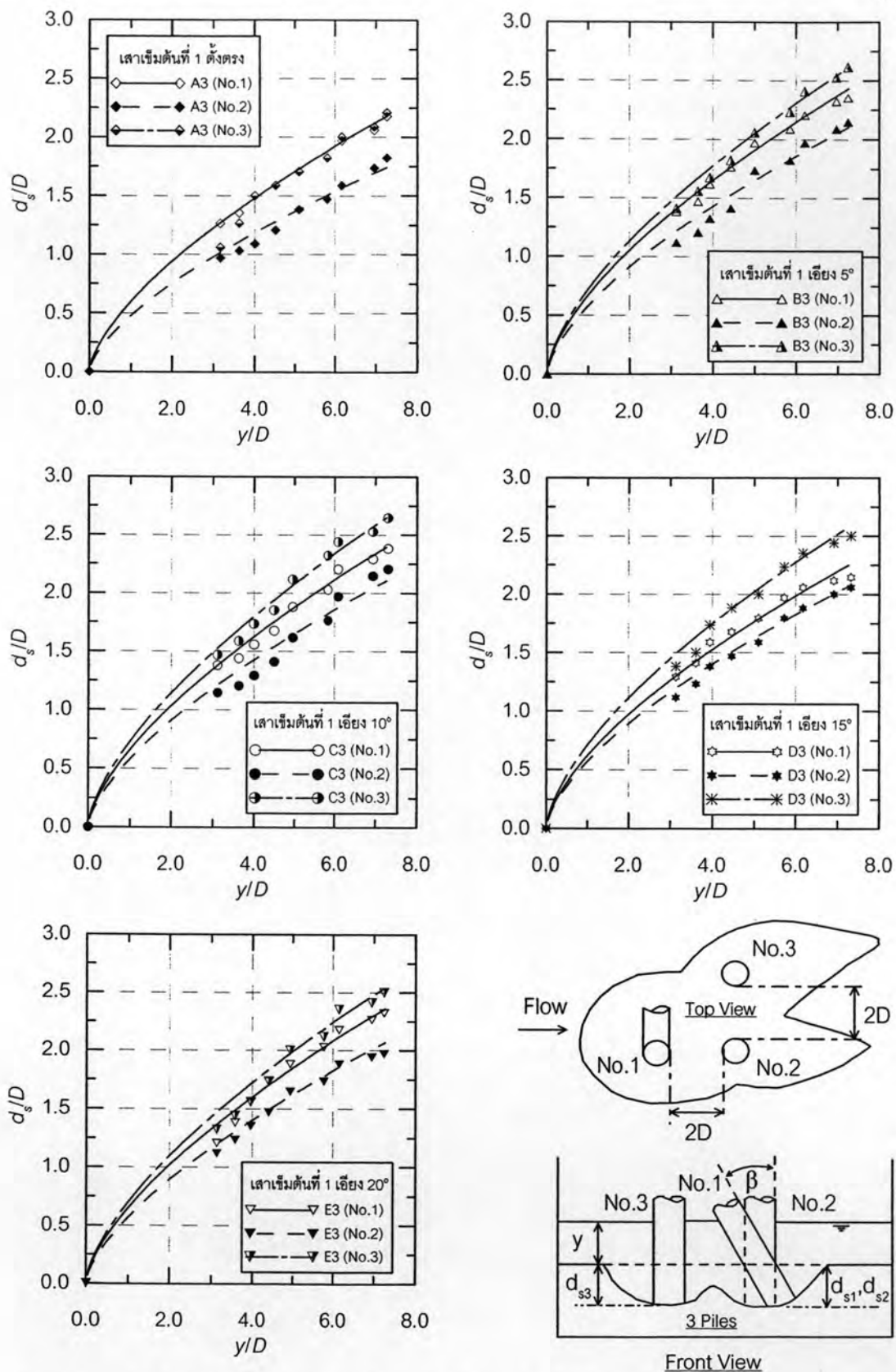
รูป 4-27 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมต่างๆ กับแนวตั้ง จะมีค่ามากกว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาต้นที่ 3 ที่มีเสาต้นที่ 1 เอียง ต่อค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาต้นที่ 3 ที่มีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรง ($d_{s3\beta}/d_{s3v}$)

กับมุมเอียงของเสาต้นที่ 1 (β) ในรูป 4-29 และแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ในตาราง 4-22 แสดงให้เห็นถึงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าความลึกลงมกััดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ในแต่ละมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ซึ่งมีค่ามากกว่าเสาเข็มต้นที่ 3 ในกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง แต่มีความแตกต่างกันไม่มากนักในแต่ละมุมเอียง โดยค่าความลึกลงมกััดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ในกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุม 5° , 10° , 15° และ 20° จะมีค่ามากกว่าค่าความลึกลงมกััดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ในกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง ประมาณ 20%, 21.4%, 18.6% และ 17.2% ตามลำดับ

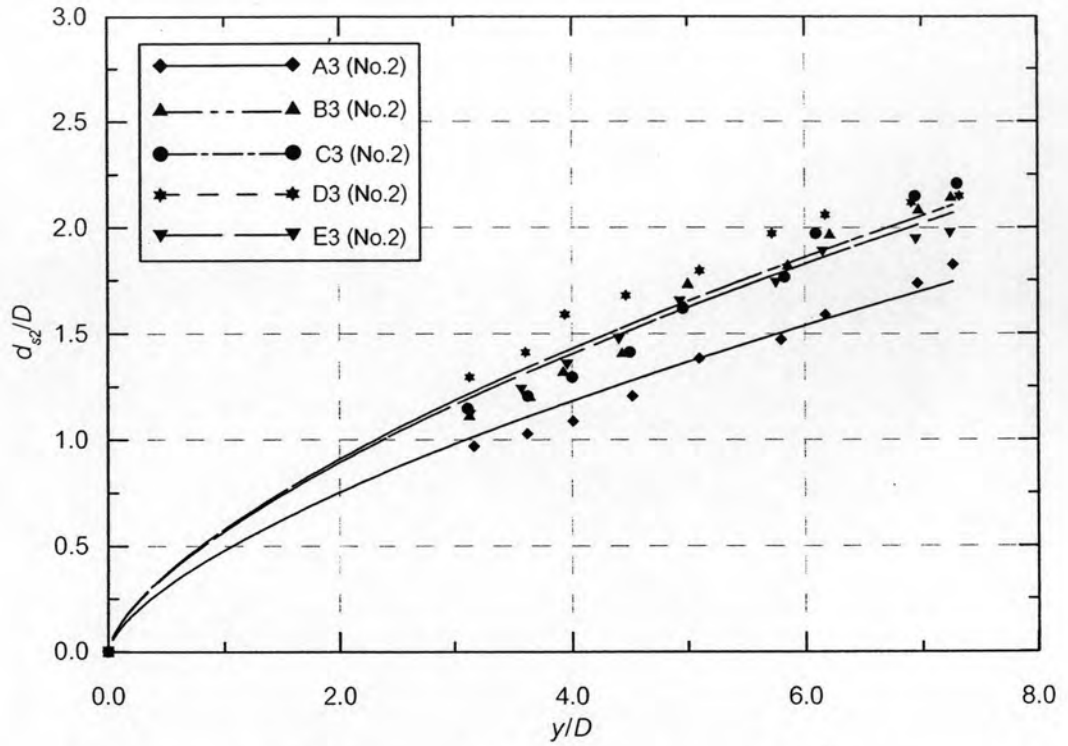
ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของค่าความลึกลงมกััดเซาะในเสาเข็มต้นที่ 3 เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียง 5° จนถึง 20° จะให้ความแตกต่างไม่มากนัก หรือก็คือมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่มีนัยสำคัญในช่วงมุมเอียงดังกล่าว ทำให้ขนาดความลึกลงมกััดเซาะในเสาเข็มต้นที่ 3 ที่มีเสาต้นที่ 1 เอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหลมีค่ามากกว่าเสาต้นที่ 3 ในกรณีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรง โดยเฉลี่ยประมาณ 19%

พิจารณาค่าความลึกลงมกััดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 และเสาเข็มต้นที่ 3 เปรียบเทียบกับค่าความลึกลงมกััดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ของแต่ละมุมเอียง เพื่อดูถึงค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นของเสาเข็มต้นที่ 1 กับเสาเข็มต้นที่ 2 และเสาเข็มต้นที่ 1 กับเสาเข็มต้นที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล พบว่าค่าความลึกลงมกััดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 จะมีค่าน้อยกว่าเสาเข็มต้นที่ 1 ประมาณ 20% เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง และเมื่อมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงเพิ่มขึ้นเป็น 5° , 10° , 15° และ 20° ค่าความลึกลงมกััดเซาะจะมีค่าน้อยกว่าเสาเข็มต้นที่ 1 ประมาณ 12.8%, 11.7%, 8.2% และ 11.8% ตามลำดับ หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นตัวแทนความแตกต่างระหว่างขนาดความลึกลงมกััดเซาะในเสาเข็มต้นที่ 2 ที่น้อยกว่าเสาต้นที่ 1 ประมาณ 13% ตามความสัมพันธ์ระหว่างความลึกลงมกััดเซาะรอบเสาต้นที่ 2 ต่อเสาต้นที่ 1 (d_{s2}/d_{s1}) กับมุมเอียงของเสาเข็ม (β) ในรูป 4-30 แสดงค่าความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ไว้ในตาราง 4-23

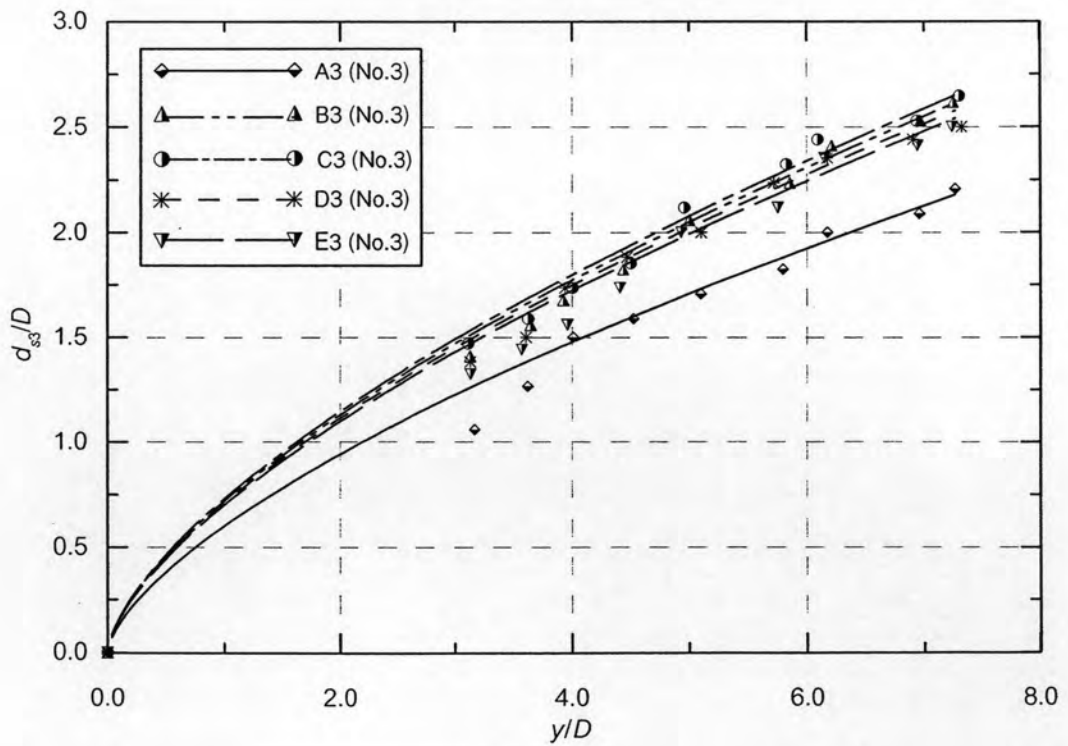
ส่วนค่าความลึกลงมกััดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ในกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง จะมีค่าไม่แตกต่างจากเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง แต่เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 5° , 10° , 15° และ 20° ค่าความลึกลงมกััดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 จะมีมากกว่าเสาเข็มต้นที่ 1 ประมาณ 7.7%, 10.4%, 13.7% และ 8.0% ตามลำดับ ซึ่งมีอัตราความแตกต่างที่ใกล้เคียงกันในแต่ละมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ยประมาณ 8% ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกลงมกััดเซาะรอบเสาต้นที่ 3 ต่อเสาต้นที่ 1 (d_{s3}/d_{s1}) กับมุมเอียงของเสาเข็ม (β) ในรูป 4-31 และแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในตาราง 4-24



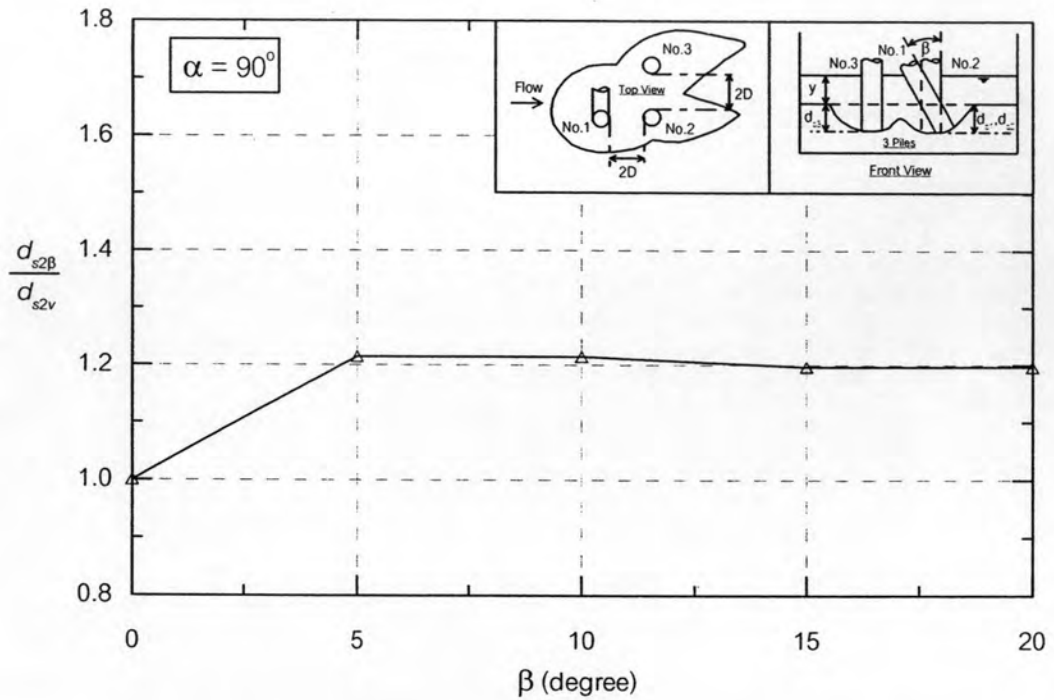
รูป 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม กับ ความลึกการไหล ต่อขนาดเสาเข็ม ของเสาต้นที่ 1 ต้นที่ 2 และต้นที่ 3 แยกตามมุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล



รูป 4-26 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ต่อขนาดเสาเข็ม กับความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม กรณีเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล



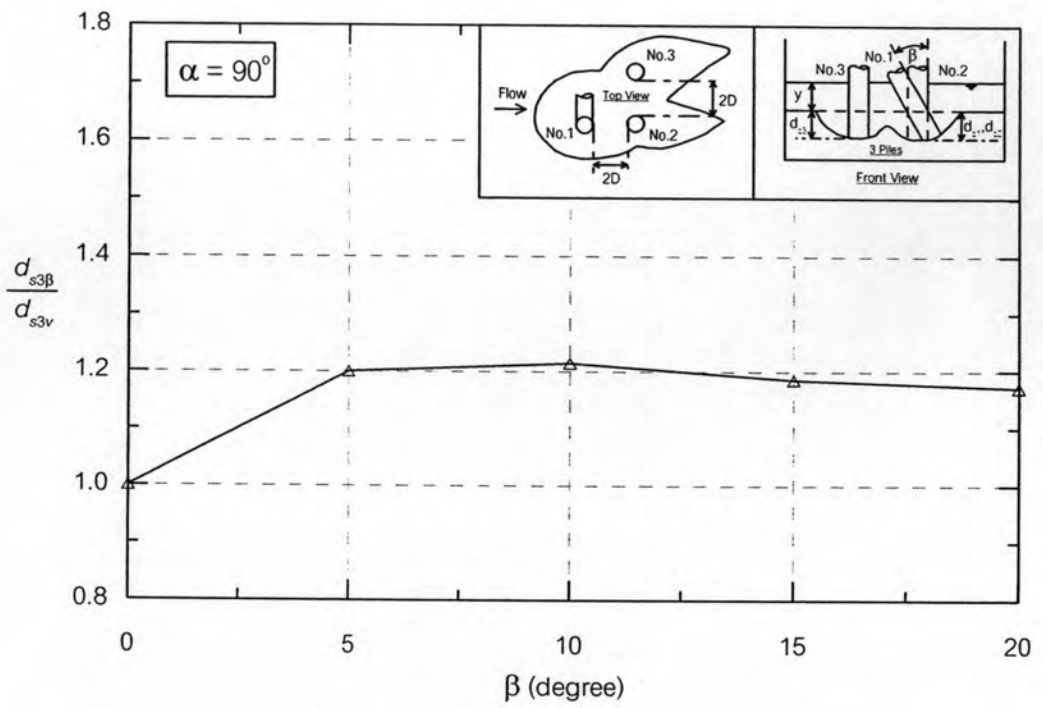
รูป 4-27 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ต่อขนาดเสาเข็ม กับความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม กรณีเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล



รูป 4-28 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมต่างๆ ต่อความลึกกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรงกับ มุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล

ตาราง 4-21 การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ($\alpha = 90^\circ$)

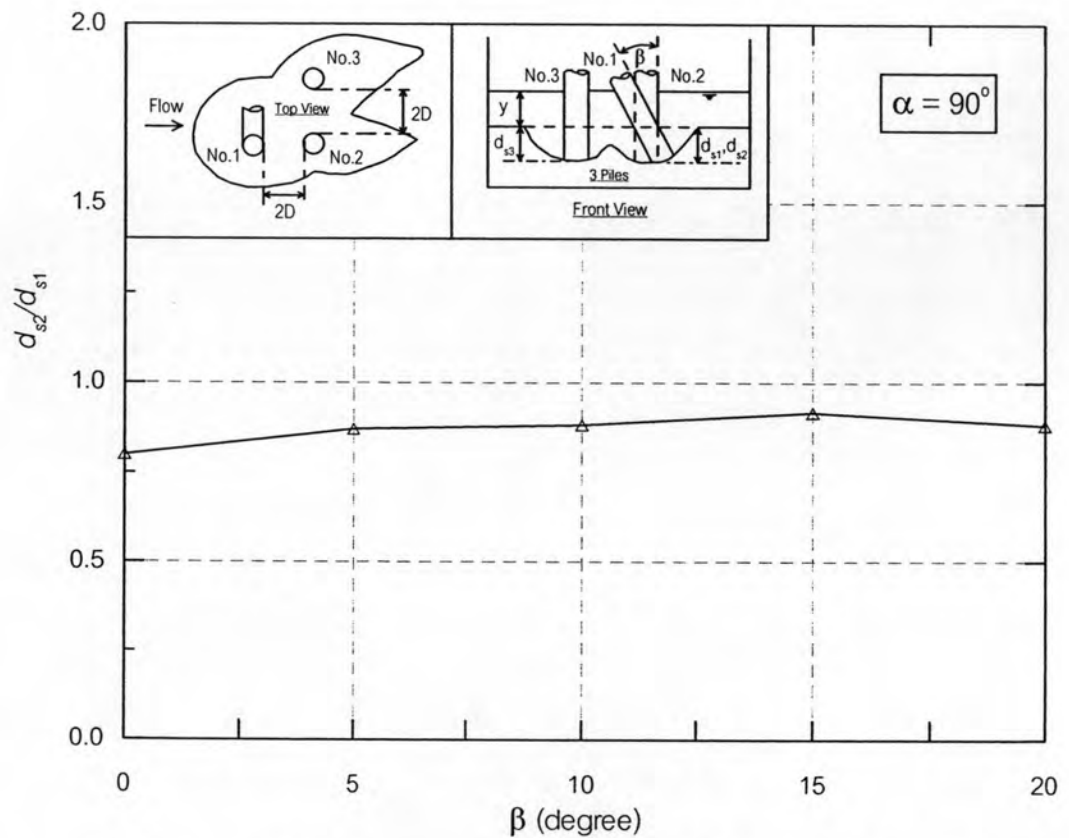
ชื่อกรณีศึกษา	มุมเอียงของเสาเข็ม	การเปลี่ยนแปลง (%)	ลักษณะการเปลี่ยนแปลง
B3 (Pile No.2)	5°	21.0	เพิ่มขึ้น
C3 (Pile No.2)	10°	21.0	เพิ่มขึ้น
D3 (Pile No.2)	15°	20.0	เพิ่มขึ้น
E3 (Pile No.2)	20°	20.0	เพิ่มขึ้น



รูป 4-29 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 3 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมต่างๆ ต่อความลึกกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 3 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรงกับ มุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล

ตาราง 4-22 การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ($\alpha = 90^\circ$)

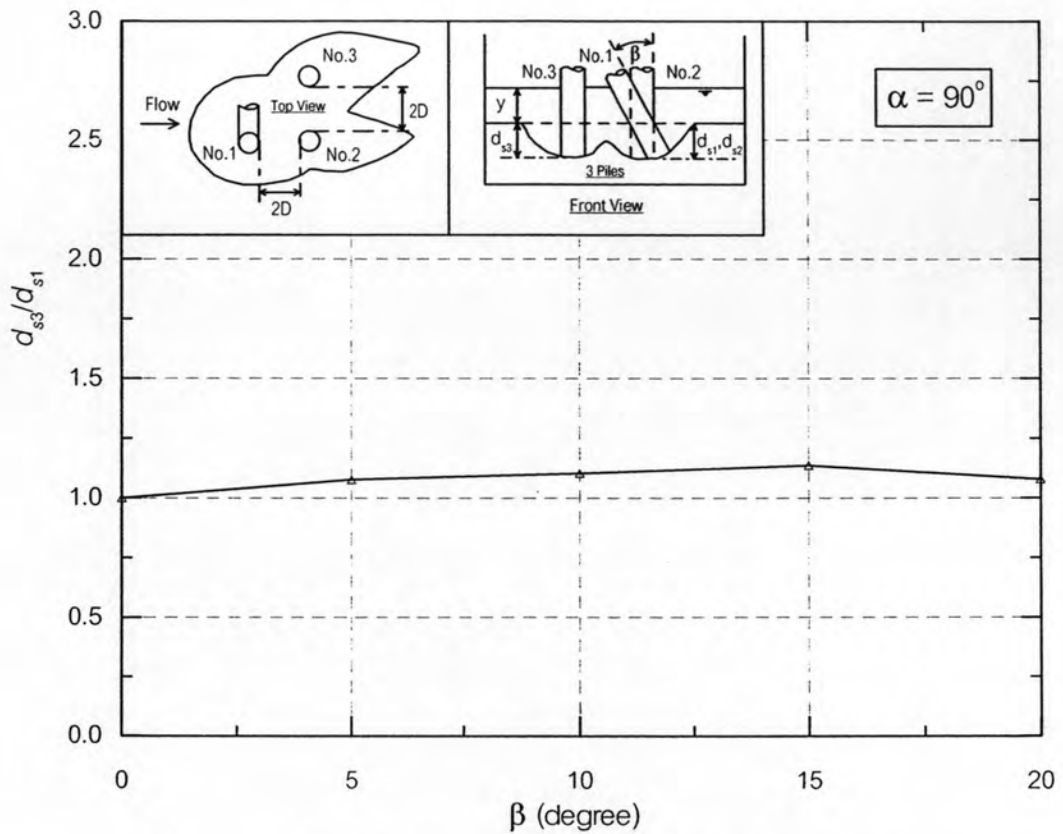
ชื่อกรณีศึกษา	มุมเอียงของเสาเข็ม	การเปลี่ยนแปลง (%)	ลักษณะการเปลี่ยนแปลง
B3 (Pile No.3)	5°	20.0	เพิ่มขึ้น
C3 (Pile No.3)	10°	21.4	เพิ่มขึ้น
D3 (Pile No.3)	15°	18.6	เพิ่มขึ้น
E3 (Pile No.3)	20°	17.2	เพิ่มขึ้น



รูป 4-30 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะคันที่ 2 ต่อความลึกหลุมกัดเซาะคันที่ 1 กับมุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเอียงตั้งฉากกับทิศทางการไหล

ตาราง 4-23 ความแตกต่างระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มคันที่ 1 กับคันที่ 2 ($\alpha = 90^\circ$)

ชื่อกรณีศึกษา	มุมเอียงจากแนวตั้ง	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง	ลักษณะการเปลี่ยนแปลง
A3	0°	-20.0	คันที่ 2 < คันที่ 1
B3	5°	-12.8	คันที่ 2 < คันที่ 1
C3	10°	-11.7	คันที่ 2 < คันที่ 1
D3	15°	-8.2	คันที่ 2 < คันที่ 1
E3	20°	-11.8	คันที่ 2 < คันที่ 1



รูป 4-31 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต้นที่ 3 ต่อความลึกหลุมกัดเซาะต้นที่ 1 กับมุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเอียงตั้งฉากกับทิศทางการไหล

ตาราง 4-24 ความแตกต่างระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 กับต้นที่ 3 ($\alpha = 90^\circ$)

ชื่อกรณีศึกษา	มุมเอียงจากแนวตั้ง	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง	ลักษณะการเปลี่ยนแปลง
A3	0°	0%	ต้นที่ 3 = ต้นที่ 1
B3	5°	+7.7%	ต้นที่ 3 > ต้นที่ 1
C3	10°	+10.4%	ต้นที่ 3 > ต้นที่ 1
D3	15°	+13.7%	ต้นที่ 3 > ต้นที่ 1
E3	20°	+8.0%	ต้นที่ 3 > ต้นที่ 1

4.4 การวิเคราะห์ผลของมุมเอียงร่วมกับระนาบการเอียงเสาเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะ

จุดมุ่งหมายหลักของการศึกษานี้ คือ การเปลี่ยนแปลงมุมเอียงจากแนวตั้ง (β) 5 มุมเอียงตามระนาบการเอียงจากแนวการไหล (α) 3 ระนาบ ของเสาเข็มต้นหน้า ที่มีต่อความลึกหลุมกัดเซาะ ในหัวข้อ 4.2 ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลของมุมเอียงจากแนวตั้ง (β) แยกตามระนาบการเอียงของเสาเข็ม (α) ซึ่งให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะเมื่อเทียบกับกรณีเสาเข็มตั้งตรง ซึ่งยังไม่พิจารณาถึงผลของระนาบการเอียง ในหัวข้อนี้จะนำเอาตัวแปรมุมเอียง (β) และตัวแปรระนาบการเอียงของเสาเข็ม (α) มาพิจารณาร่วมกัน

ส่วนเสาเข็มต้นถัดไปได้กล่าวถึงผลที่ได้รับจากมุมเอียงของเสาเข็มต้นหน้าไปแล้วในหัวข้อ 4.3 โดยได้แยกวิเคราะห์ตามการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงจากแนวตั้ง (β) ในระนาบการเอียงจากแนวการไหล (α) ของเสาเข็มต้นหน้า แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกหลุมกัดเซาะตามมุมเอียงของเสาเข็มต้นหน้า ในระนาบการเอียงต่างๆ ที่ไม่ชัดเจน ไม่ว่าจะเป็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่สัมพันธ์กับมุมเอียง หรือว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดความลึกหลุมกัดเซาะเมื่อเสาเข็มต้นหน้าเปลี่ยนไป ประกอบกับการศึกษาครั้งนี้เน้นถึงผลที่เกิดขึ้นกับเสาเข็มต้นที่มีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงเป็นหลัก เนื่องจากการกัดเซาะของเสาเข็มที่เป็นกลุ่มนั้น เสาเข็มต้นหน้าหรือแถวหน้าจะมีขนาดหลุมกัดเซาะมากกว่าต้นหลังหรือต้นถัดไปในกลุ่มเข็มดังปรากฏในรายงานการศึกษาต่างๆ [Hannah (1978), ธรรมวัฒน์ (1998), FHWA (2001), Ashtiani and Beheshti (2006)]

ดังนั้นในแง่ของการพิจารณาขนาดของหลุมกัดเซาะสูงสุดในเสาเข็มกลุ่ม จึงยึดถือขนาดความลึกหลุมกัดเซาะที่สูงสุดในกลุ่มเข็ม ซึ่งก็คือขนาดความลึกหลุมกัดเซาะที่เกิดกับเสาต้นหน้า ถึงแม้ว่าผลการศึกษานี้จะมีบางระนาบการเอียงของเสาต้นหน้ามีแนวโน้มของการลดลงของหลุมกัดเซาะในต้นหน้า แต่ก็ยังให้ความลึกหลุมกัดเซาะมากกว่าต้นหลัง (ยกเว้นกรณีเสาเข็มต้นหน้าเอียงทำมุม 15° และ 20° ในระนาบการเอียงทแยงกับทิศทางการไหลที่ให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะต้นหลังที่มากกว่า) ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงได้ละผลของเสาเข็มต้นข้างเคียงมาวิเคราะห์ในหัวข้อนี้

จากแนวคิดเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาเข็ม เสมือนการเปลี่ยนขนาดของความกว้างฉายเงา (projected width) ที่รับการปะทะจากกระแสในแนวตั้งฉากของระนาบการเอียงทิศทางต่างๆ ของเสาเข็ม ซึ่งให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะเทียบเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรณีเสาเข็มตั้งตรง ในความหมายเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (effective diameter, D_e) โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของเสาเข็มเอียงที่เปลี่ยนแปลงไปกับการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง

และระนาบการเอียง รวมทั้งความลึกการไหลต่างๆ เหตุเพราะในแต่ละระนาบการเอียงของมุมเอียงจากแนวตั้ง ทำให้เกิดการเปลี่ยนไปของระนาบที่กีดขวางการเคลื่อนตัวของน้ำในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหล ยังผลสู่การเปลี่ยนแปลงกลไกการกัดเซาะให้ต่างไปจากกรณีเสาดั้งเดิมตั้งตรงหรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ การเปลี่ยนรูปการเอียงของเสาดั้งเดิมให้อยู่ในรูปเสาดั้งเดิมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะเท่ากัน ณ ความลึกการไหลนั้นๆ

4.4.1 แนวคิดที่ใช้ในการวิเคราะห์

จากผลการศึกษานี้และการศึกษาที่ผ่านมาชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ตัวแปรหลักที่มีผลต่อความลึกหลุมกัดเซาะ ก็คือ ขนาดของตอม่อและความลึกการไหลของน้ำ ตัวแปรขนาดของตอม่อเป็นลักษณะทางกายภาพของตอม่อ ซึ่งขึ้นกับรูปร่างของตอม่อ กล่าวคือ ถ้าเป็นเสารูปทรงกระบอก ขนาดของตอม่อก็คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาดอม่อ ถ้าเป็นรูปอื่น เช่นสี่เหลี่ยมก็จะเป็นขนาดความยาวด้านที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล ในกรณีที่เสาดั้งเดิมทำมุมกับทิศทางการไหลขนาดของตอม่อก็จะประมาณด้วยค่าความกว้างฉายเงาในระนาบระดับที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (horizontal projection width) ซึ่งถ้าเป็นเสารูปทรงกระบอก ไม่ว่าจะเสาดั้งเดิมจะทำมุมกับทิศทางการไหลอย่างไร ขนาดของพื้นที่ฉายเงาในระนาบระดับที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลก็จะมีขนาดคงที่เท่ากับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาดอม่อนั้นเอง

การเปลี่ยนแปลงขนาดของตอม่อ หรือความกว้างในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำ ก็เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะของทิศทางการไหล (angle of attack) อันเกิดจากการตั้งของเสาดั้งเดิมในลักษณะที่หมุนบิดเอียง (skewness) ไปจากแนวที่ระนาบความกว้างของเสาดั้งฉากกับทิศทางการไหล

จากลักษณะที่ผ่านมาสรุปลงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงมุมปะทะการไหลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของความกว้างฉายเงาในระนาบระดับที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเสาดอม่อนั้น ทำให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้น ซึ่งก็สอดคล้องกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของเสาดอม่อที่มีผลต่อความลึกหลุมกัดเซาะ โดยสามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะของการไหลนั้นในอีกแง่หนึ่งคือ ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเสาดั้งเดิมสัมพัทธ์กับการไหล นั่นก็คือ การเปลี่ยนแปลงขนาดของเสาดั้งเดิมเอง โดยเป็นขนาดของเสาดอม่อตัดผลของมุมปะทะออกหรือเปลี่ยนแปลงผลของมุมปะทะมาเป็นผลของขนาดเสาดอม่อ

ดังกล่าวมาข้างต้นว่า ในลักษณะของเสาดอม่อรูปร่างต่างๆ ที่ไม่ใช่รูปทรงกระบอกนั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะ จะทำให้เกิดความกว้างฉายเงาในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล

มากขึ้น นอกจากเสาคอมรูปทรงกระบอกเท่านั้นที่ทำให้ขนาดความกว้างฉายเงาในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหลดังกล่าวคงที่ และเท่ากับขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกระบอก อย่างไรก็ตาม สภาวะดังกล่าวเป็นลักษณะของการตั้งเสาคอมตรงตั้ง ซึ่งเป็นลักษณะการตั้งของเสาคอมม่อทั่วไป ถ้าการตั้งเสาคอมม่อทรงกระบอกไม่อยู่ในแนวตั้ง แต่เอียงในระนาบและมุมต่างๆ จากแนวตั้ง ก็สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของคอมม่อในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหลได้

ดังนั้นการเอียงของเสาคอมรูปทรงกระบอก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของคอมม่อที่สัมพันธ์กับทิศทางการไหล ก็ย่อมส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาคอมม่อดังกล่าว นอกจากนี้การเอียงของเสายังทำให้ขนาดของความสูงหรือความยาวของเสาที่สัมผัสกับน้ำมากขึ้นจากเสาคอมม่อที่ตั้งตั้ง เหมือนการเปลี่ยนแปลงความสูงของเสาในความลึกการไหลใดๆ นั้นจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกหลุมกัดเซาะเช่นกัน หรือถ้ามองในแง่ของความลึกของเสาที่มีสัมพันธ์กับความลึกของน้ำที่สัมผัสเสา ก็เป็นการเพิ่มความลึกการไหลนั่นเอง

ดังนั้น การเอียงของเสาคอมม่อที่ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของขนาดคอมม่อ และความยาวของเสาที่สัมผัสน้ำ ซึ่งน่าจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในแนวโน้มที่เพิ่มขนาดความลึกหลุมกัดเซาะ แต่เนื่องจากการเอียงของเสาในระนาบต่างๆ ทำให้เสาส่วนบนจากรฐาน มีระยะห่างออกจากแกนกลางของฐานเสา ซึ่งเป็นจุดของการเกิดหลุมกัดเซาะ ทำให้อิทธิพลของความสูงหรือความยาวเสาคอมม่อหลุมกัดเซาะลดลง เมื่อเสาคอมม่อเอียงออกจากแนวตั้งมากขึ้น โดยเฉพาะในระนาบเอียงที่ห่างออกจากระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล จะทำให้ระยะการปะทะจากกระแสน้ำของเสาคอมม่อในทิศทางการไหลห่างออกไปจากแกนฐานของเสาคอมม่อ

ดังนั้นการวิเคราะห์หาขนาดความลึกหลุมกัดเซาะจากผลการเอียงของเสาเข็มต้นหน้าของกลุ่มเสาเข็ม จึงพิจารณาถึงการเอียงของเสาที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเสาที่สัมพันธ์กับการไหล ซึ่งก็คือ การเอียงที่ส่งผลต่อขนาดของเสา (ความกว้างฉายเงาในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล) ความสูงของเสา (ความยาวที่สัมผัสน้ำ) และระยะปะทะน้ำของแนวเสาที่เบี่ยงเบนไปจากระนาบแกนฐานเสา โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

4.4.2 การวิเคราะห์หาขนาดของเสาในแต่ละระนาบความลึก (D_{ei})

การพิจารณาลักษณะกายภาพให้สอดคล้องและครอบคลุม จึงได้นิยามเทอมของตัวแปรบอกขนาดรูปร่าง (geometric variables) ตามลักษณะการเอียง ที่ขึ้นกับมุมเอียงจากแนวตั้ง (β) ระนาบการเอียงของเสาเข็ม (α) และค่าความลึกการไหล (y) ที่เปลี่ยนไปในแต่ละกรณี เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการพิจารณาเปลี่ยนรูปการเอียงให้ได้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_0) และ

นำไปใช้กับสมการตั้งต้นในการประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มเอียงทำมุมกับแนวตั้ง (β) ตามระนาบการเอียง (α) และที่ค่าความลึกการไหล (y) ต่างๆ ได้ ตัวแปรบอกขนาดรูปร่างตามลักษณะการเอียงที่ใช้เป็นตัวแทนประกอบด้วย

1.) D_{pi} (horizontal projection width) เป็นตัวแปรบอกขนาดของเสาเข็มในมิติของความกว้างในระนาบตั้งฉากกับกระแส น้ำ นั่นก็คือ ขนาดของความกว้างฉายเงา (projected width) ของเสาเข็มในระนาบระดับ (horizontal plane) ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล ดังแสดงในรูป 4-32 ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงจากแนวตั้ง (β) ในระนาบการเอียงของเสาเข็ม (α) 3 ระนาบ จะทำให้ขนาดของเสาเข็มหรือความกว้างฉายเงาในระนาบระดับของเสาเข็มเปลี่ยนไป ค่าของขนาดเสาเข็มที่มุมเอียงต่างๆ ในระนาบต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$D_{pi} = 2 \left[\frac{(0.5D \sec \beta)^2 (0.5D)^2}{(0.5D \sec \beta \sin(90 + \alpha))^2 + (0.5D \cos(90 + \alpha))^2} \right]^{0.5} \quad (4-13)$$

เมื่อ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (เซนติเมตร)

β คือ มุมเอียงจากแนวตั้งของเสาเข็มต้นที่ 1 (องศา)

α คือ มุมของระนาบการเอียงเสาเข็มจากระนาบตั้งของแนวการไหล (องศา)

2.) l_i คือ ตัวแปรบอกมิติความยาวในแนวเดียวกับทิศทางการไหล เกิดจากเสาเข็มมีการเอียงออกจากแนวตั้งตามระนาบการเอียงต่างๆ ระยะ l_i จะแปรผันตามค่าความลึกการไหลใดๆ (y) มุมเอียงจากแนวตั้ง (β) และระนาบการเอียงของเสาเข็ม (α) ซึ่งวัดออกจากแกนอ้างอิงในแนวตั้งที่ลากผ่านฐานเสาเข็มต้นที่เอียง จนถึงผิวเสาเข็มเอียงที่สัมผัสกับผิวน้ำ ณ ความลึกการไหลใดๆ (y) ดังแสดงในรูป 4-33(ก) สามารถคำนวณได้จากสมการ

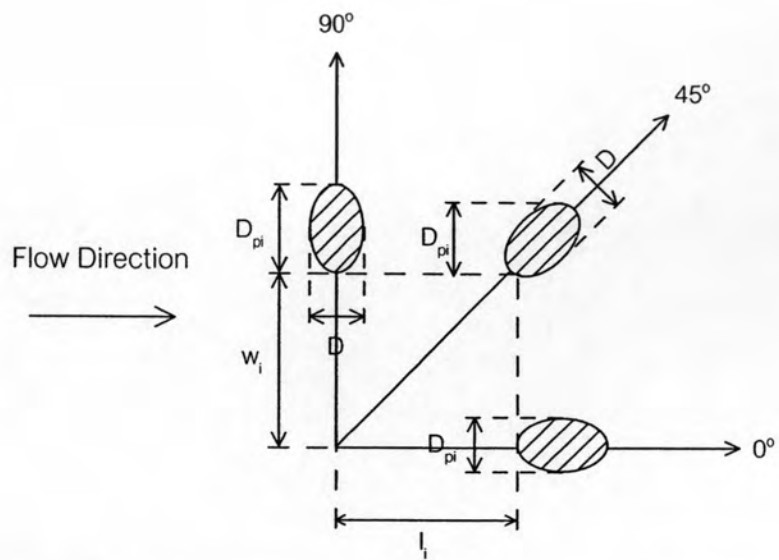
$$l_i = y_i \tan \beta \cos \alpha \quad (4-14)$$

3.) w_i คือ ตัวแปรบอกมิติความยาวในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหล เป็นระยะที่เกิดจากเสาเข็มมีการเอียงออกจากแนวตั้งตามระนาบการเอียงต่างๆ กับแนวการไหล ระยะ w_i จะแปรผันตามค่าความลึกการไหลใดๆ (y) มุมเอียงจากแนวตั้ง (β) และระนาบการเอียงของเสาเข็ม (α) ซึ่งวัดออกจากแกนอ้างอิงในแนวตั้งที่ลากผ่านฐานเสาเข็มต้นที่เอียง จนถึงผิวเสาเข็มเอียงที่สัมผัสกับผิวน้ำ ณ ความลึกการไหลใดๆ (y) ดังแสดงในรูป 4-33(ข) สามารถคำนวณได้จากสมการ

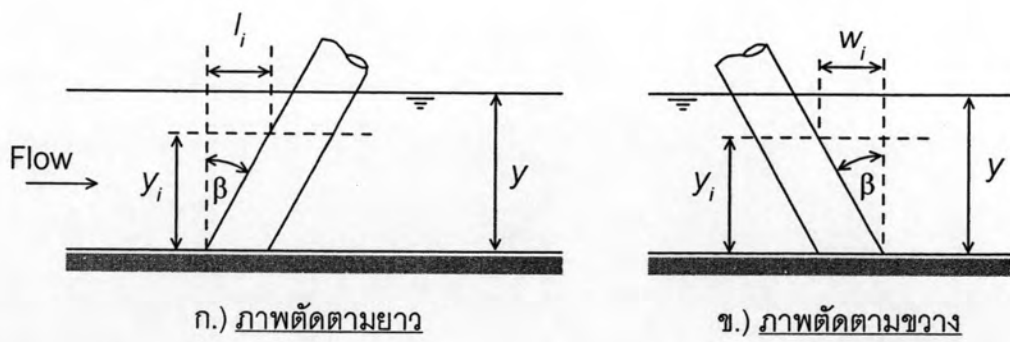
$$w_i = y_i \tan \beta \sin \alpha \quad (4-15)$$

จากตัวแปรบอกขนาดรูปร่างข้างต้นจะถูกนำไปใช้ในการปรับเปลี่ยนรูปร่างการเอียงของเสาเข็มให้มีลักษณะของเสาเข็มตั้งตั้งก่อน โดยการพิจารณาถึงระยะเอียงของเสาที่ห่างออกจากแกนกลางฐานเสาที่ความลึกการไหลใดๆ (y_i) เมื่อเกิดการเอียงทำมุมกับแนวตั้ง (β) ในแต่ละระนาบการเอียงของเสาเข็ม (α) ซึ่งก็คือตัวแปรบอกมิติความยาว l_i และ w_i หาได้จากสมการ 4-14 และ 4-15 ตามลำดับ โดยใช้เทคนิคการหาส่วนกลับของค่าระยะทางกำลังสอง (inverse distance square) เพื่อปรับการเอียงของเสาในระนาบการเอียงต่างๆ ณ ตำแหน่งระนาบความลึกการไหลใดๆ ให้กลับเข้าสู่แกนตั้งของเสาเข็มตั้งตรง โดยจะมีตัวแปรบอกมิติขนาดของความกว้างฉายเงา (projected width, D_{pi}) ของเสาเข็มในระนาบระดับ (horizontal plane) หาได้จากสมการ 4-13 ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล เป็นตัวแทนของมุมเอียง (β) ในระนาบการเอียง (α) ต่างๆ ของเสาเข็ม

และจากการใช้เทคนิคการหาส่วนกลับของค่าระยะทางกำลังสอง เพื่อปรับระยะเอียง เนื่องจากการเอียงของเสาในแต่ละระนาบความลึกการไหลใดๆ ให้เข้าสู่แกนตั้ง จะใช้เป็นตัวคูณถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) เพื่อปรับขนาดของความกว้างฉายเงา (D_{pi}) ซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งบอกลักษณะการเอียงของเสาเข็มที่ระนาบความลึกการไหลนั้นๆ ให้ได้ขนาดเสาที่ทำให้เกิดความลึกหลุมกัดเซาะที่สัมพันธ์กับความลึกการไหลนั้นๆ ทั้งนี้จากที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.4.1 ถึงการเอียงของเสาทำให้ขนาดของความสูงหรือความยาวของเสาที่สัมพันธ์กับน้ำมากขึ้นจากเสาตอม่อที่ตั้งตั้ง เสมือนเป็นการเพิ่มความลึกการไหล ดังนั้น การคูณค่าถ่วงน้ำหนักกับขนาดความกว้างฉายเงา (D_{pi}) ที่มีค่าความลึกการไหลที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ขนาดของเสาที่สัมพันธ์กับค่าความลึกการไหลนั้นมีค่าลดลงเรื่อยๆ เพราะยังมีความลึกการไหลที่มากขึ้น จะทำให้อิทธิพลของความสูงหรือความยาวเสาคือหลุมกัดเซาะลดลง หรือกล่าวได้ว่า จะเป็นการเปลี่ยนรูปของเสาเข็มเอียงให้อยู่ในรูปของเสาเข็มที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาที่เล็กลงเรื่อยๆ ในแต่ละระนาบความลึก (D_{pi}) จากที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถแสดงการเปลี่ยนรูปการเอียงของเสาได้ดังรูป 4-34(ก) และคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้



รูป 4-32 ตัวแปรบอกขนาดของความกว้างฉายเงา (projected width) ของเสาเข็มในระนาบระดับ (horizontal plane) ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล



ก.) ภาพตัดตามยาว

ข.) ภาพตัดตามขวาง

รูป 4-33 ตัวแปรบอกมิติความยาวในแนวเดียวกับทิศทางการไหล (l_i) และความยาวในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหล (w_i)

$$D_{ei} = \phi_i D_{pi} \quad (4-16)$$

เมื่อ ϕ_i คือ ตัวคูณถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) คำนวณได้จาก

$$\phi_i = \frac{D}{D + \cos^2 \alpha \sqrt{1.9(I_i/D)^2 + 0.1(W_i/D)^2}} \quad (4-17)$$

แทนสมการ 4-17 ลงในสมการ 4-16 จะได้สมการ

$$D_{ei} = \frac{D_{pi} D}{D + \cos^2 \alpha \sqrt{1.9(I_i/D)^2 + 0.1(W_i/D)^2}} \quad (4-18)$$

สมการ 4-18 คือ ค่าขนาดเสาเข็มในแต่ละระนาบความลึก ที่ถูกเปลี่ยนรูปมาจากเสาเข็มเอียงจากแนวตั้ง (β) ในระนาบการเอียง (α) ต่างๆ ซึ่งยังไม่สามารถนำมาใช้กับสมการตั้งต้นที่อยู่ในรูปของเสาเข็มตั้งตรงได้ จึงต้องมีการเปลี่ยนรูปของเสาเข็มในลักษณะดังกล่าวให้ได้ขนาดเสาเข็มที่ให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะเทียบเท่ากับขนาดเสาเข็มในกรณีตั้งตรง เพื่อสามารถนำไปใช้ร่วมกับสมการความสัมพันธ์ของเสาเข็มตั้งตรงได้ ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.4.3 การวิเคราะห์หาขนาดของเสาเข็มประสิทธิผล (D_e)

สมการ 4-18 ใช้หาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_{ei}) ที่ค่าความลึกการไหลใดๆ (y_i) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนลักษณะการเอียงของเสาเข็มให้เป็นเสาเข็มตั้งตรงที่มีขนาดแตกต่างกันตามความลึกการไหล ในหัวข้อนี้จะเข้าสู่ขั้นตอนการเปลี่ยนรูปของเสาเข็มตั้งตรงที่มีขนาดแตกต่างกันให้เป็นเสาเข็มตั้งตรงที่มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลเฉลี่ยตลอดช่วงความลึกการไหลทั้งหมด ดังรูป 4-34(ข) โดยใช้หลักการหาส่วนกลับของค่าระยะทางกำลังสอง ซึ่งในที่นี้คือ ค่าความลึกการไหลใดๆ (y_i) และจากการพิจารณาผลรวมของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_{ei}) ในทุกช่วงความลึกการไหล แล้วหารด้วยผลรวมของส่วนกลับค่าความลึกการไหลยกกำลังสอง มีรูปสมการทั่วไปดังนี้

$$D_e = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{D_{ei}}{y_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{y_i^2} \right)} \quad (4-19)$$

แทนค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลที่ค่าความลึกการไหลใดๆ (D_{ei}) จากสมการ 4-18 ลงในสมการ 4-19 จะได้

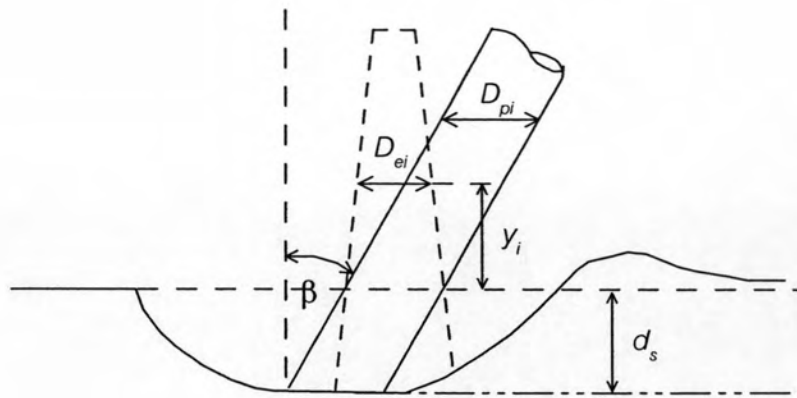
$$D_e = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{DD_{pi}}{D + \cos^2 \alpha \sqrt{1.9(I_i/D)^2 + 0.1(w_i/D)^2}} \right) \left(\frac{1}{y_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{y_i^2} \right)} \quad (4-20)$$

พิจารณาเทอมของตัวแปรทั้งหมดโดยแทนค่าสมการ 4-13, 4-14 และ 4-15 ลงในสมการ 4-20 แล้วจัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการที่ใช้ประมาณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) ที่ให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะเทียบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางกรณีเสาะเข็มตั้งตรง ดังนี้

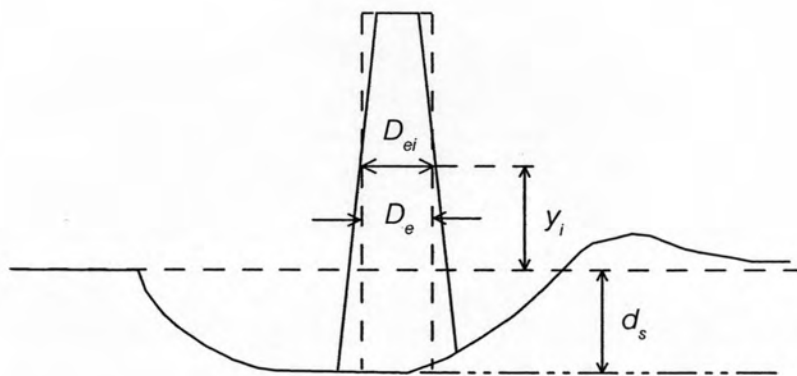
$$D_e = \sum_{i=1}^N \left\{ \left[\frac{2}{y_i^2} \right] \left[\frac{(0.5D \sec \beta)^2 (0.5D)^2}{(0.5D \sec \beta \sin(90 + \alpha))^2 + (0.5D \cos(90 + \alpha))^2} \right]^{0.5} \right. \\ \left. \left[\frac{D^2}{D^2 + y_i \tan \beta \cos^2 \alpha \sqrt{1.9 \cos^2 \alpha + 0.1 \sin^2 \alpha}} \right] \right\} / \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4-21)$$

นำสมการ 4-21 มาคำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) ในแต่ละมุมเอียงที่ระนาบการเอียงต่างๆ โดยอาศัยข้อมูลความลึกการไหลจากการทดลอง (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ค) เพื่อเปรียบเทียบกับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลที่ได้จากการเทียบความลึกหลุมกัดเซาะระหว่างเสาะเข็มเอียงกับเสาะเข็มตั้งตรงจากข้อมูลการทดลอง ซึ่งแยกเปรียบเทียบตามระนาบการเอียงตามแนวการไหล ($\alpha = 0^\circ$) ระนาบการเอียงทแยงกับทิศทางการไหล ($\alpha = 45^\circ$) และระนาบการเอียงตั้งฉากกับทิศทางการไหล ($\alpha = 90^\circ$) ดังรูป 4-35, 4-36 และ 4-37 ตามลำดับ และรวมทุกระนาบการเอียงอยู่ในรูปเดียวกัน ดังรูป 4-38

จากการนำค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) ที่ได้จากการคำนวณในสมการ 4-21 มาเปรียบเทียบกับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะอยู่บนเส้น 45° ซึ่งเป็นเส้นที่บอกถึงค่าแกนนอนมีค่าเท่ากับแกนตั้ง และมีข้อมูลมากกว่า 90% ของข้อมูลทั้งหมดอยู่ในช่วงความแตกต่าง $\pm 10\%$ ดังนั้น สามารถนำสมการประมาณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) ที่อยู่ในรูปสมการ 4-21 มาใช้หาขนาดของเสาะเข็มที่ให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะเทียบเท่ากับการเอียงของเสาะเข็มในระนาบการเอียงนั้นๆ ที่ค่าความลึกการไหลใดๆ ได้

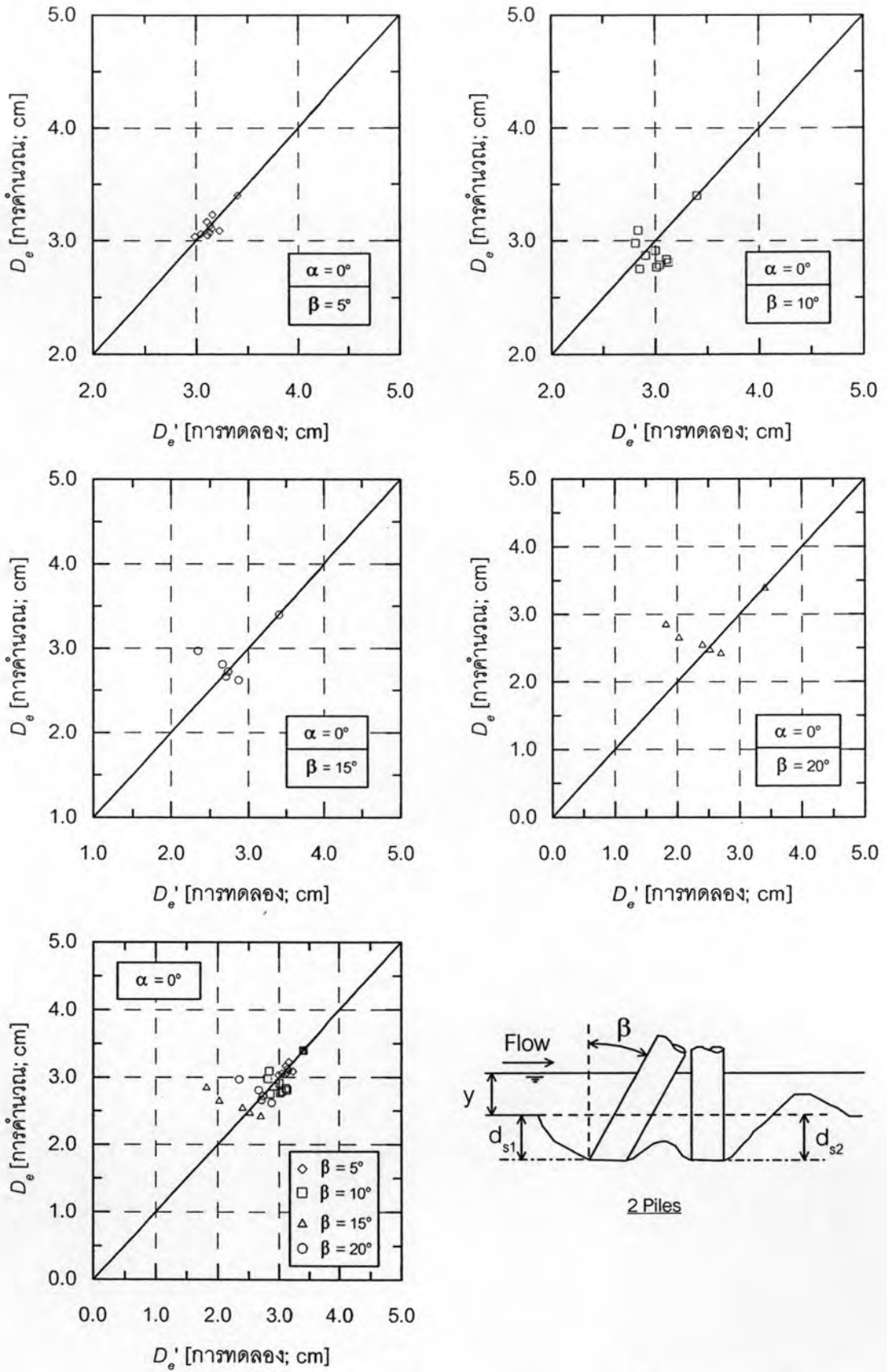


ก.) เปลี่ยนเสาเข็มเอียงให้มีขนาดเสาเข็มตั้งตรงที่มีขนาด
ของเสาที่ต่างกันตามความลึก

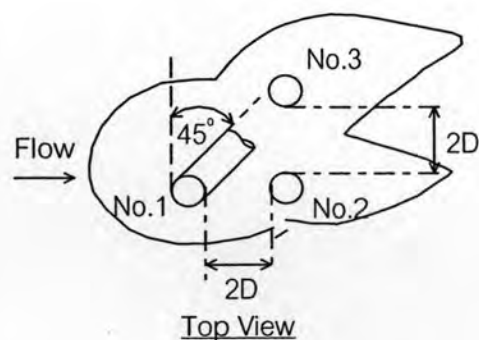
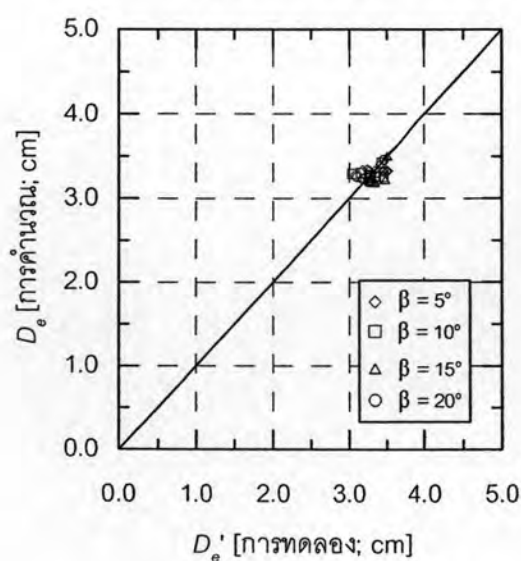
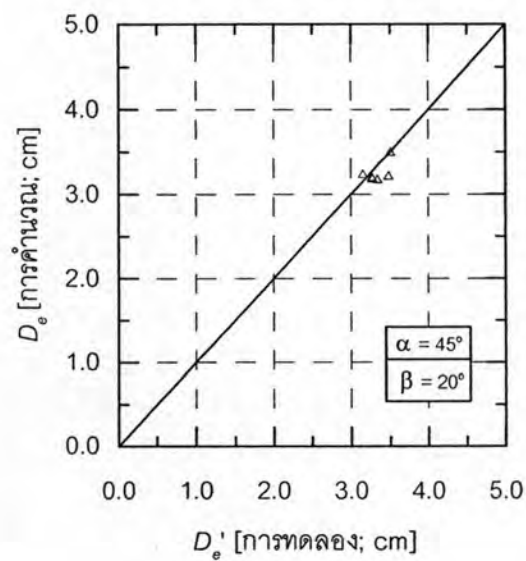
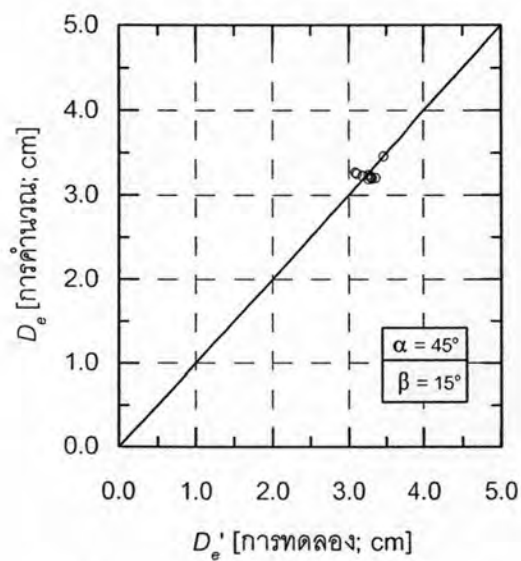
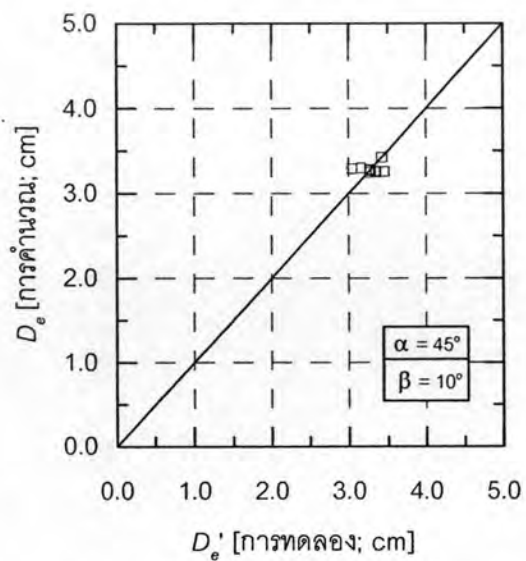
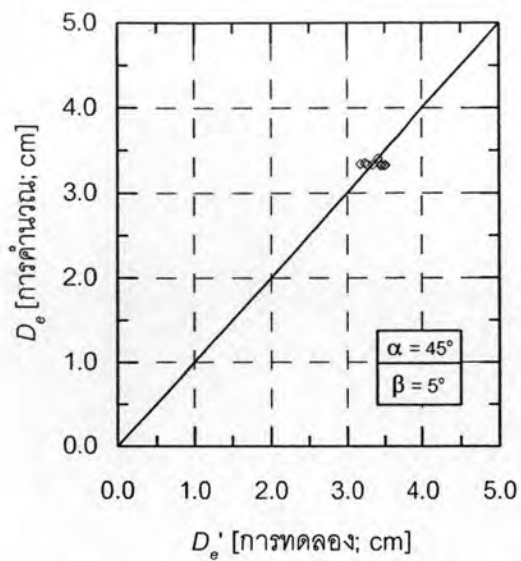


ข.) เปลี่ยนเสาเข็มเอียงที่มีขนาดที่แตกต่างกันตามความลึก
ให้เป็นเสาเข็มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าเสาเข็มตั้งตรง

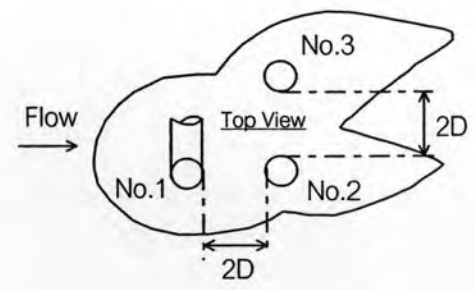
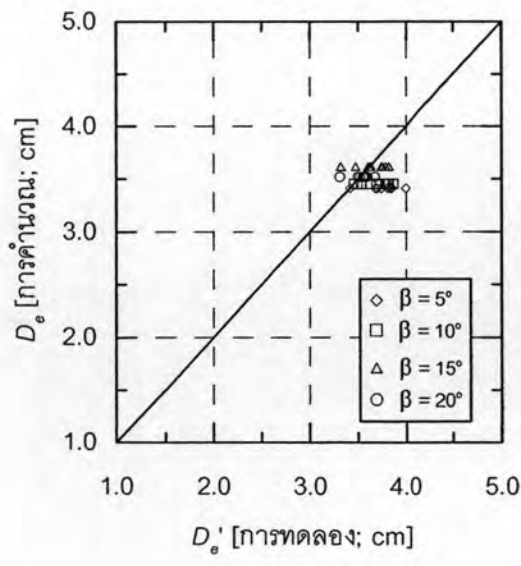
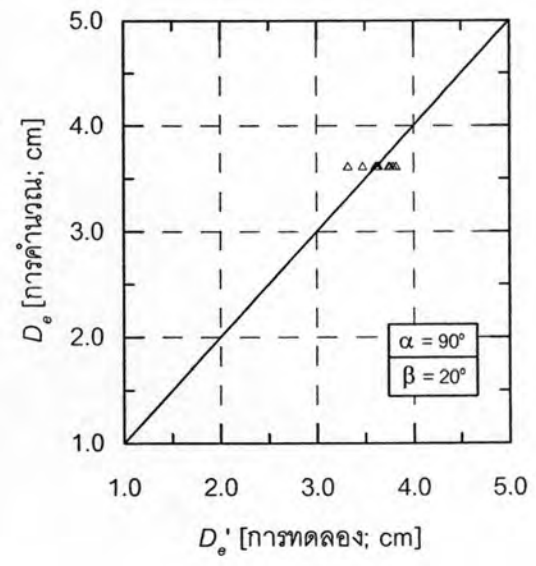
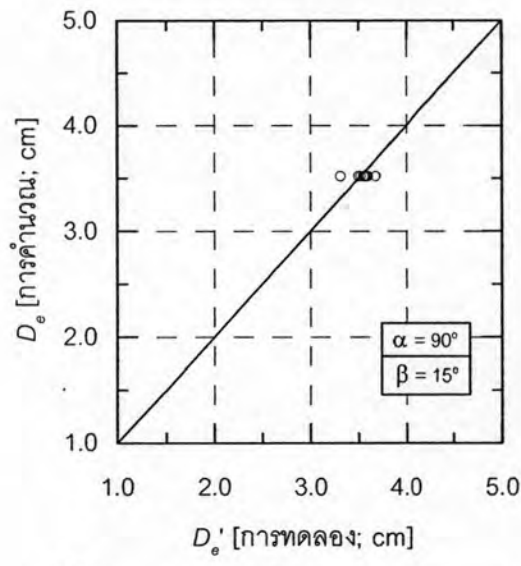
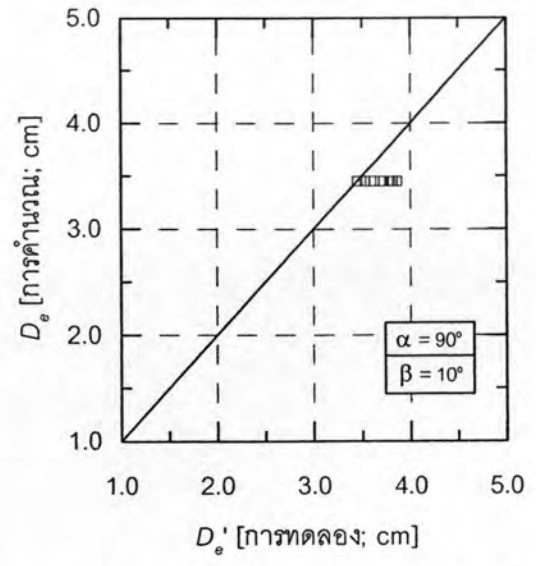
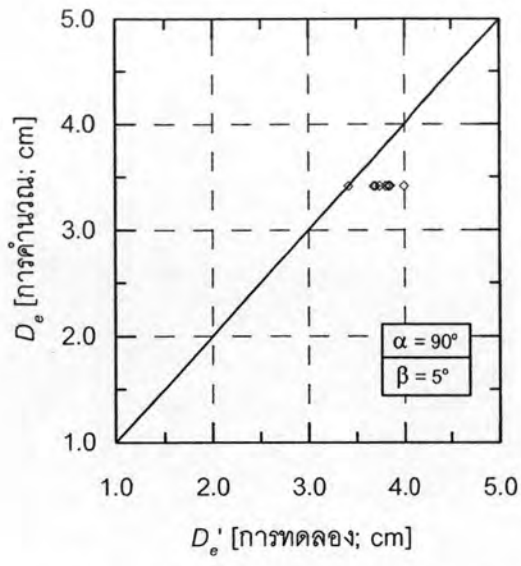
รูป 4-34 ขั้นตอนการเปลี่ยนรูปร่างการเอียงของเสาเข็มให้มี
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าเสาเข็มตั้งตรง



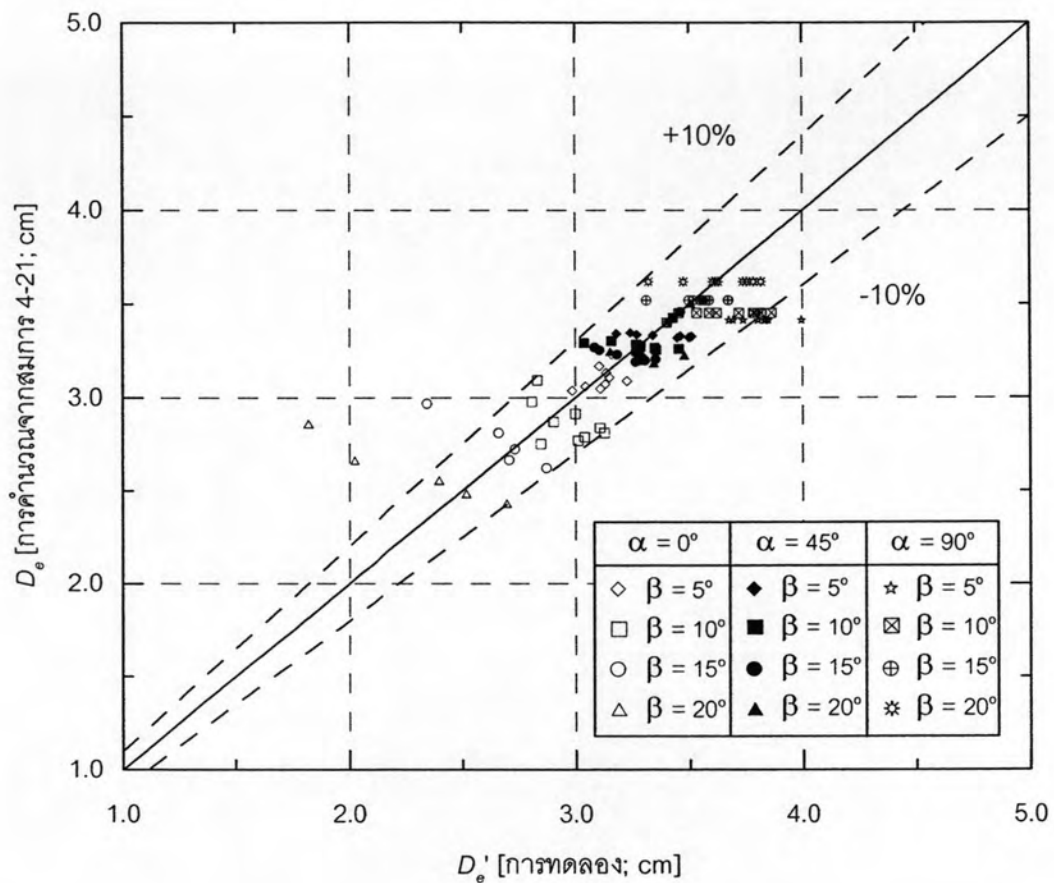
รูป 4-35 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) ที่ได้จากสมการ 4-21 และที่ได้จากการทดลอง กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบเดียวกับการไหล ($\alpha = 0^\circ$)



รูป 4-36 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) ที่ได้จากการสมการ 4-21 และที่ได้จากการทดลอง กรณีเสาค้ำเฉียงในระนาบทแยงกับการไหล ($\alpha = 45^\circ$)



รูป 4-37 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) ที่ได้จากการสมการ 4-21 และที่ได้จากการทดลอง กรณีเสาชิมเอียงในระนาบตั้งฉากกับการไหล ($\alpha = 90^\circ$)



รูป 4-38 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_o) ที่ได้จากสมการ 4-21 และที่ได้จากการทดลอง เมื่อรวมทุกระนาบการเอียงอยู่ในรูปเดียวกัน

4.5 เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_o) กับสมการประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะ

จากการใช้ตัวแปรบอกขนาดในการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_o) เหมือนการเปลี่ยนรูปการเอียงของเสาเข็มในระนาบต่างๆ ให้มีขนาดความกว้างฉายเงาของเสาเข็มในระนาบระดับ (D_{pi}) ณ ความลึกการไหลต่างๆ เปลี่ยนไป ซึ่งจะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะเทียบเท่ากับเสาเข็มตั้งตรง จากการวิเคราะห์หาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลโดยอาศัยข้อมูลความลึกการไหลจากการทดลองในหัวข้อ 4.4.3 จะพบว่าที่มุมเอียงจากแนวตั้ง (β) มุมเดียวกันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_o) จะลดลงตามความลึกการไหลที่เพิ่มขึ้น และเมื่อมุมเอียงจากแนวตั้ง (β) เปลี่ยนแปลง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_o) จะเปลี่ยนไปในแนวโน้มที่ลดลงตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณีเสาเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_o) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงกับมุมเอียงที่ความลึกการไหลต่างๆ แต่จะมีขนาดเท่ากับขนาดความกว้างฉายเงาของเสาเข็มในระนาบระดับ (D_{pi}) ตลอดความลึกการไหลที่มุมเอียง (β) นั้นๆ

เนื่องด้วยการศึกษาและทดลองครั้งนี้มุ่งเน้นถึงผลของเสาเข็มเอียงที่มีต่อค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเสาเข็มต้นที่เอียงและเสาเข็มใกล้เคียง โดยมีการเอียงใน 3 ระนาบตั้ง คือ เอียงในระนาบเดียวกับแนวการไหล เอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล และเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ทำให้การพิจารณาออกแบบรูปร่างแบบจำลองต่อม่อที่ใช้ในการทดลอง มีความแตกต่างในเรื่องจำนวนเสาเข็มข้างเคียงที่จะได้รับผลจากการเอียงในระนาบนั้นๆ ซึ่งการเอียงของเสาเข็มในระนาบแนวเดียวกับการไหลคาดว่าจะส่งผลต่อเสาเข็มต้นที่วางในแนวเดียวกับการไหลไปทางด้านท้ายน้ำของเสาเข็มต้นที่เอียง รวมเสาเข็มที่ใช้จำนวน 2 ต้น ส่วนการเอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหลและเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล เสาเข็มข้างเคียงที่คาดว่าจะได้รับผลของมุมเอียงมีจำนวน 2 ต้น โดยมีการจัดวางเป็นลักษณะ 3 เหลี่ยมมุมฉาก มีเสาเข็มต้นหน้าที่เอียงเป็นยอดสามเหลี่ยม และ 2 ต้นหลังถัดที่จากต้นหน้าเป็นแนวฐานสามเหลี่ยมที่วางอยู่ในแนวเดียวกัน

ทำให้สามารถกำหนดสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ 2 สมการ ดังผลการวิเคราะห์ที่กล่าวในหัวข้อ 4.1 คือ สมการ 4-4 กรณีเสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น และสมการ 4-5 กรณีเสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น ทั้งนี้เพื่อให้สามารถใช้งานในวงกว้าง จึงเลือกใช้สมการ 4-5 ซึ่งเป็นสมการในกรณีเสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น เป็นสมการตั้งต้น เนื่องจากครอบคลุมผลการทดลองทั้งในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล และเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ประกอบกับความแตกต่างจากการมีและไม่มีเสาเข็มต้นที่ 3 มีน้อยทำให้ละผลจากปัจจัยดังกล่าว

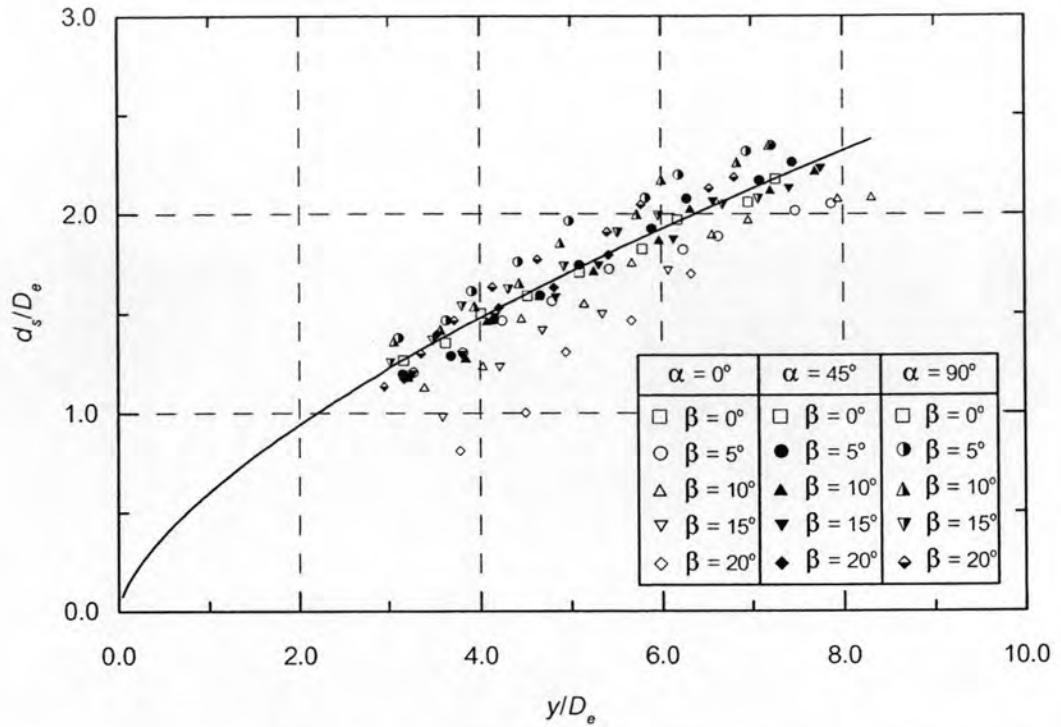
ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) ประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 เปรียบทำมุมกับแนวตั้งในระนาบต่างๆ ที่ความลึกการไหลต่างกัน โดยแทนค่าขนาดเสาเข็ม (D) ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) ในสมการ 4-5 ซึ่งเป็นสมการตั้งต้นในกรณีเสาเข็ม 3 ต้นตั้งตรงจะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{d_{s1}}{D_e} = 0.70 \left(\frac{y}{D_e} \right)^{0.55} \quad (4-22)$$

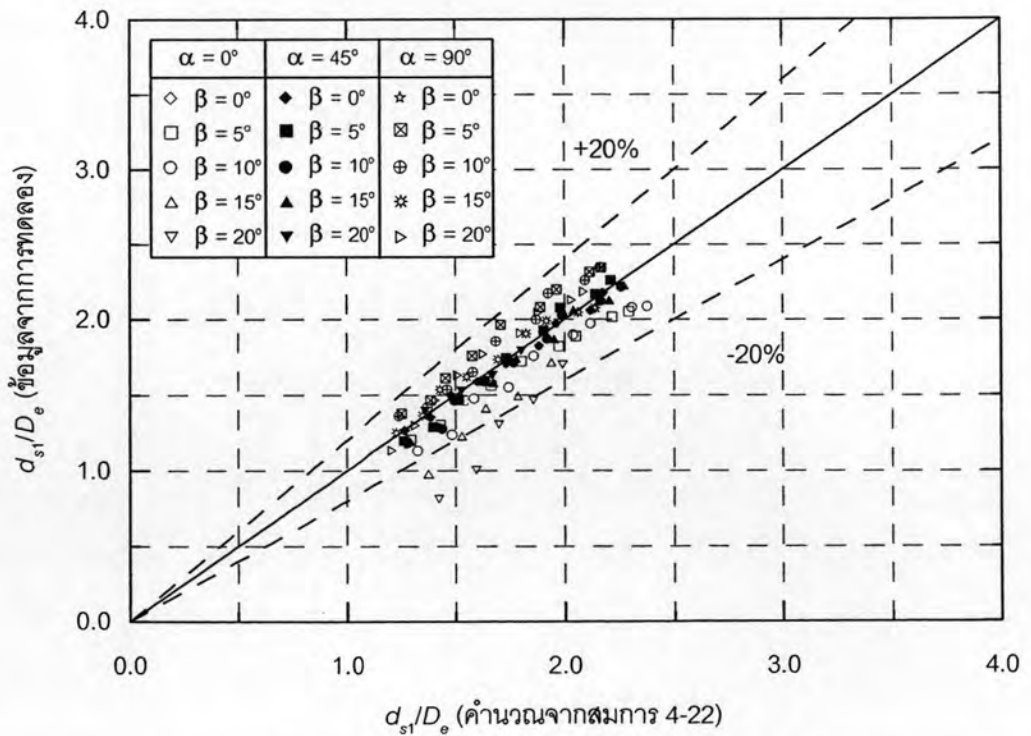
นำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) มาใช้กับข้อมูลความลึกหลุมกัดเซาะจากการทดลอง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (d_{s1}/D_e) กับความลึกการไหลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (y/D_e) ได้ดังรูป 4-39

จากรูป 4-39 จะเห็นได้ว่าการใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) กับข้อมูลความลึกหลุมกัดเซาะจากการทดลองเชิงเสาเข็มต้นที่ 1 ในระนาบการเอียงทิศทางต่างๆ ทำให้พฤติกรรมของหลุมกัดเซาะคล้ายกับเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง ที่มีขนาดเสาเข็มเปลี่ยนไปตามลักษณะมุมเอียงจากแนวตั้งของระนาบการเอียงในทิศทางต่างๆ จากแนวการไหล และรูป 4-40 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (d_{s1}/D_e) ที่ได้จากสมการ 4-22 และที่ได้จากการทดลองเปลี่ยนมุมเอียงในระนาบการเอียงต่างๆ จะเห็นได้ว่าจุดข้อมูลกระจายเกาะกันอยู่รอบเส้น 45° มีความแตกต่างโดยเฉลี่ยประมาณ $\pm 20\%$ ความสัมพันธ์ที่ได้อยู่ในเกณฑ์ดี

สมการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้สามารถใช้ได้ดีในระดับหนึ่ง ซึ่งก็คือ อยู่ในช่วงระนาบการเอียงตามแนวทิศทางการไหล ($\alpha = 0^\circ$) จนถึงการเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ($\alpha = 90^\circ$) เนื่องจากได้รับการสอบเทียบกับข้อมูลการทดลองในครั้งนี้ แต่เนื่องจากแนวคิดในกระบวนการวิเคราะห์ที่ได้นำเอาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางกายภาพของการเอียง ไม่ว่าจะเป็น การเอียงที่ส่งผลต่อขนาดของเสา (ความกว้างฉายเงาในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล) ความสูงของเสา (ความยาวที่สัมผัสผิวน้ำ) และระยะปะทะน้ำของแนวเสาที่เบี่ยงเบนไปจากระนาบแกนฐานเสา อยู่ในรูปตัวแปรบอกขนาดรูปร่างแล้ว จึงคาดว่าสามารถนำเอาสมการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) ที่ได้ไปใช้ในกรณีที่เสาเข็มเอียงจากในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ($\alpha = 90^\circ$) จนถึงการเอียงในระนาบสวนทางกับทิศทางการไหล ($\alpha = 180^\circ$) ได้ด้วย



รูป 4-39 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็มประสิทธิผล กับความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็มประสิทธิผล



รูป 4-40 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็มที่ได้จากสมการ 4-22 และข้อมูลจากการทดลอง