สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปและวิจารณ์ผล

การศึกษานี้ได้มุ่งเน้นถึงการหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง (β) ในระนาบการเอียงจากแนวการไหล (α) ที่มีต่อความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มเอียงและเสาเข็มตั้งตรงต้นข้างเคียงที่ถัดไปจากเสาเข็มเอียง โดยอาศัยแบบจำลองทางกายภาพรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการศึกษา

การทดลองจะปรับเปลี่ยนการเอียงเฉพาะเสาเข็มต้นหน้าในกลุ่มเข็มทั้งหมด 3 ต้น ในระนาบการเอียงของเสาเข็ม 3 ระนาบ คือ การเอียงในระนาบตามทิศทางการไหล ($\alpha = 0°$) ระนาบทแยงทำมุม 45° กับทิศทางการไหล ($\alpha = 45°$) และระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ($\alpha = 90°$) มุมของเสาเข็มที่เอียงในแต่ละระนาบประกอบด้วยมุมเอียงจากแนวดิ่ง (β) จำนวน 4 มุม คือ 5°, 10°, 15° และ 20° ตามลำดับ ใช้ทรายละเอียดขนาดสม่ำเสมอมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (d_{50}) ประมาณ 0.27 มม. ทดลองร่วมกับอัตราการไหลจำนวน 12 อัตราการไหล รวมการทดลองทั้งสิ้น 168 การทดลอง โดยใช้เวลาในการทดลองต่อเนื่องทั้งสิ้นประมาณ 2872 ชั่วโมง เวลาเฉลี่ยแต่ละการทดลองประมาณ 17 ชั่วโมง

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากผลการทดลอง จะแยกออกเป็นประเด็นหลัก 5 ประเด็น โดยสรุปและวิจารณ์ผลแต่ละประเด็นตามผลการวิเคราะห์ควบคู่กับการพิจารณาพฤติกรรมและกลไกการกัดเซาะจากลักษณะทางกายภาพจริง ที่ได้จากการเฝ้าสังเกตและติดตามผลผ่านทางกล้องบันทึกภาพเคลื่อนไหวแบบดิจิตอล เพื่อใช้ประกอบการอธิบายความเป็นไปที่เกิดขึ้นกับผลการวิเคราะห์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.1.1 ความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้น และ 3 ต้นตั้งตรง

จากผลการวิเคราะห์ตัวแปรการไหลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะ โดยใช้แบบจำลองเสาเข็ม 2 ต้นและเสาเข็ม 3 ต้น ที่ตั้งตรง เพื่อตัดตัวแปรการเอียงซึ่งเป็นตัวแปรทางกายภาพของเสาเข็มออก ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของค่าความลึกหลุมกัดเซาะ (d_s) กับค่าความลึกการไหล (y) ที่เปลี่ยนไปในแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ความลึกหลุมกัดเซาะ (d_s) เพิ่มขึ้นตามความลึกการไหล (y) โดยความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงตาม

ความลึกการไหลที่เพิ่มขึ้น ($d_s \propto y^{0.65}$) จากผลการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องเป็นไปในทางเดียวกันกับผลการศึกษาที่ผ่านมา (ค่ายกกำลังของ y อยู่ระหว่าง 0.22 ถึง 1.0) อนึ่ง ในการศึกษานี้ได้พยายามคงค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหล (Fr) ให้เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ($Fr \approx 0.15$) จึงได้ละผลของตัวแปรดังกล่าว อย่างไรก็ตามความแตกต่างของค่ายกกำลังที่อยู่ในค่าความลึกการไหล (y) อาจมาจากการทดลองบนเงื่อนไขที่แตกต่างกัน (different experimental conditions) ซึ่งจากขนาดความลึกหลุมกัดเซาะ (d_s) ขึ้นกับขนาดเสา (D) และตัวแปรการไหล (y) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ในรูปของตัวแปรไร้มิติ ระหว่างค่าอัตราส่วนความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม (d_s/D) ที่ขึ้นกับค่าอัตราส่วนความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) โดยมีสมการความสัมพันธ์ในรูป $(d_s/D) = a(y/D)^b$ มีค่าเลขยกกำลัง (b) ของสมการความสัมพันธ์เฉลี่ยประมาณ 0.65 ทุกกรณีการทดลอง

เนื่องจากการทดลองใช้แบบจำลองที่มีความแตกต่างในเรื่องจำนวนเสาเข็มที่จะได้รับอิทธิพลของการเอียงในเสาเข็มต้นหน้า ในระนาบการเอียงที่ต่างกัน ทำให้การทดลองในกรณีเสาเข็มตั้งตรงมีสมการที่จะใช้เป็นกรณีเปรียบเทียบกับการเอียงในกรณีต่างๆ อยู่ 2 สมการ คือ สมการสำหรับเสาเข็มต้นที่ 1 กรณีเสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น ใช้เปรียบเทียบในกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงในระนาบแนวเดียวกับทิศทางการไหล ($\alpha = 0°$) และสมการสำหรับเสาเข็มต้นที่ 1 กรณีเสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น ใช้เปรียบเทียบในกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล ($\alpha = 45°$) และใช้เปรียบเทียบการเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ($\alpha = 90°$)

ซึ่งความสัมพันธ์ที่อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติดังกล่าว จะมีลักษณะความสัมพันธ์ในรูปแบบเดียวกัน คือ $(d_s/D) = a(y/D)^b$ โดยมีเลขยกกำลัง (b) ที่เท่ากันโดยประมาณ ทั้งในกรณีเสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น และเสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น ($b \approx 0.55$) ต่างกันเพียงค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (a) ซึ่งในสมการของเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรงกรณีใช้เสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น จะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่มากกว่ากรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรงกรณีใช้เสาเข็ม 2 ต้น ความแตกต่างดังกล่าวมาจากผลของเสาเข็มที่มีลักษณะเป็นกลุ่มที่ส่งผลต่อกันและกันในกลุ่มเข็ม ทำให้กรณีการใช้เสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น ได้รับผลจากความเป็นกลุ่มที่มากกว่า ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณที่มากกว่าในกรณีใช้เสาเข็ม 2 ต้น ตั้งตรงอยู่ประมาณ 3% แต่เนื่องจากนัยของความแตกต่างนั้นน้อยมากจึงทำให้ไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่า ความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นหน้าของกลุ่มเสาเข็ม 2 ต้น และ 3 ต้น มีความแตกต่างกันจากผลของลักษณะกลุ่มที่แตกต่างกัน และเมื่อดูจากกราฟความสัมพันธ์รูป 4-5 จะเห็นถึงชุดข้อมูลค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s1}/D) ทั้งในกรณีที่มีเสาเข็ม 2 ต้น และ 3 ต้น จะเกาะกลุ่มอยู่ใกล้กันเป็นส่วนมาก

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม (d_s/D) ที่ขึ้นกับค่าอัตราส่วนความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) ในเสาเข็มต้นถัดไปในกลุ่มเข็มคือเสาเข็มต้นที่ 2 และเสาเข็มต้นที่ 3 พบว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะผันแปรตามค่าความลึกการไหลเช่นเดียวกัน มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงกับค่าความลึกการไหลแบบเดียวกันกับเสาเข็มต้นที่ 1 คือ ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงตามขนาดเสาและความลึกการไหลที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเสาเข็มต้นที่ 2 ทั้งในกรณีใช้เสาเข็ม 2 ต้น และ 3 ต้นทดลอง จะมีค่าน้อยกว่าเสาเข็มต้นที่ 1 ประมาณ 20% ทั้ง 2 กรณี ส่วนเสาเข็มต้นที่ 3 ซึ่งมีเฉพาะกรณีใช้เสาเข็ม 3 ต้นในการทดลอง ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะขึ้นกับตัวแปรความลึกการไหลเช่นเดียวกัน โดยที่ค่าความลึกการไหลเท่ากัน จะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม (d_s/D) เท่ากับกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ในกรณีใช้สาเข็ม 3 ต้นตั้งตรง

5.1.2 <u>ผลของมุมเอียงเสาเข็มกับความลึกหลุมกัดเซาะ</u>

จากการวิเคราะห์ผลโดยแยกตามระนาบการเอียงของเสาเข็ม 3 ระนาบ บ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่เอียงที่แตกต่างกัน ในระนาบการเอียงตามทิศทางการไหล (α = 0°) ระนาบทแยงทำมุม 45° กับทิศทางการไหล (α = 45°) และระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล (α = 90°) ตามการสรุปผลที่ได้จากการแยกพิจารณาดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะ (d_s) กับขนาดเสา (D) และความลึกการไหล (y) เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับความสัมพันธ์ของเสาตั้งตรง คือ $(d_s/D) = a(y/D)^b$ โดยมีค่ายกกำลัง (b) ประมาณ 0.55 เท่ากัน แต่เมื่อพิจารณาค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็มที่มุมเอียงต่างๆ ในระนาบการเอียงแนวเดียวกับทิศทางการไหล เปรียบเทียบกับความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็มที่ตั้งตรง พบว่ามีแนวโน้มที่ลดลงในอัตราที่ใกล้เคียงกันตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น หรือกล่าวคือ เมื่อมุมเอียงจากแกนดิ่งของเสาต้นที่ 1 เพิ่มขึ้นที่ละ 5 องศา จะมีอัตราการลดลงของค่าความลึกหลุมกัดเซาะเฉลี่ย 6.5% โดยประมาณ โดยที่เสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมกับแนวดิ่งในระนาบเดียวกับทิศทางการไหล 5°, 10°, 15° และ 20° ส่งผลให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะลดลงประมาณ 6%, 10%, 18% และ 26% ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะ (d_s) กับมุมเอียง (β) ในระนาบการเอียงนี้มีแนวโน้มการลดลงของความลึกหลุมกัดเซาะเป็นสัดส่วนโดยตรงตามขนาดของมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น ($d_s \propto \beta$)

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะกับมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ในระนาบเดียวกับทิศทางการไหลมีความสัมพันธ์ในลักษณะลดลงตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น นั้นน่าจะเป็นผล

จากการเอียงของเสาในระนาบตามทิศทางการไหลทำให้ผิวเสาเข็มด้านหน้าที่ปะทะน้ำหรือด้านต้นน้ำมีความลาดตามมุมเอียง ทำให้ความรุนแรงของการไหลพุ่งลงสู่ฐานเสาเข็มด้านล่าง ของกระแสน้ำที่ไหลเข้าปะทะกับผิวเสาเข็มลดลง เป็นเหตุให้การไหลม้วนวนรูปเกือกม้ามีกำลังอ่อนลง ยังผลให้ความสามารถในการกัดเซาะรอบฐานเสาเข็มลดลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เสาเข็มที่เอียงในระนาบตามทิศทางการไหลทำให้เกิดความลาดชันของผิวเสาเข็มด้านต้นน้ำ ถ้าหากเสาเข็มมีผิวด้านต้นน้ำลาดชันน้อยความรุนแรงของการไหลพุ่งลงด้านล่างสู่ฐานเสาเข็ม เนื่องจากการเข้าปะทะของกระแสน้ำจะมีน้อยกว่าผิวเสาเข็มที่มีความลาดชันมาก จึงกล่าวได้ว่ามุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ตามแนวทิศทางการไหลจะส่งผลต่อการลดลงของค่าความลึกหลุมกัดเซาะอย่างมีนัยสำคัญ

2) จากผลการพิจารณาการเปลี่ยนมุมเอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล ในหัวข้อ 4.2.2 ในเบื้องต้นจะได้ถึงความสัมพันธ์ของค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s1}/D) ของแต่ละมุมเอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล จะขึ้นกับค่าอัตราส่วนระหว่างความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) เช่นเดียวกับกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง พบว่า ค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s1}/D) จะมีความแตกต่างไปจากกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง ในลักษณะลดลงเรื่อยๆ ตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้นของเสาต้นที่ 1 ซึ่งเกิดจากลักษณะทางกายภาพของเสาเข็มถูกปรับเปลี่ยนไปจากเสาตรง ยังผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (a) ในสมการกำหนดความสัมพันธ์ของแต่ละมุมเอียงมีค่าแตกต่างกัน แต่มีค่าเลขยกกำลัง (b) เท่ากัน

เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s1}/D) กับความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) ของมุมเอียงในแนวดิ่งในระนาบการเอียงทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล พบว่า เมื่อเสาเข็มเอียงทำมุม 5° และ 10° ขนาดความลึกหลุมกัดเซาะไม่ได้มีนัยความแตกต่างจากค่าความลึกของหลุมกัดเซาะในเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรงอย่างชัดเจน มีค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงในทางที่ลดลงของหลุมกัดเซาะประมาณ 2% ส่วนมุมเอียงของเสาเพิ่มเป็น 15° และ 20° ความลึกหลุมกัดเซาะจะลดลงจากเสาตั้งตรงประมาณ 6% และ 9% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของหลุมกัดเซาะในทางลดลงของความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกหลุมกัดเซาะกับขนาดของมุมเอียง (β) ในระนาบการเอียงทแยงนี้ในปริมาณและอัตราที่น้อยมาก

สรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของเสาเข็มเอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงในอัตราที่น้อยมาก และไม่ชัดเจน

เพียงพอต่อการสรุปผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นดังกล่าวได้ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณของแต่ละมุมเอียงเทียบกับเสาตั้งตรงกรณีใช้เสา 3 ต้น มีค่าไม่ต่างกันมากนัก ดังผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.2.2 อีกทั้งข้อมูลจากการทดลอง ให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะในแต่ละมุมเอียงเกาะกลุ่มกับค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาตั้งตรง ซึ่งไม่เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน บ่งชี้ถึงความไม่ชัดเจนของอิทธิพลหรือผลการเอียงของเสาเข็มในระนาบนี้ต่อการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะ ซึ่งอาจดูเหมือนขัดกับลักษณะทางกายภาพของเสาเข็มที่ถูกปรับเปลี่ยนให้ต่างไปจากกรณีตั้งตรง แต่ค่าความลึกหลุมกัดเซาะดูเหมือนไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนตามมุมเอียงที่เปลี่ยนไป เหมือนกรณีการเอียงในระนาบทิศทางการไหล ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอาจอธิบายตามลักษณะทางกายภาพที่เกิดจากระนาบการเอียงของเสาเข็มทำมุมทแยง 45° กับทิศทางการไหล ที่อาจจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเสาเข็มในทางเพิ่มและลดขนาดหลุมกัดเซาะในความรุนแรงที่ใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน ทำให้เกิดการหักล้างกันของผลทางด้านเพิ่มและลด จนปรากฏดูเหมือนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ลักษณะแรกการเอียงในระนาบนี้จะเพิ่มความกว้างของเสาเข็มในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหลตามมุมเอียงในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น เปรียบเสมือนความกว้างของเสาเข็มที่กีดขวางการไหลใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดปัจจัยหนุนในการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะให้มีมากขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะทางกายภาพของเสาเข็มในทางเพิ่ม แต่ทั้งนี้ในอีกลักษณะของระนาบการเอียงนี้ยังทำให้เกิดความลาดชันของเสาเข็มทางด้านต้นน้ำ และหากเสายิ่งเอียงทำมุมมากเท่าไหร่ เสาส่วนบนจากฐานจะห่างออกจากแกนดิ่งที่ลากผ่านฐานเสาเข็มที่เป็นบริเวณเกิดการกัดเซาะมากเท่านั้น ส่งผลต่อกระแสน้ำบางส่วนที่ไหลเข้าปะทะจะมีกำลังลดลง รวมทั้งไม่เอื้อต่อกระบวนการที่ทำให้เกิดกลไกการกัดเซาะที่ยังผลไปสู่บริเวณฐานเสาเข็มที่เอียง ทำให้เกิดปัจจัยของการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะในแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งเป็นลักษณะทางกายภาพของเสาเข็มในทางลด ทั้งสองลักษณะที่เกิดจากลักษณะทางกายภาพของการเอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหลมีความเป็นไปได้ที่จะเกื้อหนุน เพื่อปรับเปลี่ยนกระบวนการเคลื่อนย้ายของตะกอนบริเวณรอบเสาเข็มเอียงให้มีความสมดุล ซึ่งปัจจัยที่ลดลงน่าจะส่งผลมากกว่าปัจจัยที่เพิ่มขึ้น จนทำให้ได้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่ลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ หรือไม่ปรากฏความแตกต่างของขนาดหลุมกัดเซาะจากกรณีเสาเข็มตั้งตรง เมื่อเปลี่ยนมุมเอียงจากแนวดิ่ง (β) ของเสาเข็มต้นที่ 1

3) ผลการเอียงของเสาเข็มในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.2.3 เช่นเดียวกันกับกรณีเสาเอียงในระนาบตามทิศทางการไหล และเอียงในระนาบทแยงมุม 45°

กับทิศทางการไหล จะได้ถึงความสัมพันธ์ของแต่ละมุมเอียงในระนาบการเอียงนี้ มีค่าความลึกหลุมกัดเซาะ (d_s) กับค่าความลึกการไหล (y) และขนาดของเสาเข็ม (D) ที่อยู่ในรูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ที่เปลี่ยนไปในแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันกับความสัมพันธ์ของเสาเข็มตั้งตรง ต่างกันเพียงค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (a) โดยมีค่าเลขยกกำลัง (b) ประมาณ 0.55 ที่เท่ากัน ความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (a) ที่เกิดขึ้นจากการปรับมุมเอียงของเสาต้นที่ 1 จะเป็นไปในลักษณะที่มากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรง บ่งบอกถึงการปรับมุมเอียงของเสาต้นที่ 1 ในระนาบการเอียงนี้ ก่อให้เกิดขนาดความลึกหลุมกัดเซาะที่เพิ่มขึ้นจากกรณีเสาตั้งตรง

จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกหลุมกัดเซาะตามมุมเอียงที่เปลี่ยนไป พบว่า มุมเอียงจากแนวดิ่งของเสาเข็ม (β) ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มเอียงให้มีขนาดมากกว่า เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับกรณีเสาเข็มตั้งตรง แต่ไม่สามารถระบุถึงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างการเปลี่ยนมุมเอียงต่างๆ จากแนวดิ่ง (β) กับความลึกหลุมกัดเซาะที่เปลี่ยนแปลงไปได้ เนื่องด้วยการปรับมุมเอียงของเสาเข็มตั้งตรงให้เอียงทำมุม 5° จากแนวดิ่งจะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะมากที่สุดประมาณ 12% และเมื่อมุมเอียงของเสาเข็มถูกปรับให้เอียงมากขึ้นเป็น 10° และ 15° ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะมีขนาดลดลงแต่ยังมีค่ามากกว่ากรณีเสาเข็มตั้งตรงประมาณ 10% และ 3% ตามลำดับ แต่ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะกลับมามีค่ามากกว่าประมาณ 8% เมื่อเสาเข็มเอียง 20° ในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ซึ่งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกหลุมกัดเซาะที่ไม่เป็นไปในแนวทางเดียวกัน อาจคิดเป็นค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นตัวแทนการเปลี่ยนแปลงของขนาดความลึกหลุมกัดเซาะที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความลึกหลุมกัดเซาะไม่มีความแตกต่างกันมากนักเมื่อเสาเข็มเอียงเพิ่มขึ้นจาก 5° จนถึง 20° โดยมีค่าเฉลี่ยของขนาดความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้นจากกรณีเสาตั้งตรงประมาณ 8%

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าความลึกหลุมกัดเซาะกับมุมเอียงของเสาเข็มในระนาบการเอียงตั้งฉากกับทิศทางการไหล ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะมีการเปลี่ยนแปลงมากในช่วงมุมเอียงของเสาเข็มไม่เกิน 10° และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะน้อยในช่วงมุมเอียงของเสาเข็ม 15° จนถึง 20° เนื่องจากการเอียงในระนาบนี้จะขวางการไหลของน้ำมากกว่าในกรณีการเอียงในระนาบตามแนวการไหล และในระนาบการเอียงทแยง 45° กับทิศทางการไหล อีกทั้งไม่มีความลาดชันของผิวเสาเข็มด้านต้นน้ำที่เกิดจากการเอียงทำมุมกับแกนดิ่งอยู่ในแนวปะทะจากกระแสน้ำ เพราะระนาบการเอียงอยู่ในระนาบเดียวกันที่กระแสน้ำจะไหลเข้าปะทะตั้งฉาก ส่งผลให้ความลึกหลุมกัดเซาะที่เกิดกับระนาบการเอียงนี้มีค่ามากกว่าความลึกหลุมกัดเซาะในกรณีตั้ง

ตรง แต่ทว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะควรที่จะสอดคล้องกับความกว้างของระนาบที่ใช้รับการปะทะจากกระแสน้ำที่เพิ่มขึ้นตามมุมเอียงจากแนวดิ่ง ที่ไม่เป็นเช่นนั้นเนื่องด้วยการเอียงของเสาเข็ม ส่งผลให้ระนาบที่รับการปะทะจากกระแสน้ำเพิ่มขึ้นจริง แต่เมื่อเสาเข็มเอียงมากขึ้นตัวเสาจะเยื้องห่างจากแนวแกนดิ่งเพิ่มขึ้น ทำให้อิทธิพลของการไหลพุ่งลงด้านล่างอยู่ห่างจากหลุมกัดเซาะบริเวณฐานของเสาเข็มมากขึ้นด้วย จนเป็นเหตุให้กลไกการเกิดการม้วนวนรูปเกือกม้าบริเวณผิวด้านหน้ารอบฐานเสาเข็มส่งไปไม่ถึง หรือถ้าส่งถึงน่าจะมีกำลังลดลงจนความสามารถที่จะตะกุยเม็ดวัสดุท้องน้ำรอบฐานเสาเข็มให้มีความลึกจากระดับท้องน้ำเดิมมีน้อย ผลก็คือทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่เสาเข็มเอียงทำมุมจากแนวดิ่ง 15° และ 20° มีค่าต่ำกว่าเสาเข็มที่เอียงทำมุม 5° และ 10°

สรุปแล้วขนาดความลึกหลุมกัดเซาะ (d_s) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียง (β) ของเสาเข็มในระนาบการเอียงตั้งฉากกับทิศทางการไหล แต่แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงไม่เป็นไปในทางเดียวกัน คือ ขนาดหลุมกัดเซาะไม่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยของขนาดความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้นจากกรณีเสาตั้งตรงประมาณ 8%

จากที่กล่าวมาทั้งหมดถึงผลของมุมเอียงเสาเข็มที่มีต่อความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่เอียงในระนาบต่างๆ สามารถสรุปในภาพรวมได้ว่าเสาเข็มที่เอียงในระนาบตามทิศทางการไหล ($\alpha = 0°$) ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะมีแนวโน้มที่ลดลงตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น ส่วนการเอียงในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล ($\alpha = 45°$) ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงในอัตราที่น้อยมาก เสมือนไม่มีการเปลี่ยนแปลงกับมุมเอียงของเสาเข็ม และในระนาบการเอียงตั้งฉากกับทิศทางการไหล ($\alpha = 90°$) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงของเสาเข็มแต่แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงไม่เป็นไปในทางเดียวกัน จึงกล่าวได้ว่าการเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหลจะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะมากกว่าระนาบการเอียงทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล และการเอียงในระนาบแนวเดียวกับทิศทางการไหล ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่มุมเอียงจากแนวดิ่ง (β) มุมเดียวกัน

5.1.3 <u>ผลของมุมเอียงเสาเข็มที่มีต่อเสาเข็มต้นถัดไป</u>

ค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นถัดไปไม่ว่าจะเป็นกรณีของเสาเข็มต้นหน้าตั้งตรงหรือมีการเอียงของเสาเข็มต้นหน้าในระนาบการเอียงต่างๆ ล้วนต่างมีความผันแปรกับค่าความลึกการไหลในทิศทางเดียวกัน คือ ค่าความลึกหลุมกัดเซาะ (d_s) จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงตามขนาด

เสา (D) และความลึกการไหล (y) ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นถัดไปต่อขนาดเสาเข็ม (d_s/D) กับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) เช่นเดียวกันกับค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มที่ต้นหน้าตั้งตรง หรือเอียงในระนาบต่างๆ ดังที่กล่าวไปแล้ว ถึงอย่างไรในแต่ละระนาบการเอียงของเสาเข็ม ยังมีความแตกต่างของค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นถัดไปหรือต้นข้างเคียงเกิดขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงจากแนวดิ่งในระนาบการเอียงต่างๆ โดยจะแยกกลุ่มตามผลที่เกิดขึ้นในแต่ละระนาบการเอียงดังนี้

1) ในระนาบการเอียงของเสาเข็มตามทิศทางการไหล จะมีเสาเข็มต้นที่ 2 ซึ่งเป็นต้นที่ถัดจากเสาเข็มต้นที่ 1 ที่มีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงอยู่ 1 ต้น ในระยะห่างระหว่างเสาเข็มเป็นสองเท่าของขนาดเสาเข็ม จากสมการกำหนดความสัมพันธ์ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม (d_s/D) กับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) จะเห็นถึงความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (a) ที่กำหนดให้เส้นแนวโน้มของเสาต้นที่ 2 มีค่าความลึกหลุมกัดเซาะน้อยกว่าเสาต้นที่ 1 ซึ่งค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาต้นที่ 2 จะมีค่าน้อยกว่าเสาเข็มต้นที่ 1 อยู่ 22% สำหรับกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง ค่าความแตกต่างระหว่างเสาต้นที่ 1 กับเสาต้นที่ 2 จะลดลงเหลือ 23%, 13% และ 9% เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียง 5°, 10° และ 15° ตามลำดับ ส่วนมุมเอียง 20° เสาเข็มต้นที่ 2 จะมีค่าเท่ากับเสาเข็มต้นที่ 1

ความแตกต่างของขนาดความลึกหลุมกัดเซาะระหว่างเสาต้นที่ 2 ที่น้อยกว่าเสาต้นที่ 1 จะมีค่าสูงเมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรงและที่มุมเอียงจากแนวดิ่ง 5° จากนั้นความแตกต่างจะลดลงเรื่อยๆ ตามมุมอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 จนมามีค่าประมาณเท่ากัน เมื่อเสาต้นที่ 1 เอียง 20°

และเมื่อเปรียบเทียบค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาต้นที่ 2 ในกรณีทีมีเสาต้นที่ 1 เอียงในระนาบตามทิศทางการไหล เทียบกับค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาต้นที่ 2 ในกรณีทีมีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (a) ของแต่ละกรณีมาเทียบกับเสาต้นที่ 2 ที่มีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรง พบว่า อิทธิพลของเสาต้นที่ 1 เอียงทำมุมกับแนวดิ่ง 5°, 15° และ 20° ส่งผลให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีเสาต้นที่ 1 เอียงทำมุมเดียวกัน มีค่าเปลี่ยนไปจากเสาต้นที่ 2 ที่มีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรง ในลักษณะที่ลดลงประมาณ 8%, 4% และ 6% ตามลำดับ แต่ที่มุมเอียงของเสาต้นที่ 1 ทำมุม 10° ไม่พบการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะ แสดงให้เห็นถึงความไม่ชัดเจนของอิทธิพลการเอียงในระนาบตามทิศทางการไหลของเสาต้นที่ 1

หากพิจารณาเฉพาะชุดข้อมูลในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาต้นที่ 2 ต่อขนาดเสาเข็ม (d_{s2}/D) กับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) ที่รวมทุกมุมเอียง

ของเสาต้นที่ 1 อยู่ในรูปเดียวกัน จะเห็นว่าชุดข้อมูลของเสาต้นที่ 2 ที่มีเสาต้นที่ 1 เอียงทำมุมจะเกาะกลุ่มกับเสาต้นที่ 2 ที่มีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรงในลักษณะที่อยู่ต่ำกว่า ตามค่าความลึกการไหลที่เปลี่ยนไป ดังนั้น เท่าที่พบถึงการเปลี่ยนแปลง จึงไม่สามารถระบุอย่างชัดเจนได้ว่า อิทธิพลการเอียงของเสาต้นที่ 1 จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกหลุมกัดเซาะในเสาต้นที่ 2 ให้มีลักษณะแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้

โดยสามารถอธิบายในเชิงกายภาพของความแตกต่างระหว่างเสาเข็มทั้ง 2 ต้นที่เกิดจากการไหลม้วนวนรูปเกือกม้าของเสาเข็มต้นหลัง มีน้อยกว่าเสาเข็มต้นหน้า สืบเนื่องมาจากเสาเข็มต้นที่ 1 จะบดบังและหักเหกระแสน้ำที่จะไหลเข้ามาปะทะกับผิวด้านต้นน้ำของเสาต้นที่ 2 ทำให้การไหลพุ่งลงด้านล่างเกิดขึ้นน้อยลงกว่าผิวด้านต้นน้ำของเสาต้นที่ 1 เป็นทุนเดิม ประกอบกับการม้วนวนตามแนวการไหล (wake vortex) ที่เกิดจากการแยกตัวของเส้นกระแสน้ำหลังจากผ่านเสาเข็มต้นที่ 1 ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายพายุหมุนลูกเล็กๆ หอบเอาวัสดุท้องน้ำจากหลุมกัดเซาะทางด้านหน้าเข้าสู่หลุมกัดเซาะทางด้านหลัง ส่งผลให้ความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 มีค่าน้อยกว่าเสาเข็มต้นที่ 1 แต่เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 มีมุมเอียงในระนาบตามแนวการไหลซึ่งเป็นการเอียงเข้าหาเสาเข็มต้นที่ 2 เพิ่มมากขึ้นทำให้ระยะห่างในแนวดิ่งระหว่างเสาเข็ม 2 ต้น แคบลงเรื่อยๆ ความปั่นป่วนในบริเวณดังกล่าวน่าจะมากขึ้น การกัดเซาะบริเวณผิวด้านต้นน้ำของเสาเข็มต้นที่ 2 ควรที่จะเพิ่มขึ้นด้วยแต่เนื่องจากการเอียงของเสาต้นที่ 1 ในระนาบตามทิศทางการไหลนี้ยังคงบดบังและหักเหกระแสน้ำที่จะไหลเข้าปะทะออกจากเสาต้นที่ 2 จึงน่าจะเป็นสาเหตุอย่างหนึ่งที่การเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกหลุมกัดเซาะในเสาเข็มต้นที่ 2 มีความไม่ชัดเจนและสอดคล้องกับมุมเอียงที่เพิ่มขึ้นของเสาต้นที่ 1 ประกอบกับการเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้ความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ยิ่งลดลง จึงทำให้ความแตกต่างของเสาเข็มต้นที่ 1 ที่มากกว่าเสาเข็มต้นที่ 2 มีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามมุมเอียง จนกระทั่งขนาดความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 ที่มีมุมเอียง 20° มีค่าเท่ากันโดยประมาณกับเสาเข็มต้นที่ 2

จึงสรุปได้ว่า อิทธิพลการเอียงของเสาต้นที่ 1 ในระนาบเดียวกับทิศทางการไหลไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเสาต้นที่ 2 ซึ่งความแตกต่างระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเสาต้นที่ 2 และเสาต้นที่ 1 ที่น้อยลงเรื่อยๆ ตามมุมเอียง จนค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาต้นที่ 2 ไม่เปลี่ยนไปจากเสาต้นที่ 1 ที่มุมเอียง 20° เกิดจากการลดลงของค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเสาต้นที่ 1 ตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น

2) การเอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล จะมีเสาเข็มข้างเคียง 2 ต้น ที่คาดว่าจะได้รับผลจากการเอียงของเสาต้นหน้าในระนาบการเอียงนี้ คือเสาต้นที่ 2 ที่อยู่ถัดจากเสาต้น

ที่ 1 ไปทางท้ายน้ำ และเสาเข็มต้นที่ 3 ซึ่งอยู่ทางด้านข้างที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงเข้าหา และอยู่ในแนวเดียวกับเสาเข็มต้นที่ 2 จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม (d_s/D) กับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) สามารถกำหนดสมการแสดงความสัมพันธ์ของเสาเข็มต้นที่ 2 และต้นที่ 3 ในแต่ละมุมเอียงของเสาต้นที่ 1 ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเสาต้นที่ 2 และต้นที่ 3 ที่ได้รับผลจากการเอียงของเสาต้นที่ 1 พบว่า ผลของมุมเอียงของเสาต้นที่ 1 จะมีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเสาต้นถัดไปและเสาต้นข้างเคียงซึ่งก็คือ เสาต้นที่ 2 และเสาต้นที่ 3 ตามลำดับ โดยที่เสาต้นที่ 2 ที่มีเสาต้นที่ 1 เอียงทำมุมต่างๆ ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นจากเสาต้นที่ 2 ที่มีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรงประมาณ 4%, 18%, 29% และ 36% เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุม 5°, 10°, 15° และ 20° ในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล ตามลำดับ ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมต่างๆ จะมีมากขึ้นเมื่อมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีค่ามากว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ที่มีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง ประมาณ 6%, 9%, 17% และ 26% เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุม 5°, 10°, 15° และ 20° ตามลำดับ

จากการปรับมุมเอียงให้มีระนาบการเอียงทแยงกับทิศทางการไหลส่งผลต่อขนาดความลึกหลุมกัดเซาะในเสาต้นที่ 2 ให้มีค่าเพิ่มขึ้นตามมุมเอียง โดยอัตราการเพิ่มขึ้นจะมีสูงเมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงจากแนวดิ่งมากกว่า 5° ส่วนขนาดความลึกหลุมกัดเซาะในเสาต้นที่ 3 ก็จะเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน โดยอัตราการเพิ่มขึ้นจะมีสูงเมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงจากแนวดิ่งมากกว่า 10°

พิจารณาค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาต้นที่ 2 และต้นที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับเสาต้นที่ 1 ที่มีมุมเอียงเท่ากัน พบว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาต้นที่ 2 จะมีน้อยกว่าเสาต้นที่ 1 ประมาณ 20%, 16% และ 3% เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 มีมุม 0°, 5° และ 10° ตามลำดับ แต่เมื่อมุมเอียงของเสาต้นที่ 1 เอียงเพิ่มขึ้นเป็น 15° และ 20° ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะมีค่ามากกว่าเสาต้นที่ 1 ประมาณ 9% และ 19% ตามลำดับ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 ต่อเสาเข็มต้นที่ 1 ในลักษณะที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ส่วนค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาต้นที่ 3 ในกรณีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรง จะมีค่าไม่แตกต่างจากเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง แต่เมื่อเสาต้นที่ 1 เอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 5°, 10°, 15° และ 20° ค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 จะมีมากกว่าเสาต้นที่ 1 ในลักษณะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ประมาณ 7%, 12%, 24% และ 38% ตามลำดับ และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ต่อเสาเข็มต้นที่ 1 ในลักษณะที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1

สาเหตุการเพิ่มขึ้นของความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาต้นที่ 2 และต้นที่ 3 ตามมุมเอียงของเสาต้นที่ 1 ในระนาบทแยงมุม 45° กับแนวการไหลเกิดจากการเอียงเข้าหาเสาต้นที่ 3 ของเสาต้นที่ 1 ทำให้ไม่ไปบดบังกระแสน้ำที่จะไหลเข้ามาปะทะกับผิวด้านต้นน้ำของเสาเข็มต้นที่ 2 เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 ยิ่งเอียงเข้าหาเสาต้นที่ 3 มาก ยิ่งเผยให้เห็นผิวด้านต้นน้ำของเสาต้นที่ 2 มากขึ้น พื้นที่รับการปะทะของกระแสน้ำก็จะเพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้กระแสน้ำสามารถไหลเข้าปะทะกับผิวเสาเข็มต้นที่ 2 ก่อให้เกิดการไหลพุ่งลงด้านล่าง ซึ่งเป็นตัวการที่สำคัญในการเกิดการม้วนวนรูปเกือกม้าบริเวณผิวด้านต้นน้ำรอบฐานเสาเข็ม ถ้ากระแสน้ำไหลเข้ามาปะทะมากจะหนุนให้การม้วนวนรูปเกือกม้ามีกำลังมากขึ้น ส่วนในเสาเข็มต้นที่ 3 ผลที่ได้รับจากการเอียงเข้าหาของเสาเข็มต้นที่ 1 จะไปลดช่องว่างในแนวดิ่งระหว่างเสาเข็มต้นที่ 1 และต้นที่ 3 ให้แคบลงเรื่อยๆ พร้อมทั้งเบี่ยงเบนการม้วนวนตามแนวการไหลที่เกิดจากเส้นกระแสน้ำที่แยกตัวจากการไหลเมื่อผ่านเสาเข็มต้นที่ 1 ให้เข้าใกล้และทับซ้อนกับเสาเข็มต้นที่ 3 มากขึ้น จนเกิดความปั่นป่วนรอบเสาเข็มต้นที่ 3 มากกว่ากรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง และเมื่อไปเสริมกับกลไกหลักที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมการกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ที่เป็นทุนเดิม ทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 จะเพิ่มขึ้นตามมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 และในส่วนของอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเสาเข็มต้นที่ 2 ที่มีมากกว่าเสาเข็มต้นที่ 3 เนื่องด้วยผลหรือว่าอิทธิพลของเสาเข็มเอียงในต้นที่ 1 ไปถึงง่ายกว่าเสาต้นที่ 3 ซึ่งอยู่เยื้องห่างออกไปทางท้ายน้ำ แต่เสาต้นที่ 2 เป็นเสาเข็มที่อยู่ถัดจากเสาเข็มเอียงไปทางท้ายน้ำในระยะที่ใกล้กว่า

สรุปแล้วขนาดความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงกับมุมเอียงในระนาบทแยงกับทิศทางการไหลของเสาเข็มต้นที่ 1 ที่มากกว่าเสาเข็มต้นที่ 3 และการที่เสาต้นที่ 2 มีค่าความลึกหลุมกัดเซาะมากกว่าเสาต้นที่ 1 เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุม 15° และ 20° มาจากการเพิ่มขึ้นของค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเสาต้นที่ 2 โดยที่การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ไม่มีนัยของความแตกต่าง

3) การเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเสาเข็มต้นที่ 1 จะมีเสาเข็มข้างเคียง 2 ต้น ที่คาดว่าจะได้รับผลจากการเอียงของเสาต้นหน้าในระนาบการเอียงนี้ เช่นเดียวกับระนาบการเอียงทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล และจากความสัมพันธ์สามารถกำหนดสมการให้อยู่ในรูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติระหว่างค่าความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม (d_s/D) กับค่าความลึกการไหลต่อขนาดเสาเข็ม (y/D) ของเสาเข็มต้นที่ 2 และต้นที่ 3 ในแต่ละมุมเอียงของเสาต้นที่ 1 ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเสาต้นที่ 2 และต้นที่ 3 ที่ได้รับผลจากการเอียงของเสาต้นที่ 1 พบว่า ค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเสาต้นที่ 2 และต้นที่ 3 มีลักษณะที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่า

ความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาต้นที่ 2 ในแต่ละมุมเอียงของเสาต้นที่ 1 จะมีขนาดมากกว่าเสาต้นที่ 2 ในกรณีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรง เท่าๆ กันในแต่ละมุมเอียง ประมาณ 20% หรือกล่าวได้ว่า เสาเข็มต้นที่ 1 เอียงจากแนวดิ่งเพิ่มขึ้นเป็น 5° จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาต้นที่ 2 ให้มีค่ามากขึ้นจากเสาต้นที่ 2 กรณีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรง แต่เมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นเป็น 10°, 15° และ 20° ไม่ปรากฏความแตกต่างของขนาดความลึกหลุมกัดเซาะจากมุมเอียง 5°

ค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาต้นที่ 3 ในแต่ละมุมเอียงของเสาต้นที่ 1 จะมีค่ามากกว่าเสาต้นที่ 3 ในกรณีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรง แต่มีอัตราความแตกต่างกันไม่มากนักในแต่ละมุมเอียง โดยค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ในกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุม 5°, 10°, 15° และ 20° จะมีค่ามากกว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาต้นที่ 3 ในกรณีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรง ประมาณ 20%, 21 %, 19% และ 17% ตามลำดับ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเสาเข็มต้นที่ 3 เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียง 5° จนถึง 20° จะให้ความแตกต่างไม่มากนัก หรือก็คือมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่มีนัยสำคัญในช่วงมุมเอียงดังกล่าว หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 3 ในกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุม 5°, 10°, 15° และ 20° จะมีค่ามากกว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาต้นที่ 3 ในกรณีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรง ประมาณ 19%

เมื่อพิจารณาค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเสาเข็มต้นที่ 2 และต้นที่ 3 เพื่อเปรียบเทียบกับเสาเข็มต้นที่ 1 ที่มุมเอียงเดียวกัน พบว่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 จะมีน้อยกว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 1 ทุกมุมเอียงจากแนวดิ่งโดยที่ในกรณีเสาเข็มตั้งตรงค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 จะน้อยกว่าต้นที่ 1 เฉลี่ยประมาณ 20% ส่วนที่มุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 มีค่า 5°, 10°, 15° และ 20° ความแตกต่างโดยเฉลี่ยจะมีค่าน้อยลงเหลือ 13%, 12%, 8% และ 12% ตามลำดับ จากเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างดังกล่าวมีค่าที่ใกล้เคียงกันในแต่ละมุมเอียง จึงอาจกล่าวได้ว่าขนาดความลึกหลุมกัดเซาะในเสาเข็มต้นที่ 2 มีค่าน้อยกว่าเสาเข็มต้นที่ 1 โดยเฉลี่ย 13% เท่ากันโดยประมาณทุกมุมเอียง

และในเสาเข็มต้นที่ 3 ค่าความลึกหลุมกัดเซาะเทียบกับเสาเข็มต้นที่ 1 ในมุมเอียงเดียวกัน เสาเข็มต้นที่ 3 จะมีค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่มากกว่าเสาเข็มต้นที่ 1 เฉลี่ยประมาณ 8%, 10%, 14% และ 8% เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุม 5°, 10°, 15° และ 20° ตามลำดับ ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่เกิดขึ้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันในแต่ละมุมเอียง จึงใช้ค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนของความแตกต่างขนาดความลึกหลุมกัดเซาะในเสาเข็มต้นที่ 3 ที่มีค่ามากกว่าเสาเข็มต้นที่ 1 ประมาณ 8%

การที่มุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหลส่งผลให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 และต้นที่ 3 มากขึ้นกว่ากรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง อธิบายได้จากลักษณะเชิงกายภาพของการเอียงในเสาเข็มต้นที่ 1 ที่มีระนาบการเอียงขวางการไหลของน้ำ เมื่อมุมเอียงมากขึ้นการเคลื่อนที่ของน้ำสามารถไหลเข้าปะทะกับผิวเสาเข็มต้นที่ 2 ได้สะดวกขึ้นโดยไม่มีเสาเข็มต้นที่ 1 บดบัง แต่เนื่องจากการเอียงของเสาเข็มในระนาบนี้ ไม่ส่งผลต่อระยะห่างในแนวดิ่งระหว่างเสาเข็มต้นที่ 1 กับเสาเข็มต้นที่ 2 จึงทำให้ขาดกลไกเสริมที่จะทำให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 เปลี่ยนแปลงตามมุมเอียงในช่วง 5° จนถึง 20° ส่วนในเสาเข็มต้นที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะในช่วงมุมเอียง 5° จนถึง 20° ของเสาเข็มต้นที่ 1 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีขนาดความลึกหลุมกัดเซาะที่มากกว่ากรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง เฉลี่ยประมาณ 20% น่าจะมาจากการเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 เปรียบเสมือนการบีบทางน้ำก่อนที่จะไหลเข้าปะทะกับผิวเสาเข็มต้นที่ 3 ให้แคบลง ประกอบกับเส้นกระแสน้ำที่ไหลผ่านเสาเข็มต้นที่ 1 จะถูกเบี่ยงเบนให้ไปทับซ้อนกับเส้นกระแสน้ำที่จะไหลเข้าปะทะกับเสาเข็มต้นที่ 3 จึงทำให้เกิดกลไกการกัดเซาะที่รุนแรงขึ้น ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจึงมีค่ามากขึ้น

สรุปได้ว่าการปรับเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ในระนาบการเอียงตั้งฉากกับทิศทางการไหลส่งผลต่อค่าความลึกหลุมกัดเซาะกับเสาเข็มที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งก็คือเสาเข็มต้นที่ 2 และต้นที่ 3 ให้มีค่าเพิ่มขึ้น ตามการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง (β) แต่แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงไม่เป็นไปในทางเดียวกัน คือ ขนาดความลึกหลุมกัดเซาะของทั้งเสาต้นที่ 2 และต้นที่ 3 ไม่เพิ่มขึ้นตามค่าของมุมเอียงที่เพิ่มขึ้นในสัดส่วนโดยตรง อีกทั้งไม่มีนัยของอัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดความลึกหลุมกัดเซาะเมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงมากกว่า 5° ในเสาเข็มต้นที่ 2 และต้นที่ 3

จากการสรุปผลดังกล่าวข้างต้น ของการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ในระนาบการเอียงต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเสาเข็มต้นถัดจากเสาเข็มเอียง ซึ่งก็คือเสาเข็มต้นที่ 2 และต้นที่ 3 สามารถสรุปในภาพรวมทั้งหมดได้ว่า เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง จะส่งผลให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 จะมีค่าน้อยกว่าเสาเข็มต้นที่ 1 โดยเฉลี่ยประมาณ 20% ทั้งในกรณีเสาเข็มตั้งตรง 2 ต้น และเสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น แต่ไม่มีความแตกต่างเกิดขึ้นกับเสาเข็มต้นที่ 3

เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมกับแนวดิ่งในระนาบต่างๆ ส่งผลให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 และต้นที่ 3 มีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละระนาบการเอียง โดยที่เสาเข็มต้นที่ 2 จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงกับมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 เมื่อเอียงในระนาบเดียวกับ

ทิศทางการไหล ($\alpha = 0°$) แต่จะมีการเพิ่มขึ้นของค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเสาต้นที่ 2 เมื่อเสาเข็มมีการเปลี่ยนระนาบการเอียงทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล ($\alpha = 45°$) ในลักษณะแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น และที่ระนาบการเอียงของเสาเข็มตั้งฉากกับทิศทางการไหล ($\alpha = 90°$) ค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 ในกรกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมกับแนวดิ่งจะมีมากกว่าเสาเข็มต้นที่ 2 ในกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความลึกหลุมกัดเซาะเมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงมากกว่า 5° จนถึง 20° โดยในช่วงมุมเอียงดังกล่าวจะมีค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่มากกว่าเสาต้นที่ 2 ที่มีเสาต้นที่ 1 ตั้งตรง เฉลี่ยประมาณ 20%

ในเสาเข็มต้นที่ 3 จะไม่มีการทดลองกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงในระนาบทิศทางการไหล แต่ในระนาบการเอียงทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล เสาเข็มต้นที่ 3 จะมีค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ส่วนเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงในระนาบตั้งกับทิศทางการไหล ($\alpha = 90°$) ค่าความลึกหลุมกัดเซาะในเสาเข็มต้นที่ 3 ในกรกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมกับแนวดิ่ง 5°, 10°, 15° และ 20° จะมีค่ามากกว่าเสาเข็มต้นที่ 3 ในกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง เฉลี่ยประมาณ 19% โดยไม่พบการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะตามมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1

ดังนั้นกล่าวได้ว่า ค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มต้นที่ 2 และต้นที่ 3 ไม่มีความสัมพันธ์กับระนาบการเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 และมีความสัมพันธ์ที่ไม่ชัดเจนกับมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ซึ่งเห็นได้จาก เสาเข็มต้นที่ 2 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงกับมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 ในระนาบการเอียงตามทิศทางการไหล แต่กลับมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่เพิ่มขึ้นรอบเสาเข็มต้นที่ 2 และต้นที่ 3 เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 มีมุมเอียงที่เพิ่มขึ้นในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล และมีค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่เพิ่มขึ้นในเสาเข็มต้นที่ 2 และต้นที่ 3 เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล แต่ไม่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1

5.1.4 <u>ผลของมุมเอียงร่วมกับระนาบการเอียงเสาเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะ</u>

จากผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ที่ได้แยกพิจารณาผลของมุมเอียงของเสาเข็มในแต่ละระนาบ ทำให้ทราบว่า ความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะในแต่ละระนาบการเอียงนั้น มีความสัมพันธ์กับมุมเอียงที่แตกต่างกันในแต่ละระนาบ ซึ่งมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นไปในทางเดียวกัน ดังกล่าวคือ การลดลงของขนาดหลุมกัดเซาะตามขนาดมุมเอียงที่เพิ่มขึ้นในระนาบทิศทางการไหล แต่ในขณะที่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของขนาดหลุมกัดเซาะกับมุมเอียงใน

ระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล และมีการเปลี่ยนแปลงขนาดหลุมกัดเซาะน้อยมาก หรือไม่มีนัยของการเปลี่ยนแปลงขนาดหลุมกัดเซาะกับมุมเอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล

จากผลดังกล่าว จึงน่าจะเป็นข้อสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกหลุมกัดเซาะจะต้องมีตัวแปรอื่นมากกว่าขนาดของมุมเอียงเพียงอย่างเดียว นั่นคือ ตัวแปรของระนาบการเอียง ดังนั้นการวิเคราะห์จึงได้พิจารณาตัวแปรระนาบการเอียงและมุมเอียงเข้าด้วยกัน เพื่อดูถึงความสัมพันธ์ทั้งสอง (α และ β) กับความลึกหลุมกัดเซาะ

ส่วนเสาเข็มต้นถัดจากเสาเข็มต้นหน้าที่มีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง ไม่ได้นำมาวิเคราะห์ร่วมกัน เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่ผลที่เกิดกับเสาเข็มที่มีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงเป็นหลัก ประกอบกับได้แยกพิจารณาอิทธิพลของเสาเข็มเอียงที่มีต่อเสาเข็มต้นข้างเคียงไว้แล้วในหัวข้อ 4.3 และการเปลี่ยนแปลงของค่าความลึกหลุมกัดเซาะมีน้อย ไม่มีความไม่ชัดเจนของการเปลี่ยนแปลง จึงไม่พิจารณานำเอาเสาเข็มต้นข้างเคียงมาวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างมุมเอียงกับระนาบการเอียงในการศึกษาครั้งนี้

การพิจารณานำตัวแปรระนาบการเอียง (α) เข้าสู่การวิเคราะห์ร่วมกับตัวแปรมุมเอียง (β) เริ่มต้นจากการสร้างแนวคิด โดยการพิเคราะห์พฤติกรรมทางชลศาสตร์ของการไหล และการกัดเซาะรอบเสาเข็มประกอบกับการทบทวนดูผลการศึกษาที่ผ่านมา ที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรการไหล และโดยเฉพาะตัวแปรขนาดของตอม่อ ที่มีรูปร่างไม่ใช่เสาทรงกระบอกให้มีการตั้งของเสาตอม่อรูปร่างต่างๆ ในลักษณะที่หมุนบิดเอียง (skewness) ไปจากแนวที่ระนาบความกว้างของเสาตอม่อตั้งฉากกับทิศทางการไหล จนเกิดการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะการไหลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนไปของขนาดความกว้างฉายเงา (projection width) ในระนาบระดับที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเสาตอม่อนั้นๆ ทำให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้น และความสูงของเสาหรือความยาวของเสาที่สัมผัสน้ำที่เพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะ

และเมื่อพิจารณาควบคู่ไปกับลักษณะทางกายภาพการเอียงของเสาเข็มในระนาบการเอียงต่างๆ โดยใช้ทิศทางการไหลเป็นแนวอ้างอิง ก็สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของเสาเข็มในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหลได้ ย่อมนำมาซึ่งการเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกหลุมกัดเซาะรอบการเอียงนั้นๆ ได้เช่นกัน จึงพิจารณาถึงการเอียงของเสาที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเสาที่สัมพันธ์กับการไหล ในรูปของตัวแปรบอกรูปร่าง (geometric variables) อันประกอบไปด้วย ความกว้างฉายเงาในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล (เกิดจากการเอียงที่ส่งผลต่อขนาดเสา) ความสูงของเสา (ความยาวที่สัมผัสน้ำ) และระยะปะทะน้ำของแนวเสาที่เยื้องออกไปจากระนาบแกนฐานเสา

การเปลี่ยนมุมเอียงจากแนวดิ่งในระนาบการเอียงต่างๆ ส่งผลต่อค่าความลึกหลุมกัดเซาะให้มีค่าแตกต่างจากกรณีเสาเข็มตั้งตรง ดังนั้นถ้าพิจารณาการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงจากแนวดิ่งในระนาบการเอียงต่างๆ ที่ทำให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะเทียบเท่ากับกรณีเสาเข็มตั้งตรง จะใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (effective diameter, D_e) ที่มีขนาดเปลี่ยนไปตามค่าความลึกหลุมกัดเซาะ ซึ่งเกิดจากขนาดความกว้างฉายเงาในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหลมีการเปลี่ยนไปตามมุมเอียงในระนาบการเอียงต่างๆ คูณด้วยตัวคูณถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) เพื่อใช้เป็นตัวแทนของการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงในระนาบการเอียงต่างๆ

เมื่อนำค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลที่ได้คำนวณจากข้อมูลความลึกการไหลจากการทดลองนี้ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลที่ได้จากการเทียบความลึกหลุมกัดเซาะระหว่างเสาเข็มเอียงกับเสาเข็มตั้งตรงจากข้อมูลการทดลองโดยตรง พบว่า สามารถนำเอามาใช้ประมาณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล เพื่อที่จะนำไปใช้ประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มเอียงทำมุมกับแนวดิ่งในระนาบการเอียงต่างๆ ได้ ตามการอธิบายถึงผลจากการใช้สมการประมาณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล ดังนี้

1.) ลักษณะทางกายภาพของการเอียงในระนาบตามทิศทางการไหลทำให้เกิดความลาดชันของผิวเสาเข็มด้านต้นน้ำ ถ้าเสาเข็มเอียงจากแนวดิ่งมากความลาดชันจะน้อยลง เมื่อความลาดชันของผิวเสาเข็มน้อยการไหลเข้าปะทะของกระแสน้ำจะมีกำลังลดลง ส่งผลให้เกิดการม้วนวนรูปเกือกม้าที่มีกำลังลดลงด้วยเช่นกัน ประกอบกับการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกการไหลถ้าพิจารณาที่มุมเอียงเท่ากัน เมื่อความลึกการไหลสูงขึ้นความยาวเสาจะเพิ่มขึ้น เสาเข็มจะเยื้องออกห่างจากฐานมากขึ้น จึงทำให้ผลที่ความลึกน้ำสูงๆ มีต่อการเปลี่ยนแปลงกลไกการกัดเซาะรอบเสาเข็มเอียงมีน้อย ดังนั้นในระนาบการเอียงตามทิศทางการไหลของเสาเข็มต้นที่ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลในแต่ละระนาบความลึก (D_{ei}) จะเสมือนมีค่าความกว้างฉายเงาของเสาเข็มในระนาบระดับ (D_{pi}) ให้มีค่าลดลงตามมุมเอียงของเสาเข็ม และความลึกการไหลที่เพิ่มขึ้น เพื่อให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะเทียบเท่ากับกรณีเสาเข็มตั้งตรง โดยจะเปลี่ยนรูปของเสาเข็มเอียงให้กลายเป็นเสาเข็มที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากันในแต่ละความลึกการไหล เมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) ตลอดความลึกการไหล จะให้ขนาดเสาเข็มที่เล็กกว่าขนาดเสาเข็มตั้งตรง เพื่อที่จะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะเทียบเท่ากับกรณีเป็นเสาตั้งตรง ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) ของเสาเข็มที่เอียงในระนาบนี้จะมีขนาดที่เล็กลงตามมุมเอียงของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้น และที่มุมเอียงเดียวกันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่าความลึกการไหล

2.) การเอียงในระนาบทแยงมุม 45° ขนาดความกว้างฉายเงาของเสาเข็มในระนาบระดับ (D_{pi}) จะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (D) ตามมุมเอียงที่มากขึ้น แต่เนื่องจากการเอียงของเสาเข็มในระนาบนี้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะลดลงในอัตราที่น้อยกับมุมเอียงของเสาเข็ม (β) ขนาดความกว้างฉายเงาของเสาเข็มในระนาบระดับ (D_{pi}) จะถูกปรับให้มีขนาดที่เล็กลงตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น เพื่อให้หลุมกัดเซาะมีค่าเทียบเท่ากับกรณีเสาเข็มตั้งตรง ประกอบกับที่มุมเอียงใดๆ ค่าความลึกการไหลที่มากขึ้นจะทำให้เสาเข็มเยื้องออกจากฐานมากยิ่งขึ้น ทำให้ขนาดของความสูงหรือความยาวของเสาที่สัมผัสกับน้ำมากขึ้นจากเสาที่ตั้งดิ่ง ทำให้ผลของความลึกน้ำสูงๆ มีต่อการเปลี่ยนแปลงกลไกการกัดเซาะรอบฐานเสาเข็มเอียงมีน้อย ยังผลให้ขนาดความกว้างฉายเงาของเสาเข็มในระนาบระดับ (D_{pi}) ซึ่งมีค่าคงที่ทุกๆ ความลึกการไหลมีขนาดเล็กลงตามความลึกการไหลที่เพิ่มสูงขึ้น จึงสรุปได้ว่า การเอียงของเสาเข็มในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลมีค่าเท่ากับขนาดความกว้างฉายเงาของเสาเข็มในระนาบระดับ (D_{pi}) ที่มีขนาดเล็กลงตามมุมเอียงและความลึกการไหลที่เพิ่มขึ้น

3.) พิจารณาการเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล เมื่อมุมเอียงของเสาเข็มเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดความกว้างฉายเงาของเสาเข็มในระนาบระดับ (D_{pi}) มีค่ามากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มกรณีตั้งตรง (D) ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะมีการเปลี่ยนแปลงที่มากขึ้นกว่ากรณีเสาเข็มตั้งตรง โดยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) จะมีค่าเท่ากับขนาดความกว้างฉายเงาของเสาเข็มในระนาบระดับ (D_{pi}) ในแต่ละมุมเอียงของเสาเข็ม และไม่เปลี่ยนแปลงตามความลึกการไหลที่เพิ่มขึ้น ทำให้ลักษณะการเอียงของเสาเข็มจะถูกเปลี่ยนรูปร่างให้มีลักษณะเป็นเสาเข็มทรงกระบอกตั้งตรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ขึ้นเท่ากับขนาดความกว้างฉายเงาของเสาเข็มในระนาบระดับ (D_{pi}) ตามมุมเอียงนั้นๆ เพราะว่าในการใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) เป็นตัวแทนของการเปลี่ยนมุมเอียงในแนวระนาบต่างๆ เพื่อให้มีค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่เทียบเท่ากับกรณีเสาเข็มตั้งตรง ได้ใช้ตัวคูณถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ที่ได้จากการหาส่วนกลับของระยะทางยกกำลังสอง ซึ่งเป็นระยะที่เสาเข็มเอียงทำมุมต่างๆ เยื้องห่างจากแกนดิ่งตามระนาบการเอียงมาปรับใช้กับค่าขนาดความกว้างฉายเงาของเสาเข็มในระนาบระดับ (D_{pi}) แต่เนื่องจากการใช้ตัวแปรบอกมิติที่ได้จากการเอียงของเสาเข็มในระนาบตั้งฉาก ทำให้ค่าตัวคูณถ่วงน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อนำไปปรับแก้จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) เท่ากับขนาดความกว้างฉายเงาของเสาเข็มในระนาบระดับ (D_{pi}) ทั้งนี้จากลักษณะทางกายของเสาที่เอียงในระนาบตั้งฉาก การที่เสาเอียงจากแกนดิ่งมากขึ้น ทำให้เสาส่วนบนจากฐาน มีระยะห่างออกจากแกนกลางของฐานเสา ซึ่งเป็นจุดของการเกิดหลุมกัดเซาะ ผล

ก็คือ กระบวนการที่ทำให้เกิดกลไกการกัดเซาะที่ส่งมายังจุดการเกิดหลุมกัดเซาะมีน้อย ความสามารถที่จะนำพาเอาวัสดุท้องน้ำออกจากบริเวณดังกล่าวจึงเกิดขึ้นน้อย และเมื่อนำค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) ที่ได้จาการคำนวณมาเปรียบเทียบกับการทดลอง พบว่าอยู่ในเกณฑ์ดี

5.1.5 <u>เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลกับสมการประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะ</u>

จากการพิจารณาลักษณะทางกายภาพเพื่อรวมตัวแปรการเอียงของเสาเข็ม 5 มุมเอียง ในระนาบการเอียง 3 ทิศทาง ทำให้สามารถหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) เพื่อนำไปใช้เป็นตัวแทนของการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาเข็มในระนาบการเอียงตามกรณีต่างๆ ที่ให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะเทียบเท่ากับกรณีเสาเข็มตั้งตรง การประยุกต์ใช้นั้นทำได้โดยการแทนค่าขนาดเสาเข็ม (D) ด้วยขนาดเสาเข็มประสิทธิผล (D_e) ในสมการกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง ในกรณีเสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น เป็นสมการตั้งต้น เนื่องจากคลอบคลุมผลการทดลองทั้งในระนาบทแยงมุม 45° กับทิศทางการไหล และเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ประกอบกับนัยของความแตกต่างจากการมีและไม่มีเสาเข็มต้นที่ 3 มีน้อยมากทำให้ละผลจากปัจจัยดังกล่าว

เมื่อนำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มาใช้ร่วมกับผลการทดลองที่ได้ โดยแทนค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (D) ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มประสิทธิผล (D_e) ในสมการเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง ในกรณีเสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น จะทำให้พฤติกรรมการกัดเซาะของเสาเข็มเอียงในระนาบการเอียงต่างๆ มีลักษณะคล้ายกับเสาเข็มตั้งตรง และจากการเปรียบเทียบค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มประสิทธิผล (D_e) กับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ให้ค่าความแตกต่างเฉลี่ยอยู่ในช่วง ±20% ของข้อมูลทั้งหมด และมีข้อมูลส่วนมากเกาะอยู่บนเส้น 45° อยู่ในเกณฑ์ที่ดี

จากวิธีการประมาณขนาดความลึกของหลุมกัดเซาะของเสาเข็มเอียง ที่มีมุมเอียงจากแนวดิ่งตั้งแต่ตั้งตรงจนถึง 20° ในระนาบการเอียงจาก 0° ถึง 90° จากทิศทางการไหล โดยพิจารณาจากพฤติกรรมการกัดเซาะรอบเสาเข็มเอียงที่เทียบเท่าพฤติกรรมการกัดเซาะรอบเสาเข็มตรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดหนึ่งที่เรียกว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (effective diameter, D_e) พบว่า สมการที่ใช้ในการประมาณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลที่พิจารณาจากลักษณะทางกายภาพการเอียงของเสาเข็ม ที่เปลี่ยนแปลงไปกับพฤติกรรมการกัดเซาะและตัวแปรการไหล สามารถอธิบายข้อมูลได้ในระดับดีน่าพอใจ และจากแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงขนาดหลุมกัดเซาะกับมุมเอียง (β) และมุมระนาบการเอียง (α) ที่สอดคล้องไปในทาง

เดียวกันกับ สมการที่ใช้ประมาณขนาดความลึกหลุมกัดเซาะในช่วงข้อมูล ทำให้มีความน่าเชื่อถือได้ว่า สมการดังกล่าวน่าจะอธิบายความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะกับการเอียงของเสาเข็มที่ระนาบการเอียง (α) ได้ถึง 180° อย่างไรก็ตามยังต้องการข้อมูลการทดลองในระนาบการเอียงดังกล่าวเพื่อสอบเทียบกับสมการและวิธีการที่นำเสนอในการศึกษานี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงและการเปลี่ยนแปลงระนาบการเอียงจากกรณีเสาเข็มตั้งตรง ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะทั้งในเสาเข็มต้นที่เอียงและเสาเข็มต้นข้างเคียงอย่างมีนัยสำคัญ

ถึงอย่างไรการศึกษานี้ เป็นการตัดพิจารณาบางส่วนของเสาเข็มกลุ่มที่มีเสาเข็มต้นที่เอียงในระนาบต่างๆ ที่มีเสาเข็มต้นถัดไปและต้นข้างเคียงตั้งตรง ที่คาดว่าจะได้รับผลจากมุมเอียงของเสาเข็ม รวมทั้งกำหนดให้มีรูปแบบการจัดวางและระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่เฉพาะเพื่อลดตัวแปรทางด้านกลุ่มเสาเข็มออกไป ทั้งนี้ลักษณะของเสาเข็มกลุ่มอาจมีจำนวนเข็มและ/หรือระยะห่างระหว่างเสาเข็มรวมทั้งการจัดวางที่แตกต่างกัน จึงควรมีการศึกษาเพื่อจะให้มีความครอบคลุมของข้อมูลในเงื่อนไขต่างๆ ให้มากที่สุด

2) การพิจารณานำผลการศึกษาครั้งนี้เพื่อไปใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นประกอบการออกแบบ หรือกำหนดลักษณะของโครงสร้างฐานรากของอาคารชลศาสตร์อื่นๆ ในเชิงชลศาสตร์ที่ให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่น้อยที่สุด ควรมีการออกแบบเสาเข็มหรือว่าตอม่อรวมทั้งโครงสร้างอาคารชลศาสตร์อื่นๆ ให้มีผิวทางด้านต้นน้ำที่จะต้องรับการปะทะจากกระแสน้ำโดยตรง มีความลาดเอียงไปทางด้านท้ายน้ำ ซึ่งจะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะน้อยกว่าผิวทางด้านต้นน้ำที่ตั้งตรง

รวมทั้งจะต้องพิจารณาทดลองด้วยแบบจำลองทางกายภาพในขั้นตอนการออกแบบก่อนที่จะดำเนินการก่อสร้าง เพื่อให้มีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมทางชลศาสตร์ที่จะเกิดขึ้นจริง อันจะส่งผลถึงการลดความเสียหายและการวิบัติของโครงสร้างในโครงการนั้นๆ

3) ควรมีการศึกษาถึงตอม่อที่มีลักษณะรูปร่างไม่คงรูป (non-prismatic pier) หรือมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอในแนวดิ่ง เช่น เสาเข็มหรือตอม่อที่มีรูปทรงกรวย เสาเข็มหรือตอม่อที่มีส่วนฐานโค้งรูปพาราโบลาหรือรูปทรงที่เฉพาะของโครงสร้างอาคารทางชลศาสตร์รูปแบบอื่นๆ ที่ขึ้นอยู่กับเหตุผลทางด้านวิศวกรรม สถาปัตยกรรม หรือระบบนิเวศวิทยาตามสภาพพื้นที่นั้นๆ เป็นต้น

4) ควรศึกษาเพิ่มเติมในระนาบการเอียงที่ทำมุมอื่นๆ กับทิศทางการไหล (αมากกว่า 90°) เพื่อศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะ รวมทั้งเป็นข้อมูลที่จะใช้ตรวจสอบการใช้งาน (verification) ของสมการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (D_e) ที่ได้จากการศึกษานี้ว่าสามารถใช้ได้กับการเอียงของเสาเข็มในระนาบอื่นหรือไม่

5) ข้อจำกัดของเวลาและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา ทำให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ยังจำกัดอยู่ในช่วงหนึ่ง ไม่ครอบคลุมทุกเงื่อนไขและเหตุการณ์ที่กว้าง ไม่ว่าจะเป็นค่าฟรูดนัมเบอร์ (Fr) ขนาดเสาเข็ม (D) ขนาดวัสดุท้องน้ำ ควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเป็นประโยชน์ต่อวงวิชาการต่อไป

6) การศึกษานี้ยังขาดการพิจารณาถึงขนาดความกว้างของหลุมกัดเซาะ รวมทั้งรูปร่างที่เปลี่ยนไปของหลุมกัดเซาะเนื่องจากข้อจำกัดของเวลา ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการพิจารณาพื้นที่ หรือปริมาตรที่หายไปเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบการควบคุมหรือป้องกันโครงสร้างอาคารชลศาสตร์ต่อการกัดเซาะที่เกิดขึ้นได้

7) ในการศึกษาครั้งนี้ ได้พยายามศึกษาถึงพฤติกรรมและกลไกการกัดเซาะที่เกิดขึ้น โดยใช้สีน้ำ สีน้ำมัน สีโปสเตอร์ สีอะคีลิกส์ เพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมและกลไกการกัดเซาะที่ชัดเจน แต่ไม่สามารถแสดงผลได้ตามต้องการ เนื่องจากการไหลเป็นแบบปั่นป่วนทำให้สีต่างๆ เมื่อปล่อยลงสู่น้ำแล้วจะแตกกระจายไม่เห็นถึงกลไกการกัดเซาะที่เกิดขึ้น

8) ถึงแม้การศึกษานี้จะได้ข้อมูลมาจากแบบจำลองทางกายภาพ ซึ่งเป็นวิธีการแก้ไขปัญหาอย่างหนึ่งทางด้านชลศาสตร์การไหลของน้ำ แต่ก็ยังคงอยู่บนพื้นฐานและข้อสมมติฐานของเครื่องมือที่ใช้เพื่อให้มีความเหมาะสมในสภาวะการไหลหนึ่งเท่านั้น รวมทั้งไม่อาจคงความเหมือนทางด้านพฤติกรรมชลศาสตร์ของต้นแบบมาได้ทุกประการ และที่สำคัญที่สุดไม่สามารถจำลองการเกิดเหตุการณ์ทางธรรมชาติที่มีการเกิดแบบสุ่ม และส่งผลถึงกันและกันอย่างเป็นระบบที่ต่อเนื่องได้ในห้องปฏิบัติการ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องอาศัยการเก็บวัดจริงในภาคสนามเท่าที่สามารถเก็บวัดได้ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลขั้นพื้นฐานในการใช้ควบคู่กับผลที่ได้จากการทดลอง