การศึกษาแรงฉุดที่กระทำต่อวัตถุรูปทรงกระบอกเดี่ยวเนื่องจากการไหลในทางน้ำเปิด

A Study of Drag Force on Single Cylindrical Bodies in Open Channel Flow

ยุทธนา แก้วคำแจ้ง

Yuddhana Keokhumcheng

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Division of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand

Corresponding author. Tel.: 08 6773 0770, E-mail: yuddhana.k@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาพฤติกรรมของแรงฉุดเนื่องจากการไหลในทางน้ำเปิดผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกเดี่ยวที่อยู่ในแนวดิ่ง ในการศึกษาจะดำเนินการจำลองสภาพการไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกเดี่ยวที่สร้างจากพลาสติกแผ่นบางที่มีพื้นผิวเรียบ และมีหน้าตัดแตกต่างกันจำนวน 4 หน้าตัด แรงฉุดที่เกิดขึ้นจริงจะถูกหาได้จากการทดลองโดยใช้หลักการสมดุลของโมเมนต์เนื่องจากแรงฉุดที่กระทำต่อวัตถุที่จมอยู่ใต้น้ำและโมเมนต์ต้านทานการหมุนของวัตถุที่ทำให้วัตถุสามารถตั้งตรงอยู่ในแนวดิ่ง สมมติฐานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ การกระจายของแรงฉุดจะมีค่าสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่ของวัตถุที่จมอยู่ใต้น้ำ ค่าแรงฉุดที่เกิดขึ้นจริงที่ได้จากการทดลองจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับแรงฉุดที่คำนวณได้ในทางทฤษฎีเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุด จากการศึกษาในช่วงการไหลที่มี $60{,}000 \leq R_e \leq 210{,}000$ จะพบว่าแรงฉุดที่กระทำต่อวัตถุทรงกระบอกแต่ละหน้าตัดจะแปรผันโดยตรงกับตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลผ่านวัตถุ ค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดที่ได้จะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันโดยมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ของแรงฉุดที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 1.977, 1.747, 1.552 และ 1.209 สำหรับวัตถุรูปทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก สี่เหลี่ยมคางหมู สามเหลี่ยมด้านเท่า และวงกลม ตามลำดับ ผลการศึกษาที่ได้ยังสามารถนำไปพัฒนาเป็นสูตรอย่างง่ายเพื่อหาหน่วยแรงฉุดบนพื้นผิววัตถุที่จมอยู่ใต้น้ำ ซึ่งสามารถใช้คำนวณหาแรงฉุดที่กระทำต่อวัตถุรูปทรงกระบอกสำหรับสภาพเงื่อนไขเช่นเดียวกับการศึกษาในครั้งนี้

คำสำคัญ: แรงฉุด สัมประสิทธิ์แรงฉุด แรงพลศาสตร์ แรงชลพลศาสตร์ แรงเนื่องจากการไหล

Abstract

This study aimed to examine the characteristics of drag force by the flowing of water in an open channel through single cylindrical bodies with vertical alignment. The study was carried out by the simulation of flow conditions through single cylindrical bodies which were made by thin

Received 07-04-2020
Revised 08-05-2020
Accepted 13-05-2020

plate plastic with a smooth surface for 4 different cross-sections. The actual drag forces were determined by the experiment based on the equilibrium concept of moment by drag force on the submerged body and the resisting moment to the rotation of the body which caused the vertical alignment. The uniform drag force distribution over the submerged body was assumed in this study. The obtained actual drag forces from the experiment were compared with the theoretically calculated drag forces to obtain the drag coefficients. From the study in the range of 60,000 ≤ Re ≤ 210,000, it was found that the drag force was proportional to the Reynolds number of the flowing through the submerged body. The obtained drag coefficients were similar to each other which is slightly decreased. The obtained drag coefficients were 1.977, 1.747, 1.552 and 1.209 for the cylindrical bodies with rectangular, trapezoidal, equilateral triangle and circular section, respectively. Development of empirical formula for stress of drag force on submerged body was also performed which can be used to determine drag force on cylindrical body in the same conditions of this study.

Keywords: Drag force, Drag coefficient, Dynamic force, Hydrodynamics force, Flowing force

1. บทนำ

โครงสร้างรูปทรงกระบอก (Cylindrical structures) ถูกใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในงานวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมชลศาสตร์ เช่น ตอม่อ (Pier) ของสะพาน เสารองรับท่าเรือ หรือโครงสร้างชลศาสตร์ในทะเล ซึ่งในการวิเคราะห์แรงที่เกี่ยวข้องนั้น นอกจากจะพิจารณาถึงน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างแล้ว การพิจารณาถึงแรงกระทำเนื่องจากน้ำก็เป็นสิ่งสำคัญ ไม่ว่าจะเป็นแรงสถิตศาสตร์ (Static forces) หรือแรงพลศาสตร์ (Dynamic forces) การเลือกใช้วิธีการที่เหมาะสมเพื่อวิเคราะห์หาค่าแรงต่าง ๆ ที่เกิดจากน้ำกระทำต่อโครงสร้างที่อยู่ในน้ำจะเป็นสิ่งสำคัญต่อการออกแบบและตรวจสอบเสถียรภาพของโครงสร้างนั้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในขณะที่มีอัตราการไหลหรือความเร็วการไหลสูง ๆ จะทำให้เกิดแรงกระทำแบบชลพลศาสตร์ (Hydrodynamic) หรือแรงที่เกิดจากการไหลของน้ำที่มีนัยสำคัญต่อการวิเคราะห์โครงสร้างทางชลศาสตร์เหล่านั้น ซึ่งจะมีผลต่อเสถียรภาพในการรับแรงต่าง ๆ หรือเสถียรภาพต่อการพลิกคว่ำของโครงสร้างทางชลศาสตร์

เมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่ผ่านของไหลหรือวัตถุที่จมอยู่ในของไหลที่มีการเคลื่อนที่ผ่าน จะพบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัตถุและของไหลรอบ ๆ วัตถุจะทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างของไหลกับวัตถุ โดยแรงที่กระทำขนานกับทิศทางการไหลจะทำให้เกิด หน่วยแรงเฉือนตามแนวผนัง (Wall shear stress) หรือพื้นผิวของวัตถุ และแรงที่กระทำในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลเนื่องจากอิทธิพลของความดัน มีชื่อเรียกว่า หน่วยแรงตั้งฉาก (Normal stress) ซึ่งแรงลัพธ์ที่เกิดจากหน่วยแรงเฉือนและความดันที่เกิดขึ้นตามทิศทางของความเร็วในการไหล เรียกว่า แรงฉุด (Drag หรือ Drag force) และแรงลัพธ์ที่ตั้งฉากกับทิศทางของความเร็วในการไหล เรียกว่า แรงยก (Lift

force) [1] หรืออธิบายสั้น ๆ ได้ว่า แรงฉุดจะมีแนวของแรงขนานกับทิศทางในการเคลื่อนที่ของวัตถุหรือการไหลของของไหล ส่วนแรงยกจะมีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางในการเคลื่อนที่ของวัตถุหรือการไหลของของไหล

การเข้าใจถึงคุณลักษณะของแรงฉุดเนื่องจากการไหลของของไหลที่มีต่อวัตถุ มีความสำคัญต่องานด้านการออกแบบทางวิศวกรรม ยกตัวอย่างเช่น การนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบรถยนต์หรืออากาศยานเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วและประหยัดเชื้อเพลิง หรือใช้เป็นแนวทางในการออกแบบโครงสร้างที่มีความสูงมาก ๆ เช่น ปล่องควันของโรงงานอุตสาหกรรม ป้ายโฆษณา หอคอย เสาอากาศอาคารสูง หรือแม้กระทั่งโครงสร้างต่าง ๆ ทางชลศาสตร์ โดยในการศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์ของแรงฉุดที่มีต่อวัตถุ สามารถดำเนินการได้โดยการจำลองสภาพการไหลของของไหล ไม่ว่าจะเป็นอากาศหรือของเหลวใด ๆ ให้เกิดการไหลผ่านวัตถุที่สนใจ จากนั้นจึงทำการวัดค่าปริมาณต่าง ๆ ที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับแรงฉุด โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำไปวิเคราะห์ร่วมกับทฤษฎีต่าง ๆ เช่น หลักการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum) หรือหลักการของพลังงานในการไหล

ในการศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของลักษณะหน้าตัดของวัตถุรูปทรงกระบอกที่มีต่อพฤติกรรมของแรงฉุดที่เกิดจากการไหลผ่านของน้ำในทางน้ำเปิด ด้วยการวัดค่าแรงฉุดที่เกิดขึ้นจริงเพื่อใช้เปรียบเทียบกับแรงฉุดที่คำนวณได้ในทางทฤษฎี

2. หลักการและการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

แรงฉุด (Drag force) หมายถึง แรงที่เกิดจากของไหลกระทำต่อวัตถุที่จมอยู่ในของไหล โดยเป็นแรงที่จะต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านของไหลนั้น ๆ หรือในทางกลับกัน แรงฉุด หมายถึง แรงที่เกิดจากการไหลของของไหลผ่านวัตถุ ซึ่งหากเป็นกรณีที่วัตถุอยู่นิ่งกับที่แล้วมีของไหลเคลื่อนตัวผ่าน แรงฉุดจะเปรียบเสมือนแรงที่จะพยายามฉุดดึงให้วัตถุเคลื่อนที่ไปกับของไหล แรงฉุดเป็นแรงที่กระทำกับวัตถุใด ๆ ที่มีของไหลเคลื่อนตัวผ่านหรือไหลผ่าน แรงฉุดที่เกิดขึ้นบนวัตถุที่จมอยู่ในของไหลสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ แรงฉุดที่เกิดจากแรงเฉือน ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แรงฉุดจากความเสียดทานที่พื้นผิว (Friction drag หรือ Surface drag) ซึ่งจะมีความสำคัญต่อแรงฉุดที่เกิดขึ้นกับวัตถุที่มีรูปทรงแบบลู่ตามทิศทางการไหล (Streamlined body) และแรงฉุดที่เกิดจากความดันรอบพื้นผิววัตถุ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แรงฉุดจากความดัน (Pressure drag) ซึ่งจะมีความสำคัญต่อแรงฉุดที่เกิดขึ้นกับวัตถุที่มีรูปทรงแบบไม่ลู่ตามทิศทางการไหล (Blunt body) [2]

ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมของแรงฉุดที่เกิดขึ้นกับวัตถุรูปทรงกระบอกที่มีลักษณะทั้งแบบลู่และแบบไม่ลู่ตามทิศทางการไหล ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าแรงฉุดในทางทฤษฎีได้จากสมการของเบอร์นูลลี่ (Bernoulli equation) กล่าวคือ สำหรับการไหลของของไหลในอุดมคติ (Ideal fluid) หรือของไหลที่ปราศจากความหนืด ค่าแรงฉุด (F_D) สามารถคำนวณได้จาก [3]

$$F_D = \frac{\rho V^2 A}{2} \qquad (1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล ในหน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

V คือ ความเร็วเฉลี่ยในการไหลของของไหลในหน่วยเมตรต่อวินาที

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุที่จมอยู่ในของไหลและตั้งฉากกับทิศทางการไหล ในหน่วยตารางเมตร

สำหรับค่าแรงฉุดที่คำนวณได้จากสมการที่ (1) เป็นค่าแรงฉุดในทางทฤษฎีที่ไม่ได้พิจารณาถึงรูปทรงของวัตถุที่จมอยู่ในของไหล ลักษณะพื้นผิวของวัตถุ ความหนืดของของไหล ความสามารถในการบีบอัดตัวได้ (Compressibility) ของของไหล และการแยกตัวของการไหลบริเวณชั้นขอบเขต (Boundary layer) ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถหาแรงฉุดที่เกิดขึ้นจริงกับวัตถุ (F) ค่าแรงฉุดในทางทฤษฎีจากสมการที่ (1) จึงสามารถเขียนได้ใหม่เป็น [4]

$$F = C_D F_D \qquad (2)$$

เมื่อ C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงฉุด (Drag coefficient) ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless parameter)

หรือสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดได้จาก

$$C_D = \frac{F}{F_D} \qquad (3)$$

โดยทั่วไปแล้วในการศึกษาเกี่ยวกับแรงฉุดที่กระทำต่อวัตถุที่จมในของไหล มีการจำแนกลักษณะของวัตถุเป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ (1) วัตถุที่มีรูปทรง 2 มิติ (Two-dimensional body) หมายถึง วัตถุที่มีพื้นผิวบางส่วนจมอยู่ในของไหล เช่น ตอม่อของสะพาน หรือ โครงสร้างทางชลศาสตร์ที่จมอยู่ในน้ำบางส่วน และ (2) วัตถุที่มีรูปทรง 3 มิติ (Three-dimensional body) หมายถึง วัตถุที่มีพื้นผิวทั้งหมดจมอยู่ในของไหล เช่น เรือดำน้ำ บอลลูน หรือเครื่องบิน เป็นต้น สำหรับวัตถุรูปทรงกระบอกที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้จัดอยู่ในกลุ่มของวัตถุที่มีลักษณะเป็นวัตถุรูปทรง 2 มิติ

ตามปกติแล้วสัมประสิทธิ์แรงฉุด (C_D) จะมีค่าไม่คงที่ โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุในของไหลหรือความเร็วในการไหลของของไหลผ่านวัตถุ ทิศทางการไหลหรือทิศทางในการเคลื่อนที่ของวัตถุ ตำแหน่งของวัตถุในของไหล ขนาดของวัตถุหรือพื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล ความหนาแน่นและความหนืดของของไหล เป็นต้น โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงฉุดและตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, R_e) ซึ่งตัวเลขเรย์โนลด์นี้ จะถูกใช้อธิบายลักษณะของการไหลผ่านวัตถุหรืออธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านของไหล จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า อิทธิพลของความหนืดจะมีผลอย่างมากต่อสัมประสิทธิ์แรงฉุดในช่วงการไหลที่มีตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ ๆ โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดจะแปรผกผันกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์อย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าสูงขึ้นจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก [3, 4] นอกจากนี้ยังงานวิจัยเกี่ยวกับการไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอก (Cylinder) ที่มีหน้าตัดต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นวงกลม วงรี สี่เหลี่ยมมุมฉาก สามเหลี่ยมและครึ่งวงกลม ซึ่งพบว่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดของวัตถุแต่ละแบบ จะมีค่าคงที่สำหรับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในช่วงใดช่วงหนึ่ง [4]

สัมประสิทธิ์แรงฉุดเป็นตัวแปรตัวหนึ่งจากหลาย ๆ ตัวแปรที่มีผลต่อแรงฉุดที่เกิดจากการไหล

ของของไหลผ่านวัตถุ สิ่งสำคัญในการนำไปประยุกต์เพื่อใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรม คือ การหาแนวทางในการลดค่าแรงฉุดที่เกิดขึ้น โดยหนึ่งในหลาย ๆ วิธีที่ใช้ในการลดค่าแรงฉุดที่เกิดขึ้นบนวัตถุ คือ การติดตั้งวัตถุเข้าไปเพื่อควบคุมลักษณะการไหล เรียกว่า การควบคุมแบบ Passive ซึ่งพบว่าสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดได้ถึง 48% [5] นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาถึงการลดลงของแรงฉุดเนื่องจากการไหลของกระแสลมผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกที่มีหน้าตัดวงกลม ด้วยการควบคุมการไหลของกระแสลมรอบ ๆ แบบจำลองรูปทรงกระบอกโดยใช้หลักการของการควบคุมแบบ Passive ด้วยการติดตั้งท่อนวัสดุตันรูปทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม (Rod) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d บริเวณด้านหน้าของแบบจำลองรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง D (เมื่อ $d < D$) ซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ L จากการศึกษาพบว่า รูปแบบการไหลของกระแสลมผ่านแบบจำลองจะแปรเปลี่ยนตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุตันรูปทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม ระยะ L และขนาดของตัวเลขเรย์โนลด์ โดยยังพบอีกว่า การลดลงของแรงฉุดจากการไหลของกระแสลมจะมีค่ามากสุดถึง 63% [6] การศึกษาเพื่อหาแนวทางในการลดลงของแรงฉุดด้วยวิธีการในลักษณะดังกล่าว ยังได้นำไปใช้กับการไหลของน้ำที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1000 และ 5000 ผ่านวัตถุทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม โดยพบว่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้หลักการควบคุมแบบ Passive ที่บริเวณด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำของวัตถุทรงกระบอก [7, 8]

การดัดแปลงรูปตัดของวัตถุทรงกระบอกก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งในการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุด ดังเช่น การตัดหรือผ่าวัตถุทรงกระบอกที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลมทั้งด้านซ้ายและด้านขวาโดยให้แนวของรอยตัดขนานกับแกนของทรงกระบอกด้วยมุมตัดต่าง ๆ กัน ซึ่งจะทำให้ได้วัตถุรูปทรงกระบอกที่มีหน้าตัดคล้ายอักษรตัว I หรือมีชื่อเรียกว่า ทรงกระบอกรูปตัว I (Type-I cylinder) จากการศึกษาพบว่ามุมของการตัดทรงกระบอกที่ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดต่ำที่สุด คือ 53° [9]

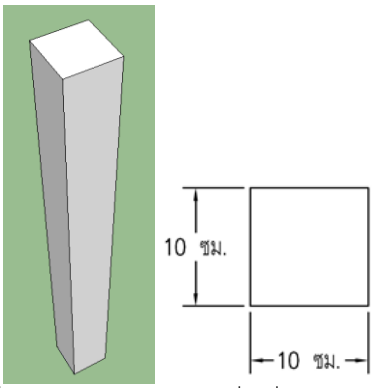
แนวคิดเกี่ยวกับการควบคุมแรงที่เกิดจากการไหลของน้ำที่มีต่อวัตถุรูปทรงกระบอกที่มีหน้าตัดวงกลมโดยการทำให้พื้นผิวภายนอกของวัตถุเกิดความขรุขระ (Roughness) ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการลดค่าแรงฉุดที่เกิดขึ้น ซึ่งมีการศึกษาที่เกี่ยวข้องอยู่มากมายเพื่อประเมินลักษณะของพื้นผิวของวัตถุที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านวัตถุ เช่น การศึกษาอิทธิพลของความขรุขระของพื้นผิววัตถุที่มีต่อพฤติกรรมการไหลสำหรับสภาพการในช่วง $40{,}000 \leq R_e \leq 3{,}000{,}000$ ผ่านวัตถุด้วยการใช้ทรายที่มีความละเอียดแตกต่างกันเคลือบที่พื้นผิวของวัตถุทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม [10] การศึกษาพฤติกรรมการไหลที่มี $40{,}000 \leq R_e \leq 1{,}700{,}000$ ผ่านวัตถุทรงกระบอกหน้าตัดวงกลมที่มีพื้นผิวขรุขระในลักษณะเป็นแถบยาว (Roughness strips) [11] การศึกษาพฤติกรรมการไหลสำหรับสภาพการไหลที่มี $20{,}000 \leq R_e \leq 300{,}000$ ผ่านวัตถุทรงกระบอกหน้าตัดวงกลมที่พื้นผิวมีลักษณะเป็นหลุมเล็ก ๆ (Dimpled surface) [12] การศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านวัตถุทรงกระบอกหน้าตัดวงกลมโดยที่บริเวณพื้นผิวจะมีการเซาะร่องโดยรอบเพื่อให้เกิดลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบ [13] การศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านวัตถุทรงกระบอกหน้าตัดวงกลมโดยที่บริเวณพื้นผิวจะมีการเซาะร่องเป็นเกลียวโดยรอบ [14] หรือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของแรงฉุดเนื่องจากการไหลและ

ลักษณะพื้นผิวของวัตถุ โดยการหุ้มพื้นผิวภายนอกของวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยวัสดุที่มีความราบเรียบของพื้นผิวต่าง ๆ กัน จากการเปรียบเทียบผลการศึกษาที่ได้กับการไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกที่มีผิวเรียบจะพบว่า ความขรุขระของพื้นผิววัตถุสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดได้อย่างมีนัยสำคัญ [15] เป็นต้น ซึ่งผลจากการศึกษาที่ได้เหล่านี้ได้แสดงให้เห็นว่าแรงฉุดที่กระทำต่อวัตถุจะมีค่าลดลงเมื่อพื้นผิวของวัตถุมีความขรุขระ ยกตัวอย่างเช่น แรงฉุดจะมีค่าลดลง 18-25% สำหรับการไหลผ่านวัตถุทรงกระบอกหน้าตัดวงกลมที่มีพื้นผิวถูกเซาะร่องเป็นเกลียวโดยรอบเมื่อเทียบกับแรงฉุดที่เกิดจากการไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกหน้าตัดวงกลมที่มีผิวเรียบ [14]

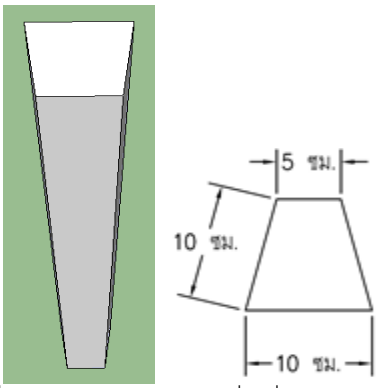
นอกจากนี้แล้วยังมีมีการศึกษาเกี่ยวกับการหาวิธีการที่เหมาะสมในการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดของการไหลของกระแสลมผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกหน้าตัดวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ กัน ด้วยการทำการจำลองสภาพการไหลของกระแสลมผ่านวัตถุในห้องปฏิบัติการ จากนั้นจึงทำการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุด ด้วยวิธีการ 2 วิธี ได้แก่ วิธีวัดค่าน้ำหนักโดยตรง (Direct weighting method) และวิธีการวัดค่าการกระจายของความดัน (Pressure distribution method) รอบ ๆ วัตถุรูปทรงกระบอกเพื่อเปรียบเทียบกัน ซึ่งจากการศึกษาพบว่า สัมประสิทธิ์แรงฉุดที่ได้จากวิธี Direct weighting method มีความแม่นยำกว่าค่าที่ได้จากวิธี Pressure distribution method [16]

3. วิธีการดำเนินงาน

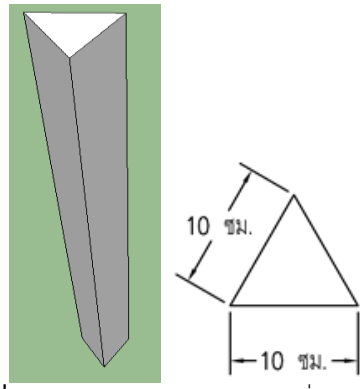
ในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาถึงพฤติกรรมของแรงฉุดที่เกิดจากการไหลของน้ำในทางน้ำเปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีความกว้าง 30 เซนติเมตร และมีท้องน้ำอยู่ในแนวราบ โดยจะมีการจำลองสภาพการไหลของน้ำด้วยอัตราการไหลต่าง ๆ กัน ให้มีการไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกเดี่ยวที่ถูกติดตั้งให้แกนตามยาวของวัตถุอยู่ในแนวดิ่ง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของทางน้ำเปิด สำหรับวัตถุรูปทรงกระบอกจะถูกสร้างขึ้นจากพลาสติกแผ่นเรียบที่มีน้ำหนักเบา โดยมีลักษณะของหน้าตัดที่แตกต่างกันจำนวน 4 รูปแบบ ได้แก่ หน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก หน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู หน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า และหน้าตัดวงกลม โดยวัตถุแต่ละรูปแบบจะมีความยาว 1.20 เมตร ดังรายละเอียดในภาพที่ 1 ถึงภาพที่ 4



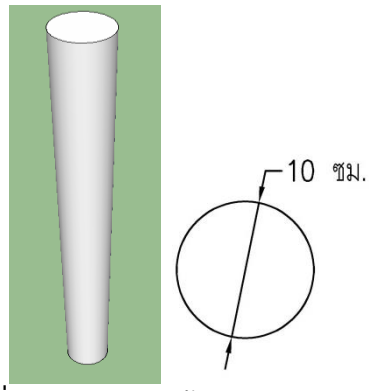
ภาพที่ 1 ทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก



ภาพที่ 2 ทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู

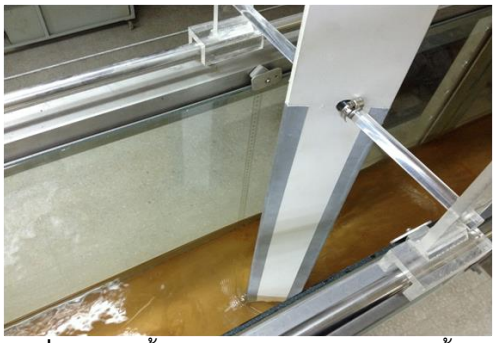


ภาพที่ 3 ทรงกระบอกหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า



ภาพที่ 4 ทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม

สำหรับการติดตั้งวัตถุรูปทรงกระบอกในทางน้ำเปิด จะทำการติดตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของหน้าตัดทางน้ำเปิด โดยจะให้หน้าตัดด้านที่มีความกว้าง 10 เซนติเมตร อยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหล ซึ่งหากมีการไหลของน้ำในทางน้ำเปิดด้วยความลึกการไหลเดียวกันจะพบว่า วัตถุรูปทรงกระบอกทั้ง 4 รูปแบบ จะมีพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (Projection area) เท่ากันทั้ง 4 รูปแบบ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวของวัตถุรูปทรงกระบอกแต่ละแบบ จะถูกเจาะรูให้ทะลุทั้ง 2 ด้าน ทำให้แนวของรูเจาะจะตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำ ซึ่งรูเจาะดังกล่าวนี้จะถูกร้อยผ่านด้วยแกนพลาสติกที่ยึดติดกับรางน้ำเปิด ดังนั้นเมื่อมีการไหลในรางน้ำเปิดเข้าสู่วัตถุรูปทรงกระบอก จะทำให้วัตถุรูปทรงกระบอกไม่สามารถไหลไปกับกระแสน้ำได้ ดังแสดงรายละเอียดการติดตั้งดังภาพที่ 5

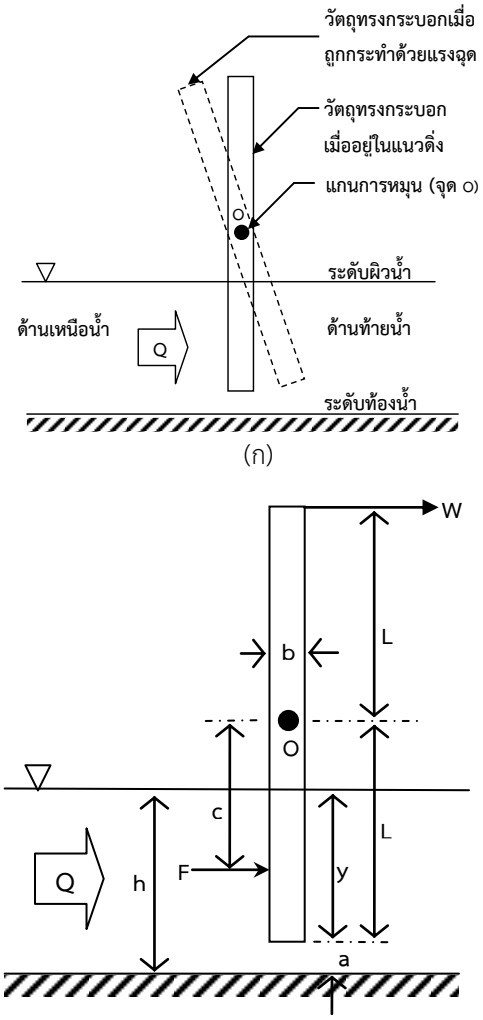


ภาพที่ 5 การติดตั้งวัตถุรูปทรงกระบอกเข้ากับรางน้ำเปิด

เมื่อพิจารณาวัตถุรูปทรงกระบอกที่ติดตั้งกับรางน้ำเปิดเป็นจะพบว่า หากไม่มีการไหลของน้ำในรางน้ำเปิด วัตถุรูปทรงกระบอกที่อยู่ในสภาวะสมดุลจะต้องตั้งตรงโดยมีแกนของวัตถุอยู่ในแนวดิ่ง แต่หากมีการไหลผ่านของน้ำเข้าสู่วัตถุรูปทรงกระบอก จะพบว่าแรงเนื่องจากการไหลของน้ำจะทำให้วัตถุรูปทรงกระบอกเกิดการหมุนรอบแกนที่ยึดวัตถุรูปทรงกระบอกเข้ากับรางน้ำเปิด โดยมีปลายด้านล่างลู่ไปตามกระแสน้ำหรือมีการเอียงไปทางด้านท้ายน้ำ ในขณะที่ส่วนปลายด้านบนจะเอียงไปทางด้านเหนือน้ำดังภาพที่ 6

ภาพที่ 6 การไหลของน้ำในรางน้ำเปิดเข้าปะทะกับวัตถุรูปทรงกระบอก

จากรายละเอียดในภาพที่ 6 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีน้ำไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอก จะทำให้วัตถุเกิดการเอียงไปจากแนวดิ่ง ในการหาแรงฉุดที่กระทำกับวัตถุรูปทรงกระบอกที่มีน้ำไหลผ่านด้วยอัตราการไหลต่าง ๆ นั้น จะต้องทำให้วัตถุรูปทรงกระบอกกลับมาตั้งตรงอยู่ในแนวดิ่งเหมือนกับตอนที่ไม่มีน้ำไหลผ่าน ซึ่งสามารถดำเนินการได้โดยการออกแรงตามแนวราบกระทำที่ปลายด้านบนสุดของวัตถุรูปทรงกระบอก โดยแรงดังกล่าวจะมีทิศทางไปทางด้านท้ายน้ำ เมื่อวัตถุรูปทรงกระบอกกลับมาตั้งตรงในแนวดิ่งเช่นเดิม จะพบว่าแรงดังกล่าวจะตั้งฉากกับแกนของวัตถุที่อยู่ในแนวดิ่ง และในทำนองเดียวกันแรงฉุดเนื่องจากการไหลของน้ำก็จะมีทิศทางตั้งฉากกับแกนของวัตถุรูปทรงกระบอกเช่นเดียวกัน สำหรับแนวทางในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าแรงฉุดที่เกิดขึ้นจริงเนื่องจากการไหลผ่านของน้ำ สามารถอธิบายหลักการได้โดยการพิจารณารายละเอียดในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การวิเคราะห์เพื่อหาแรงฉุดที่เกิดขึ้นจริงจากการไหลของน้ำผ่านวัตถุรูปทรงกระบอก

จากภาพที่ 7 (ก) เป็นภาพจำลองเกี่ยวกับแรงฉุดที่กระทำต่อวัตถุรูปทรงกระบอกเนื่องจากการไหลผ่านของน้ำในรางน้ำเปิดที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ซึ่งในการทดลองเพื่อหาค่าแรงฉุดที่เกิดขึ้นกับวัตถุรูปทรงกระบอกที่มีหน้าตัดต่าง ๆ กัน จะดำเนินการโดยการปล่อยให้มีน้ำไหลในรางน้ำเปิดด้วยอัตราการไหล (Q) ที่คงที่ ซึ่งจะทำให้วัตถุรูปทรงกระบอกเอียงไปจากแนวดิ่ง ภาพที่ 7 (ข) แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับการหาค่าแรงฉุด (F) ที่เกิดจากการไหลของน้ำผ่านวัตถุส่วนที่จมอยู่ในน้ำ ซึ่งในทางปฏิบัติจะดำเนินการได้โดยการวัดขนาดของแรงในแนวราบ (w) ที่กระทำ ณ ตำแหน่งปลายด้านบนสุดของวัตถุรูปทรงกระบอกและทำให้วัตถุกลับมาตั้งตรงในแนวดิ่งดังเดิม การที่วัตถุรูปทรงกระบอกสามารถกลับมาตั้งตรงในแนวดิ่งได้นั้น แสดงว่า M_W ซึ่งหมายถึง โมเมนต์ที่เกิดจากแรง w รอบแกนการหมุน o ที่อยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวของวัตถุรูปทรงกระบอก จะมีค่าเท่ากับ M_F ซึ่งหมายถึง โมเมนต์ที่เกิดจากแรงฉุด F รอบแกนการหมุน o

สำหรับแรงฉุด F ที่แสดงในภาพที่ 7 (ข) นั้น หมายถึงแรงลัพธ์ของแรงฉุดทั้งหมดที่กระทำต่อวัตถุส่วนที่จมอยู่ใต้น้ำ โดยมีสมมติฐานว่า แรงฉุดที่เกิดขึ้นจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่ของวัตถุที่จมอยู่ใต้น้ำและได้รับอิทธิพลของแรงฉุดเนื่องจากการไหลผ่านของน้ำ โดยแรงฉุดที่เกิดขึ้นนี้จะมีทิศทางเดียวกับทิศทางการไหลของน้ำ นอกจากนี้แล้วการที่แรงฉุดมีค่าสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่ของวัตถุที่ได้จมอยู่ใต้น้ำจะมีผลทำให้ตำแหน่งของแรงลัพธ์ของแรงฉุด F อยู่ที่จุดศูนย์ถ่วงของวัตถุส่วนที่จมอยู่ใต้น้ำ ซึ่งในกรณีของการศึกษาในครั้งนี้ วัตถุที่ใช้ในการศึกษามีขนาดหน้าตัดสม่ำเสมอและเป็นวัตถุที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ดังนั้นจุดศูนย์ถ่วงของวัตถุส่วนที่จมอยู่ใต้น้ำจึงเปรียบเสมือนเป็นตำแหน่งที่แรง F กระทำ จะอยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำเท่ากับครึ่งหนึ่งของระยะ y ซึ่งเป็นความยาวของวัตถุรูปทรงกระบอกที่จมอยู่ใต้น้ำ

สำหรับโมเมนต์รอบแกนการหมุน o เนื่องจากแรงอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็น โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักของวัตถุ โมเมนต์เนื่องจากแรงลอยตัว หรือโมเมนต์เนื่องจากความดันสถิตย์ที่กระทำต่อวัตถุส่วนที่จมอยู่ใต้น้ำ จะไม่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าแรงฉุดที่เกิดจากการไหลผ่านของน้ำ เนื่องจากว่าวัตถุรูปทรงกระบอกที่ใช้ในการศึกษาจะมีรูปทรงที่มีความสมมาตร ดังนั้นโมเมนต์เหล่านี้รอบแกนการหมุน o จะหักล้างกันไป

ในการหาค่าแรงฉุด (F) ที่เกิดจากการไหลของน้ำผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกสำหรับในแต่ละอัตราการไหล (Q) มีข้อมูลที่ต้องดำเนินการวัดค่าจากการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำ อัตราการไหล (Q) สามารถวัดค่าได้ด้วยการอ่านค่าจากเครื่องมือวัดอัตราการไหลที่ติดตั้งมากับชุดรางน้ำเปิดที่ใช้ในการศึกษา ความลึกการไหล (h) สามารถวัดค่าได้ด้วยการอ่านค่าระดับความสูงของผิวน้ำเหนือท้องน้ำของรางน้ำเปิดจากแถบวัดระยะที่ติดตั้งบริเวณผนังทั้ง 2 ข้างของรางน้ำเปิด และแรงในแนวราบ (w) สามารถวัดค่าโดยการใช้น้ำเปล่าที่ทราบค่าน้ำหนักบรรจุในภาชนะที่มีเชือกเบาร้อยผ่านรอกเดี่ยวที่ปราศจากความฝืดเพื่อเปลี่ยนทิศทางของแรงจากน้ำหนักในแนวดิ่งของน้ำเปล่าให้เป็นแรงในแนวราบ (w) ที่ทำให้วัตถุทรงกระบอกตั้งตรงในแนวดิ่งโดยค่าอุณหภูมิของน้ำจะถูกนำไปใช้ในการหา ความหนืดจลน์ (δ) ของน้ำ ส่วนอัตราการไหล (Q) จะถูกนำไปใช้คำนวณหาค่าความเร็วเฉลี่ย (v) ในการไหลของน้ำจากสมการของการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuity equation)

ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาตัวเลขเรย์โนลด์ (R_e) โดยใช้สมการที่ (4) คือ

$$R_e = \frac{vD}{\delta} \quad (4)$$

เมื่อ D คือ ความกว้างของพื้นที่ผิววัตถุที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (Projection area) [3] ซึ่งวัตถุรูปทรงกระบอกทั้ง 4 รูปแบบที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้จะมี D= 0.10 เมตร และ δ คือ ความหนืดจลน์ (Kinematic viscosity) ของน้ำโดยจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

การหาค่าแรงฉุดที่เกิดขึ้นจริง (F) สามารถพิจารณาจากภาพที่ 7 (ข) กล่าวคือ เมื่อวัตถุรูปทรงกระบอกตั้งตรงอยู่ในแนวดิ่งแสดงว่าโมเมนต์รอบแกนหมุนที่จุด o เนื่องจากแรงฉุด (F) เขียนแทนด้วย M_F จะมีค่าเท่ากับโมเมนต์เนื่องจากแรงที่ทำให้วัตถุตั้งตรงในแนวดิ่ง (w) เขียนแทนด้วย M_w กล่าวคือ

$$M_F = M_w$$

$$F \cdot c = w \cdot L$$

$$F = \frac{w \cdot L}{c}$$

เนื่องจาก

$$c = L - \frac{y}{2}$$

$$y = h - a$$

ดังนั้น

$$c = \frac{2L - h + a}{2}$$

จะได้สมการทั่วไปที่ใช้ในการหาค่าแรงฉุดที่เกิดขึ้นจริงสำหรับการหาค่าแรงฉุดจากการไหลที่มีลักษณะเช่นเดียวกับการศึกษาในครั้งนี้ คือ

$$F = \frac{2wL}{2L - h + a} \quad (5)$$

โดยที่ L คือ ครึ่งหนึ่งของความยาวของวัตถุรูปทรงกระบอกซึ่งเท่ากับ 0.60 เมตร ส่วน a คือ ความสูงของปลายด้านล่างของวัตถุเหนือระดับท้องน้ำ ซึ่งเท่ากับ 0.015 เมตร ดังนั้นจากค่า w และ h ที่วัดค่าได้ จะสามารถคำนวณหาค่าแรงฉุดจากการไหลที่เกิดขึ้นจริง (Actual drag force, F) ที่กระทำต่อวัตถุรูปทรงกระบอกสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ได้จาก

$$F = \frac{1.2w}{1.215 - h} \quad (6)$$

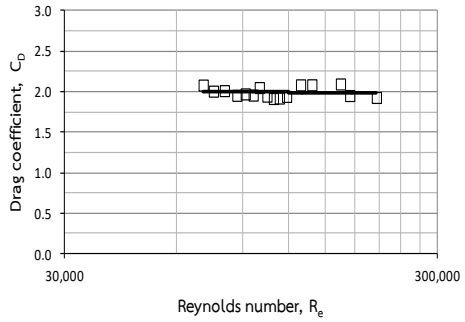
นอกจากนี้แล้วข้อมูลต่าง ๆ ที่วัดค่าได้จะถูกนำไปใช้คำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องไม่ว่าจะเป็นการคำนวณหาแรงฉุดในทางทฤษฎีจากสมการที่ (1) หรือสัมประสิทธิ์ของแรงฉุดจากสมการที่ (3)

4. ผลการศึกษา

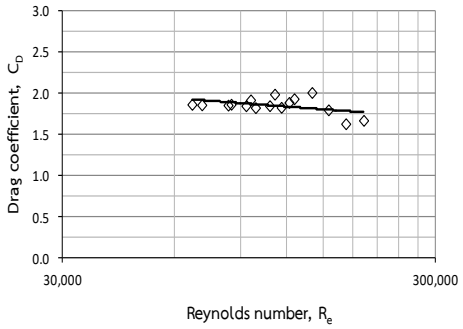
จากการศึกษาพฤติกรรมของแรงฉุดจากการไหลของน้ำผ่านวัตถุที่จมอยู่ในน้ำ โดยการสร้างแบบจำลองวัตถุรูปทรงกระบอกที่ทำจากพลาสติกผิวเรียบและมีน้ำหนักเบาโดยมีลักษณะหน้าตัดแตกต่างกันจำนวน 4 รูปแบบ จากนั้นจึงนำไปติดตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของรางน้ำเปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีกว้าง 0.30 เมตร และมีท้องน้ำอยู่ในแนวราบ สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ที่มีนัยสำคัญต่อการศึกษา ได้ดังนี้

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงฉุดและตัวเลขเรย์โนลด์

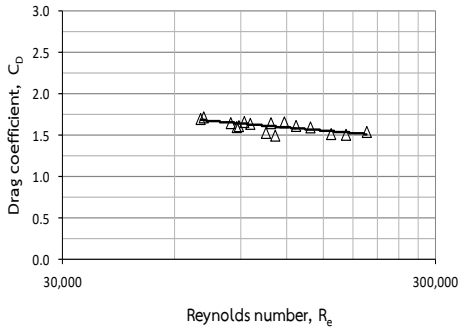
จากการศึกษาการไหลในทางน้ำเปิดผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกในช่วง $60,000 \leq R_e \leq 210,000$ สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงฉุด (C_D) และตัวเลขเรย์โนลด์ (R_e) ของการไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกทั้ง 4 รูปแบบได้ดังภาพที่ 8 ถึงภาพที่ 11



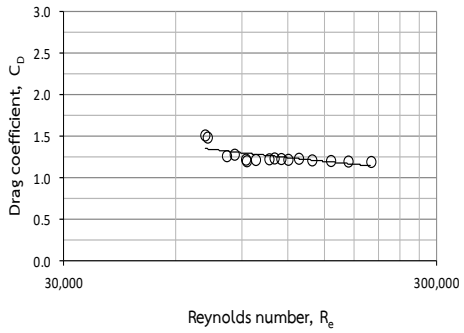
ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงฉุด (C_D) และตัวเลขเรย์โนลด์ (R_e) ของการไหลผ่านทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงฉุด (C_D) และตัวเลขเรย์โนลด์ (R_e) ของการไหลผ่านทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงฉุด (C_D) และตัวเลขเรย์โนลด์ (R_e) ของการไหลผ่านทรงกระบอกหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า

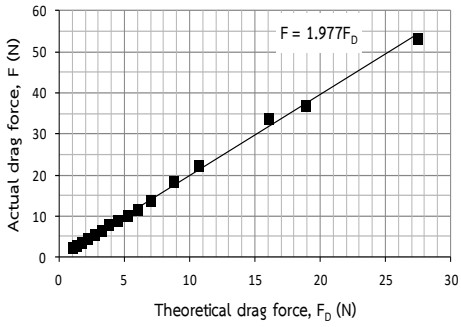


ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงฉุด (C_D) และตัวเลขเรย์โนลด์ (R_e) ของการไหลผ่านทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม

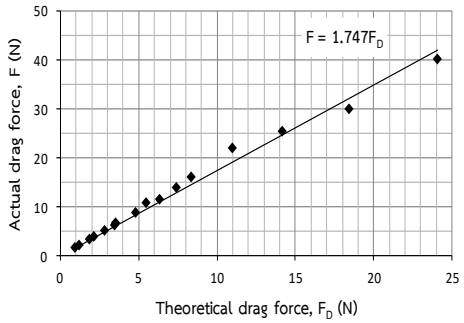
จากภาพที่ 8 ถึงภาพที่ 11 จะเห็นได้ว่าสำหรับการไหลที่มี $60,000 \leq R_e \leq 210,000$ ผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกทั้ง 4 รูปแบบ จะมีสัมประสิทธิ์แรงฉุดลดลงเล็กน้อย ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ในช่วงการไหลที่มีตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ ๆ ความหนืดของของไหลจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุด กล่าวคือ สัมประสิทธิ์แรงฉุดจะมีค่าลดลงเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุด ๆ หนึ่ง การลดลงของสัมประสิทธิ์

แรงฉุดจะมีอัตราการลดลงที่ค่อนข้างน้อย โดยยังพบอีกว่า ในกรณีการไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉากในช่วงที่มีตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดที่ลดลงเล็กน้อยจนเกือบจะคงที่ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของการไหลแบบ 3 มิติ (Three-dimensional flow) บริเวณส่วนท้ายของวัตถุ โดยจะมีผลทำให้อิทธิพลของความหนืดแทบจะไม่มีผลต่อแรงฉุดที่เกิดขึ้น [3, 4]

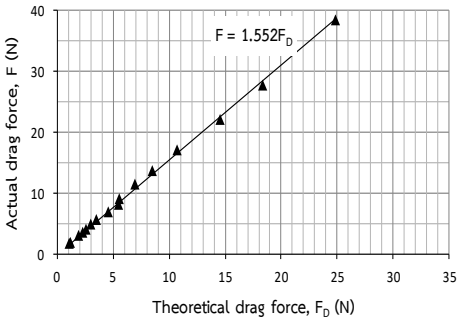
นอกจากนี้ จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าในช่วงการไหลที่มี $60{,}000 \leq R_e \leq 210{,}000$ ผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกทั้ง 4 รูปแบบ ค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดจะมีการเปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อย ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงฉุดโดยใช้แนวคิดที่ได้จากสมการที่ (3) ด้วยการหาค่าความชัน (Slope) ของเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดที่เกิดขึ้นจริง (Actual drag force, F) และแรงฉุดทางทฤษฎี (Theoretical drag force, F_D) ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ (1) ซึ่งแสดงรายละเอียดไว้ในภาพที่ 12 ถึงภาพที่ 15 ดังนี้ คือ



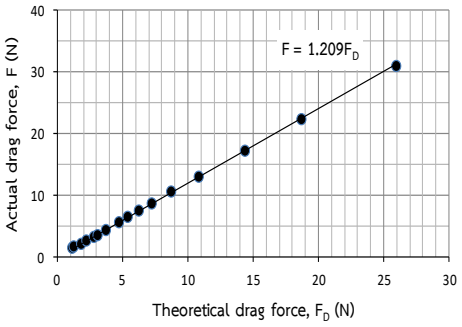
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดที่เกิดขึ้นจริง (F) และแรงฉุดทางทฤษฎี (F_D) ของการไหลผ่านทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดที่เกิดขึ้นจริง (F) และแรงฉุดทางทฤษฎี (F_D) ของการไหลผ่านทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดที่เกิดขึ้นจริง (F) และแรงฉุดทางทฤษฎี (F_D) ของการไหลผ่านทรงกระบอกหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า

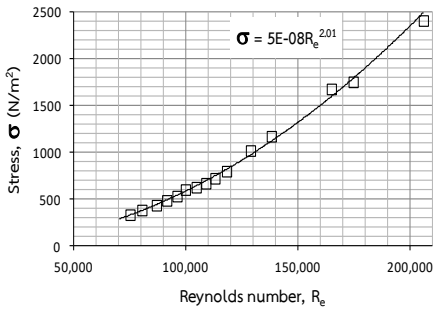


ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดที่เกิดขึ้นจริง (F) และแรงฉุดทางทฤษฎี (F_D) ของการไหลผ่านทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม

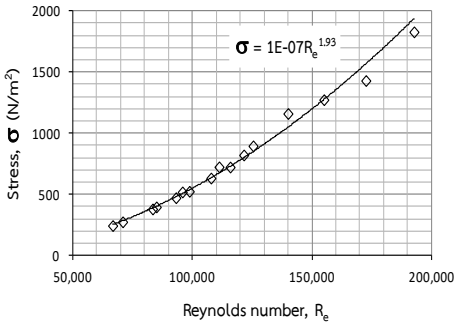
จากภาพที่ 12 - 15 จะพบว่าการไหลในทางน้ำเปิดผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกในช่วง 60,000 $\leq R_e \leq$ 210,000 จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุด (C_D) เท่ากับ 1.977, 1.747, 1.552 และ 1.209 สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก สี่เหลี่ยมคางหมู สามเหลี่ยมด้านเท่า และวงกลม ตามลำดับ

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเนื่องจากแรงฉุดและตัวเลขเรย์โนลด์

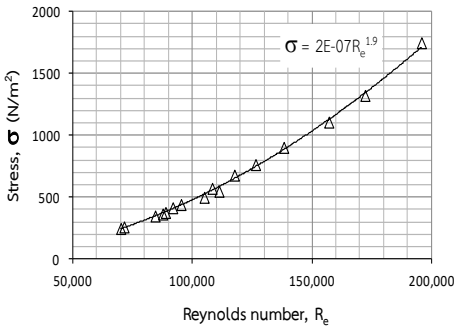
เพื่อที่จะสามารถนำผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ไปใช้เป็นแนวทางในการหาค่าแรงฉุดที่เกิดจากการไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกที่มีลักษณะของหน้าตัดเช่นเดียวกับที่ได้ทำการศึกษาทั้ง 4 รูปแบบ จึงได้มีการนำเอาข้อมูลความเค้นเนื่องจากแรงฉุด (Stress, σ) ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิววัตถุที่จมอยู่ใต้น้ำ และตัวเลขเรย์โนลด์ (R_e) มาแสดงความสัมพันธ์กันเพื่อที่จะสามารถพัฒนาสูตรอย่างง่ายที่ได้จากผลการทดลอง (Empirical formula) ซึ่งสามารถนำไปใช้คำนวณหาแรงฉุดเนื่องจากการไหลที่เกิดขึ้นจริงบนวัตถุที่จมอยู่ในน้ำ ดังแสดงรายละเอียดในภาพที่ 16 - 19



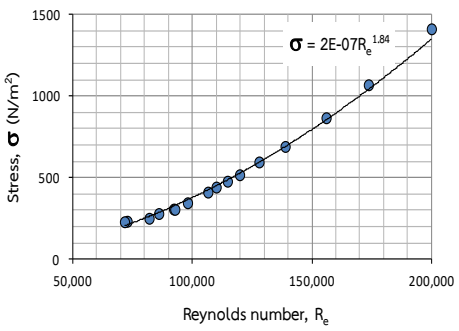
ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจากแรงฉุด (σ) และตัวเลขเรย์โนลด์ (R_e) ของทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจากแรงฉุด (σ) และตัวเลขเรย์โนลด์ (R_e) ของทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจากแรงฉุด (σ) และตัวเลขเรย์โนลด์ (R_e) ของทรงกระบอกหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจากแรงฉุด (σ) และตัวเลขเรย์โนลด์ (R_e) ของทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม

จากความสัมพันธ์ที่ได้ในภาพที่ 16 - 19 จะทำให้ได้สูตรอย่างง่ายที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความเค้นเนื่องจากแรงฉุด (Stress, σ) ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิววัตถุรูปทรงกระบอกที่จมอยู่ใต้น้ำ สำหรับการไหลในช่วงที่มี $60{,}000 \leq R_e \leq 210{,}000$ โดยวัตถุจะมีพื้นผิวที่เรียบหรือมีแรงเสียดทานน้อยและสูตรที่ได้จะเป็นฟังก์ชันกับตัวเลขเรย์โนลด์เพียงตัวแปรเดียว ซึ่งสามารถเขียนในรูปทั่วไป (General form) ได้ดังนี้ คือ

$$\sigma = a \cdot (R_e)^b \qquad (7)$$

เมื่อ a และ b คือ ค่าคงที่ที่ไม่มีหน่วย ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าคงที่สำหรับใช้หาค่าความเค้นเนื่องจากแรงฉุดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิววัตถุทรงกระบอกที่จมอยู่ใต้น้ำ

ลักษณะหน้าตัด	a	b
สี่เหลี่ยมมุมฉาก	5×10^{-8}	2.01
สี่เหลี่ยมคางหมู	1×10^{-7}	1.93
สามเหลี่ยมด้านเท่า	2×10^{-7}	1.90
วงกลม	2×10^{-7}	1.84

หมายเหตุ ค่าคงที่ในสมการที่ (7)

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมของแรงฉุดเนื่องจากการไหลในทางน้ำเปิดที่มีท้องน้ำอยู่ในแนวราบ ซึ่งแรงฉุดที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการไหลของน้ำผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกเดี่ยวที่ตั้งอยู่ในแนวดิ่งจำนวน 4 หน้าตัด ในการศึกษาจะดำเนินการโดยการจำลองสภาพการไหลในรางน้ำเปิดภายในห้องปฏิบัติการ ให้มีอัตราการไหลของน้ำต่าง ๆ กันผ่านแบบจำลองวัตถุรูปทรงกระบอกที่สร้างขึ้นจากแผ่นพลาสติกบาง น้ำหนักเบา มีพื้นผิวที่เรียบและมีแรงเสียดทานที่ผิวน้อยมาก สำหรับในแต่ละอัตราการไหลของน้ำผ่านวัตถุรูปทรงกระบอก จะมีการวัดค่าความลึกการไหลของน้ำก่อนที่จะไหลเข้าสู่วัตถุรูปทรง กระบอกและแรงต้านทานแรงฉุดที่จะทำให้วัตถุทรง กระบอกสามารถตั้งตรงอยู่ในแนวดิ่งได้ เทคนิคที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ จะเป็นการหาค่าแรงฉุดที่เกิดจากการไหลในทางอ้อม โดยใช้หลักการสมดุลของโมเมนต์ที่เกิดจากแรงฉุดที่เกิดขึ้นจริงและโมเมนต์ที่เกิดจากแรงต้านที่จะทำให้วัตถุทรงกระบอกตั้งตรงอยู่ในแนวดิ่ง ซึ่งมีสมมติฐานที่ว่าการกระจายของแรงฉุดเนื่องจากการไหลที่กระทำต่อวัตถุที่จมอยู่ใต้น้ำ จะมีค่าสม่ำเสมอเท่ากันทั่วทั้งพื้นที่ผิวของวัตถุที่ถูกกระทำด้วยแรงฉุด จากข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปใช้คำนวณหาแรงฉุดจากการไหลที่เกิดขึ้นจริงเพื่อใช้ในการเปรียบ เทียบกับแรงฉุดที่คำนวณได้ในทางทฤษฎี ซึ่งจะทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์ของแรงฉุด

จากผลการศึกษาที่ได้จะพบว่าแรงฉุดจากการไหลที่เกิดขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับตัวเลขเรย์โนลด์ เมื่อทำการพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดของวัตถุรูปทรงกระบอกที่มีหน้าตัดใด ๆ ในช่วงการไหลที่มี $60{,}000 \leq R_e \leq 210{,}000$ จะเห็นได้ว่าจะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มลดลงบ้างเล็กน้อย ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในช่วงการไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์เริ่มสูงขึ้น อิทธิพลของความหนืดของของไหลจะเริ่มมีผลต่อแรงฉุดที่น้อยลง อันจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงฉุดมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยพบว่าค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงฉุดเนื่องจากการไหลจะมีค่าเท่ากับ 1.977, 1.747, 1.552 และ 1.209 สำหรับวัตถุรูปทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก หน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู หน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า และหน้าตัดวงกลม ตามลำดับ

โดยเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงฉุดของการไหลผ่านวัตถุที่มีรูปทรง 2 มิติ (Two-dimensional body) ที่มีลักษณะหน้าตัดในรูปแบบเดียวกันจากหลาย ๆ การศึกษาที่ผ่านมา จะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้แล้วจากผลการศึกษาที่ได้ยังสามารถนำไปพัฒนาเป็นสูตรอย่างง่ายของหน่วยแรงฉุดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิววัตถุที่จมอยู่ใต้น้ำ ซึ่งสามารถนำไปใช้คำนวณหาแรงฉุดเนื่องจากการไหลสำหรับสภาพเงื่อนไขของการไหลในลักษณะเดียวกับที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

จากแนวคิดหรือเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาและผลที่ได้รับจากการศึกษาในครั้งนี้ สามารถนำไปใช้ในการหาค่าแรงฉุดที่เกิดจากการไหลหรือตัวแปรที่เกี่ยวข้องด้วยวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาที่ได้กับการศึกษาที่ผ่านมา จะพบว่าได้ผลการศึกษาอย่างเป็นที่เป็นที่น่าพอใจ ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถนำแนวทางที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ไปพัฒนาให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้น จึงควรจะนำไปพิจารณาเพื่อดำเนินการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป เช่น การดำเนินการศึกษาเพิ่มเติมในสภาพการไหลที่มีตัวเลขเรย์โนลด์แตกต่างไปจากการศึกษาในครั้งนี้ การเพิ่มรูปแบบของหน้าตัดวัตถุรูปทรงกระบอกให้มีความหลากหลาย การปรับเปลี่ยนลักษณะของพื้นผิววัตถุ หรือ การปรับเปลี่ยนวิธีการวัดค่าแรงฉุดจากการไหลที่เกิดขึ้นจริงโดยการใช้หลักการวัดความดันที่พื้นผิวของวัตถุ เป็นต้น

6. เอกสารอ้างอิง

[1] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Hydrodynamic forces on inundated bridge decks. Publication No. FHWA-HRT-09-028. 1st ed. McLean; 2009.

[2] Fox RW, McDonald AT. Introduction to fluid mechanics. 5th ed. New York: John Wiley and Sons; 1999.

[3] Daugherty RL, Franzini JB. Fluid mechanics with engineering applications. 7thed. Singapore: McGraw-Hill International Book Company; 1984.

[4] Streeter VL, Wylie EB. Fluid mechanics. 1st ed. Toronto: McGraw-Hill International Book Company; 1981.

[5] Bouak F, Lemnay J. Passive control of the aerodynamic forces acting on circular cylinder. Fluid Sci. 1998; 16: 112-21.

[6] Tsutsui T, Igarashi T. Drag reduction of a circular cylinder in an air-stream. J Wind Eng Ind Aerod. 2002; 90(4-5): 527-41.

[7] Chairul I, Lutfi M, Basuki W, et al. Mathematical modeling of drag coefficient reduction in circular cylinder using two passive controls at Re = 1000. Journal of Mathematical and Computation Application. 2018; 23(2): 1-8.

[8] Chairul I, Basuki W, Tri YY. Reduction of C_d in circular cylinder using two passive controls at Re = 1000 and 5000. J Phys : Conference Series. 2018; 974(1): 1-9.

[9] Aiba S, Watanabe H. Flow characteristics of a bluff body cut from a circular cylinders. J Fluid Eng. 1997; 119(2): 453-4.

[10] Achenbach E. Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder. J Fluid Mech. 1971; 46(2): 321-35.

[11] Nakamura Y, Tomonari Y. The effects of surface roughness on the flow pass circular cylinders at high Reynolds numbers. J Fluid Mech. 1982; 123: 363-8.

[12] Bearman PW, Harvey JK. Control of circular cylinder flow by the use of dimples. AIAA Journal. 1993; 31 (10): 1753-6.

[13] Kimura T, Tsutahara M. Fluid dynamic effects of grooves on circular cylinder surface. AIAA Journal. 1991; 29(12): 2062-8.

[14] Huang S, Clelland D, Day S, et al. drag reduction of deepwater risers by the use of helical groovers. ASME 2007 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering: 2007 June 10–15; San Diego, California, USA . ASME; 2007. 1. P.561-5.

[15] Bo Z, Xikun W, Wie MG, et al. Force and flow characteristics of circular cylinder with uniform surface roughness at subcritical Reynolds numbers. Journal of Applied Ocean Research. 2015; 49: 20-6.

[16] Monalisa M, Kurmar A. Study on drag coefficient for the flow past a cylinder. Int J Civ Eng Res. 2014; 5: 301-6.