

อิทธิพลของเสาชემิเยงต่อความลึกหลุมกัดเซาะของเสาชემิกลุ่ม



นายพีระ ฉัตรจินตนาพร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF THE INCLINED PILE ON SCOUR DEPTH OF GROUP PILES

Mr.Pheera Chatjintanaporn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Water Resources Engineering

Department of Water Resources Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

511439

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อิทธิพลของเสาเข็มเอียงต่อความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มกลุ่ม

โดย

นายพีระ ฉัตรจินตนาพร


สาขาวิชา

วิศวกรรมแหล่งน้ำ

อาจารย์ที่ปรึกษา


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธำ

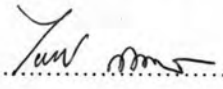
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

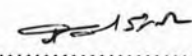

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนिरองศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธำ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพฑูรย์ กิติสุนทร)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รักรวิชัย)

พีระ จัตรีจินตนาพร : อิทธิพลของเสาเข็มเอียงต่อความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มกลุ่ม.
(EFFECTS OF THE INCLINED PILE ON SCOUR DEPTH OF GROUP PILES)

อ. ที่ปรึกษา: ผศ.ดร.เสรี จันทรโยธา, 201 หน้า.

การศึกษานี้ เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการ เพื่อพิจารณาถึงผลการเอียงของเสาเข็มในกลุ่มเสาเข็มที่มีต่อความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มแต่ละต้นในกลุ่มเสาเข็ม เมื่อมีการเอียงของเสาเข็มต้นหน้าทำมุมจากแนวตั้งในระนาบการเอียงต่างๆ จำนวน 4 มุมคือ 5° , 10° , 15° และ 20° ใน 3 ระนาบการเอียงคือ ระนาบตามทิศทางการไหล ระนาบทแยงกับทิศทางการไหล และระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ทดลองภายใต้สภาวะการไหลที่น้ำไม่มีตะกอนปน เป็นการไหลแบบไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา และมีสภาวะการไหลแบบต่ำกว่าวิกฤติ วัสดุท้องน้ำเป็นทรายละเอียดขนาดสม่ำเสมอเฉลี่ยประมาณ 0.27 มม. แบบจำลองต่อม่อที่ใช้มีรูปแบบเป็นเสาเข็มกลุ่มแบบ 2 ต้น และ 3 ต้น จัดวางใน 2 ลักษณะ คือ กลุ่มเสาเข็ม 2 ต้น วางเรียงตามแนวการไหลต่อกัน และกลุ่มเสาเข็ม 3 ต้น มีการจัดวางเป็นลักษณะสามเหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งมีเสาเข็มต้นหน้าที่เอียงเป็นยอดสามเหลี่ยม มีระยะห่างระหว่างเสาที่เรียงตามแนวการไหลและตามแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลเป็น 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การเอียงของเสาเข็มในระนาบต่างๆ นั้นมีนัยของการเปลี่ยนแปลงขนาดหลุมกัดเซาะ โดยการเอียงเสาเข็มในระนาบการเอียงตามทิศทางการไหลมีแนวโน้มต่อการลดลงของความลึกหลุมกัดเซาะตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น และการเอียงของเสาเข็มในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความลึกหลุมกัดเซาะ ส่วนการเอียงของเสาเข็มในระนาบการเอียงทแยงกับทิศทางการไหล การเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะมีน้อยมาก เมื่อเทียบกับขนาดความลึกของหลุมกัดเซาะกรณีเสาตั้งตรง นอกจากนี้ ในการศึกษาได้เสนอสมการในการพิจารณาขนาดของหลุมกัดเซาะจากผลการเอียงในระนาบต่างๆ ของเสาเข็มต้นหน้า ในรูปของเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลของเสาเข็มที่ตั้งตรง และจากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมการที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลการทดลอง พบว่า มีความสอดคล้องและไปด้วยกันได้ดี

ภาควิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2551.....

4870406521 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING



KEY WORD: PIER SCOUR / INCLINED PILE / HYDRAULIC MODEL / PILE GROUPS / SCOUR

PHEERA CHATJINTANAPORN : EFFECTS OF THE INCLINED PILE ON SCOUR DEPTH OF GROUP PILES. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.SEREE CHANYOTHA, 201 pp.

This experimental study aims at the investigation of the effects of the inclination of the front pile of pile groups on the maximum scour depth around group piles. Four different pile inclination angles of 5°, 10°, 15° and 20° in the combination of three different horizontal inclination planes, consisting of the planes parallel to, diagonal to, and perpendicular to the flow direction, respectively were tested. In the study, uniform sediment with the mean particle size of 0.27 mm was used as channel bed material. The experiments were carried out under steady and subcritical flow, and under clear-water scour conditions. A 2-pile group arranged in tandem and a 3-pile group arranged in a right-angle triangle with the side-by-side and tandem pile spacing 2-times pile diameter were used.

The experiment results showed the significant pile inclination effects on the pile scour depth. It has been found that the maximum scour depth decreased as the inclined angle increased for the plane parallel to the flow. For the inclination plane perpendicular to the flow direction, the maximum scour depth tended to increase as the inclined angle increased. However, for the inclination plane diagonal to the flow direction the maximum scour depth was apparently unchanged, comparing to the scour depth of the vertical pile group. Additionally, the experiment result presents an equation for determining the effective diameter to predict the maximum scour depth of the inclined pile. The presented equation describes the observation data fairly good.

Department.....WATER RESOURCES ENGINEERING.....
Field of study.....WATER RESOURCES ENGINEERING.....
Academic year2008.....

Student's signature.....
Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ท่านรองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล ท่านรองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รักรวิชัย ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพฑูรย์ กิติสุนทร ที่ได้กรุณาสละเวลาในการให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทรโยธา ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ ทั้งในด้านหลักวิชาการและหลักการปฏิบัติ ตลอดถึงปรัชญาการใช้ชีวิตอันเป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้าอย่างเอาใจใส่มาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ทั้งนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา และอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาการศึกษา

ข้าพเจ้าขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนบางส่วนเพื่อใช้ในการทำวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนในเรื่องสถานที่ เครื่องมือในการทดลอง รวมทั้งสาธารณูปโภคต่างๆ รวมทั้งขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และชายฝั่งทะเลทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกต่างๆ เป็นอย่างดียิ่งขณะทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณฉนิภัทร เชื้อจักร ผู้ช่วยพิมพ์วิทยานิพนธ์ และช่วยให้กำลังใจอย่างดีเสมอมา ขอขอบคุณ คุณเมธาฤทธิ์ แนมสัย ที่ช่วยเหลือในการจัดทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี ตลอดจนถึง พี่ เพื่อน น้องและบุคคลท่านอื่นๆ ที่มีได้กล่าวนาม ณ ที่นี้ซึ่งได้มีส่วนให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานด้านต่างๆ และคอยเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้าในขณะที่ทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าผู้ซึ่งให้ความรัก ความเอาใจใส่ รวมทั้งอดทนต่อความเหน็ดเหนื่อย เพื่อให้การสนับสนุนการศึกษาแก่ข้าพเจ้าตลอดมา รวมทั้งเป็นที่ยึดเหนี่ยวและแรงบันดาลใจในการนำไปสู่ความสำเร็จทั้งหมดในชีวิตของข้าพเจ้า ประโยชน์ที่ก่อให้เกิดกุศลอันใดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ หากพึงมี ข้าพเจ้าใคร่ขอมอบอุทิศให้แก่ พ่อ แม่ ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทั้งหลาย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบข่ายการศึกษา.....	3
1.4 การดำเนินงานศึกษา.....	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	6
บทที่ 2 แนวทางการศึกษาและหลักการ.....	7
2.1 การศึกษาที่ผ่านมา.....	7
2.2 กลศาสตร์การกัดเซาะและการกัดเซาะเฉพาะแห่ง.....	10
2.3 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ.....	16
2.4 แบบจำลองชลศาสตร์.....	18
บทที่ 3 การทดลองและผลการทดลอง.....	24
3.1 อุปกรณ์วัดและเก็บบันทึกข้อมูลการทดลอง.....	24
3.2 การออกแบบการทดลอง.....	25
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	27
3.4 ผลการทดลอง.....	33
3.5 พฤติกรรมและกลไกการกัดเซาะ.....	44
3.6 ผลการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มเอียง.....	47

	๗
	หน้า
บทที่ 4 การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์.....	51
4.1 ความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้น และ 3 ต้นที่ตั้งตรง.....	52
4.2 ผลของมุมเอียงเสาเข็มกับความลึกหลุมกัดเซาะ.....	64
4.3 ผลของมุมเอียงเสาเข็มที่มีต่อเสาเข็มต้นถัดไป.....	77
4.4 การวิเคราะห์ผลของมุมเอียงร่วมกับระนาบการเอียงเสาเข็มต่อความลึกหลุม กัดเซาะ.....	100
4.5 เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) กับสมการประมาณค่าความลึกหลุมกัด เซาะ.....	113
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	116
5.1 สรุปและวิจารณ์ผล.....	116
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	134
รายการอ้างอิง.....	136
ภาคผนวก.....	
ภาคผนวก ก แบบจำลองชลศาสตร์การกัดเซาะรอบเสาเข็มเอียง.....	140
ภาคผนวก ข การหาค่าเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลอง.....	153
ภาคผนวก ค การหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล.....	161
ภาคผนวก ง ภาพถ่ายผลการศึกษาในกรณีศึกษาต่างๆ.....	168
ภาคผนวก จ สรุปผลการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับปัญหาการกัดเซาะรอบโครงสร้าง ฐานรากของอาคารชลศาสตร์.....	175
ภาคผนวก ช สรุปสัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	199
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	201

สารบัญตาราง

ณ

หน้า

ตาราง 3-1 แบบจำลองที่จะใช้ทุกกรณีศึกษา จำนวน 15 ตัว.....	25
ตาราง 3-2 กรณีการทดลองที่ทำการศึกษา จำนวน 15 กรณี 168 การทดลอง.....	29
ตาราง 3-3 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง กรณี Q8A1.....	31
ตาราง 3-4 เวลาการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงการกัดเซาะสูงสุด ในแต่ละกรณีศึกษา.....	36
ตาราง 3-5 เงื่อนไขและผลการทดลอง (กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบตามแนวการไหล, $\alpha=0^\circ$)..	38
ตาราง 3-6 เงื่อนไขและผลการทดลอง (กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบตามแนวการไหล, $\alpha=45^\circ$)	40
ตาราง 3-7 เงื่อนไขและผลการทดลอง (กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบตามแนวการไหล, $\alpha=90^\circ$)	42
ตาราง 4-1 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดกับ ข้อมูลการทดลองของมุมเอียงต่างๆ ในระนาบตามแนวการไหล ($\alpha = 0^\circ$).....	55
ตาราง 4-2 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดกับ ข้อมูลการทดลองของมุมเอียงต่างๆ ในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล ($\alpha =$ 45°).....	57
ตาราง 4-3 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดกับ ข้อมูลการทดลองของมุมเอียงต่างๆ ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ($\alpha =$ 90°).....	59
ตาราง 4-4 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ของมุมเอียงต่างๆ ($\alpha = 0^\circ$).....	65
ตาราง 4-5 ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 (K_{β_1}) ในระนาบเอียงตามแนวการ ไหล ($\alpha = 0^\circ$).....	66
ตาราง 4-6 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ของมุมเอียงต่างๆ ($\alpha = 45^\circ$).....	69
ตาราง 4-7 ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 (K_{β_2}) ในระนาบทแยงกับแนวการ ไหล ($\alpha = 45^\circ$).....	70
ตาราง 4-8 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ของมุมเอียงต่างๆ ($\alpha = 90^\circ$).....	73
ตาราง 4-9 ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 (K_{β_3}) ในระนาบตั้งฉากกับการ ไหล ($\alpha = 90^\circ$).....	74
ตาราง 4-10 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ของเสาเข็มต้นที่ 2 ($\alpha = 0^\circ$).....	78
ตาราง 4-11 การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ($\alpha = 0^\circ$).....	80
ตาราง 4-12 ความแตกต่างระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 กับเสาเข็มต้นที่ 2 ($\alpha = 0^\circ$).....	80
ตาราง 4-13 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ของเสาเข็มต้นที่ 2 ($\alpha = 45^\circ$)	83

ตาราง 4-14 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ของเสาเข็มต้นที่ 3 ($\alpha = 45^\circ$).....	83
ตาราง 4-15 การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ($\alpha = 45^\circ$).....	87
ตาราง 4-16 การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ($\alpha = 45^\circ$).....	88
ตาราง 4-17 ความแตกต่างระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 กับเสาเข็มต้นที่ 2 ($\alpha = 45^\circ$).....	89
ตาราง 4-18 ความแตกต่างระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 กับเสาเข็มต้นที่ 3 ($\alpha = 45^\circ$).....	90
ตาราง 4-19 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ของเสาเข็มต้นที่ 2 ($\alpha = 90^\circ$).....	91
ตาราง 4-20 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังในสมการ 4-3 ของเสาเข็มต้นที่ 3 ($\alpha = 90^\circ$).....	92
ตาราง 4-21 การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ($\alpha = 90^\circ$).....	96
ตาราง 4-22 การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ($\alpha = 90^\circ$).....	97
ตาราง 4-23 ความแตกต่างระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 กับเสาเข็มต้นที่ 2 ($\alpha = 90^\circ$).....	98
ตาราง 4-24 ความแตกต่างระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 กับเสาเข็มต้นที่ 3 ($\alpha = 90^\circ$).....	99

สารบัญรูป

๗

	หน้า
รูป 2-1 การพัดพาตะกอนเข้าและออกจากหลุมกัดเซาะ.....	13
รูป 2-2 ความลึกหลุมกัดเซาะสำหรับขนาดตอม่อและขนาดวัสดุท้องน้ำคงที่.....	13
รูป 2-3 การไหลผ่านตอม่อสะพานและกระบวนการกัดเซาะ.....	15
รูป 2-4 ความสัมพันธ์ของ Entrainment Function กับ Reynolds Number ตามที่ Shields ได้ทำการศึกษาไว้ โดย Raudkivi และ Sutherland (1981).....	15
รูป 2-5 รายละเอียดแบบจำลองชลศาสตร์กระแสน้ำ.....	20
รูป 2-6 รางน้ำเปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume).....	21
รูป 2-7 แบบจำลองเสาเข็มกลุ่ม.....	22
รูป 2-8 ตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง.....	23
รูป 3-1 แผนผังขั้นตอนการทดลอง.....	32
รูป 3-2 กลไกการกัดเซาะเนื่องจากมุมเอียงของเสาเข็มในระนาบการเอียงต่างๆ.....	48
รูป 3-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่เอียงต่อความลึกการไหลกับมุมเอียงของเสาเข็ม.....	50
รูป 3-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่เอียงต่อความลึกการไหล กับ ระนาบการเอียงของเสาเข็ม.....	50
รูป 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม กับ ความลึกการไหล ต่อขนาดเสาเข็ม ของเสาต้นที่ 1 และต้นที่ 2 แยกตามมุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเอียงในระนาบตามทิศทางการไหล.....	54
รูป 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม กับ ความลึกการไหล ต่อขนาดเสาเข็ม ของเสาต้นที่ 1 ต้นที่ 2 และต้นที่ 3 แยกตามมุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเอียงในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล.....	56
รูป 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม กับ ความลึกการไหล ต่อขนาดเสาเข็ม ของเสาต้นที่ 1 ต้นที่ 2 และต้นที่ 3 แยกตามมุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล.....	58
รูป 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็มกับ ความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม กรณีเสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น และ 3 ต้น.....	63
รูป 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็มกับ ความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม เมื่อแยกตามมุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเอียงใน	

ระนาบตามแนวทิศทางการไหล.....	67
รูป 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็มกับ ความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม เมื่อรวมทุกมุมอยู่ในรูปเดียวกัน.....	68
รูป 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ K_{β_1} กับมุมเอียงเสาเข็มในกรณีเสาเข็มเอียงใน ระนาบเดียวกับทิศทางการไหล.....	68
รูป 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็มกับ ความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม เมื่อแยกตามมุมเอียงเสาเข็ม กรณีเอียงในระนาบ ทแยงกับทิศทางการไหล.....	71
รูป 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็มกับ ความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม เมื่อรวมทุกมุมอยู่ในรูปเดียวกัน.....	72
รูป 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ K_{β_1} กับมุมเอียงเสาเข็ม ในกรณีเสาเข็มเอียงใน ระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล.....	72
รูป 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็ม กับความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม เมื่อแยกตามมุมเอียงเสาเข็ม กรณีเอียงใน ระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล.....	75
รูป 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็ม กับความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม เมื่อรวมทุกมุมอยู่ในรูปเดียวกัน.....	76
รูป 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ K_{β_3} กับมุมเอียงเสาเข็ม ในกรณีเสาเข็มเอียงใน ระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล.....	76
รูป 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม กับ ความลึกการไหล ต่อขนาดเสาเข็ม เมื่อแยกตามมุมเอียงเสาเข็ม กรณีเอียงในระนาบตามทิศทางการ ไหล.....	79
รูป 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ต่อขนาดเสาเข็ม กับความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม เมื่อรวมทุกมุมเอียงอยู่ในรูปเดียวกัน.....	80
รูป 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียง ทำมุมต่างๆ ต่อความลึกกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรงกับ มุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบเดียวกับแนวการไหล.....	81

รูป 4-28 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียง ทำมุมต่างๆ ต่อความลึกกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรงกับ มุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล..	96
รูป 4-29 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 3 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียง ทำมุมต่างๆ ต่อความลึกกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 3 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรงกับ มุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล..	97
รูป 4-30 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต้นที่ 2 ต่อความลึกหลุมกัดเซาะต้นที่ 1 กับมุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเอียงตั้งฉากกับทิศทางการไหล.....	98
รูป 4-31 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต้นที่ 3 ต่อความลึกหลุมกัดเซาะต้นที่ 1 กับมุมเอียงของเสาเข็ม กรณีเอียงตั้งฉากกับทิศทางการไหล.....	99
รูป 4-32 ตัวแปรบอกขนาดของความกว้างฉายเงา (projected width) ของเสาเข็มในระนาบ ระดับ (horizontal plane) ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล.....	105
รูป 4-33 ตัวแปรบอกมิติความยาวในแนวเดียวกับทิศทางการไหล (l) และความยาวใน แนวตั้งฉากกับทิศทางการไหล (w).....	105
รูป 4-34 ขั้นตอนการเปลี่ยนรูปร่างการเอียงของเสาเข็มให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เทียบเท่าเสาเข็มตั้งตรง.....	108
รูป 4-35 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_o) ที่ได้จากสมการ 4-21 และที่ ได้จากการทดลอง กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบเดียวกับการไหล ($\alpha = 0^\circ$).....	109
รูป 4-36 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_o) ที่ได้จากสมการ 4-21 และที่ ได้จากการทดลอง กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบทแยงกับการไหล ($\alpha = 45^\circ$).....	110
รูป 4-37 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_o) ที่ได้จากสมการ 4-21 และที่ ได้จากการทดลอง กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบตั้งฉากกับการไหล ($\alpha = 90^\circ$).....	111
รูป 4-38 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_o) ที่ได้จากสมการ 4-21 และที่ ได้จากการทดลอง เมื่อรวมทุกระนาบการเอียงอยู่ในรูปเดียวกัน.....	112
รูป 4-39 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็มประสิทธิผลกับความ ลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็มประสิทธิผล.....	115
รูป 4-40 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็มที่ได้จากสมการ 4-22 และข้อมูล จากการทดลอง.....	115