

การศึกษาสัมประสิทธิ์ความเร็วในการทดลองแก๊งก์น้ำของทอริเชลลี



ปริญญาบัตร

ของ

สุทธินี อภิวัฒน์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

เมษายน 2561

การศึกษาสัมประสิทธิ์ความเร็วในการทดลองแก๊งก์น้ำของทอริเชลลี



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

เมษายน 2561

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาสัมประสิทธิ์ความเร็วในการทดลองแก๊งก์น้ำของทอริเชลลี



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

เมษายน 2561

สุทธิณี อภิวันท์. (2561). การศึกษาสัมประสิทธิ์ความเร็วในการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเซลลี.

ปริญญาานิพนธ์ กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์: อาจารย์ ดร.สุพิชญ์ แคมมณี, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โชคชัย พุทธรักษา.

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อการศึกษาสัมประสิทธิ์ความเร็วในการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเซลลีและศึกษาการจัดการเรียนรู้เชิงรุก เรื่อง การทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเซลลี จากการศึกษาสัมประสิทธิ์ความเร็วในการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเซลลีโดยใช้สมการของทอร์ริเซลลีและการเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์สำหรับรูเปิดประเภทขอบคมและขอบกึ่งคม พบว่า สัมประสิทธิ์ความเร็วของรูเปิดในระดับต่างๆ มีแนวโน้มเหมือนกัน โดยในกรณีที่ระดับน้ำสูงๆ ลำน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดจะมีลักษณะการไหลแบบโพรง และสัมประสิทธิ์ความเร็วจะมีค่าคงที่โดยประมาณโดยมีค่าประมาณ 1 สำหรับรูเปิดประเภทขอบคม ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ความเร็วในกรณีของของไหลอุดมคติและมีค่าประมาณ 0.85 สำหรับรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม เมื่อระดับน้ำลดลงเข้าไปใกล้รูเปิดมากขึ้น สัมประสิทธิ์ความเร็วจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากลำน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดในช่วงนี้มีลักษณะการไหลแบบแนบติด ในช่วงที่สัมประสิทธิ์ความเร็วกำลังลดลงนี้ สัมประสิทธิ์ความเร็วของรูเปิดประเภทขอบคม ก็ยังคงมากกว่าของรูเปิดประเภทขอบกึ่งคมที่ระดับรูเปิดเดียวกันเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากผนังของรูเปิดประเภทขอบคมจะบางกว่าประเภทขอบกึ่งคมอยู่พอสมควร นอกจากนี้ผู้วิจัยยังสามารถหาสมการของสัมประสิทธิ์ความเร็วที่สอดคล้องกับการทดลองได้ โดยการวิเคราะห์สมการแบร์นูลลีที่คิดการสูญเสียพลังงานร่วมด้วย

ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้ผลการทดลองแท็งก์น้ำทอร์ริเซลลี เพื่อใช้ในการจัดการเรียนรู้เชิงรุกแบบการใช้ปัญหาเป็นฐาน ผู้วิจัยได้จัดทำคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเซลลี สำหรับผู้เรียนในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายและระดับอุดมศึกษา ซึ่งได้ผ่านการประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน โดยได้ผลอยู่ที่ระดับ 0.95 (ดีมาก) ในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ผู้วิจัยจัดทำคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเซลลีเฉพาะรูเปิดประเภทขอบคม เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งส่งผลให้ระยะทางการตกของน้ำจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับระยะทางที่คำนวณได้จากทฤษฎีสำหรับของไหลอุดมคติ สำหรับระดับอุดมศึกษา ผู้วิจัยแนะนำให้ใช้รูเปิดประเภทขอบกึ่งคมร่วมกับรูเปิดประเภทขอบคม เพื่อให้ผู้เรียนเข้าใจหลักการของสัมประสิทธิ์ความเร็วในการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเซลลีมากขึ้น

STUDY OF VELOCITY COEFFICIENT IN TORRICELLI'S TANK EXPERIMENT

AN ABSTRACT

BY

SUTTINEE APIWAN

Presented in Partial Fulfilment of the Requirements for the
Master of Education Degree in Physics
at Srinakharinwirot University

April 2018

Suttinee Apiwan. (2018). *Study of Velocity Coefficient in Torricelli's Tank Experiment*. Thesis, M.Ed. (Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Thesis Advisor: Supitch Khemmani, Ph.D., Co-advisor: Asst. Prof. Chokchai Puttharugsa.

This research aims to study the velocity coefficient in the tank experiment by Torricelli and to prepare active learning through this experiment. By using the equation of Torricelli and projectile motion in the case of sharp edged and semi-sharp edged orifices, the velocity coefficient of both orifice types were found to behave in a similar fashion for all orifice heights. At high water levels, jet flow through an orifice is a cavitated flow type with an approximately constant velocity coefficient of a value of one for the sharp edged orifices, which are the velocity coefficient in the case of an ideal fluid, and about 0.85 for the semi-sharp edged orifices. When the water level approaches an orifice, the velocity coefficient is apparently decreased due to the fact that the jet flow through the orifice becomes the attached flow type. During this decrease, the velocity coefficient of a sharp edged orifice is mostly greater than that of semi-sharp edged orifices at the same orifice height due to the thickness of sharp edged orifices being smaller than that of semi-sharp edged orifices. Moreover, by analyzing the equation of Bernoulli with losses, the velocity coefficient is derived analytically and it fits well with our experimental data.

Based on the experimental results of the tank experiment, active learning can be designed by using problem-based learning approaches. As a result, instructional manual may then be developed for both high school students and university undergraduates. The content validity of our instructional manual using Index of Item-objective Congruence (IOC) was evaluated by three experts at 0.95. For the high school level, only sharp edged types of orifices were chosen because the velocity coefficient in this case was around one, and the water falling distance obtained from the experiment was close to that of the theory of an ideal fluid. For undergraduate students, both types of orifices were used in order to help students understand how the concept of the velocity coefficient works in the tank experiment of Torricelli.

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
การศึกษาสัมประสิทธิ์ความเร็วในการทดลองแท่งก้ำน้ำของทอริเชลลี
ของ
สุทธิณี อภิวันท์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ คณะกรรมการสอบปากเปล่า
.....ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(อาจารย์ ดร.สุพิชญ์ แคมมณี) (อาจารย์ ดร.วัชร เลี้ยวเรียน)

.....ที่ปรึกษาร่วม กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โชคชัย พุทธรักษา) (อาจารย์ ดร.สุพิชญ์ แคมมณี)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โชคชัย พุทธรักษา)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงศักดิ์ พงษ์ศิริบุญ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สุนันทา มนัสมงคล)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ ดร.สุพิชญ์ แหม่มณี อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โชคชัย พุทธรักษา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่มอบโอกาสและการสนับสนุนในการจัดทำปริญญานิพนธ์นี้ รวมทั้งให้คำแนะนำและแนวคิดต่างๆ มาโดยตลอด ผู้วิจัยซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.วัชร เลี้ยวเรียน และ อาจารย์ ดร.สุนันทา มนัสมงคล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นคณะกรรมการในการสอบปากเปล่า (ปริญญานิพนธ์) รวมทั้งให้คำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและประสิทธิ์ประสาทวิชาตลอดระยะเวลาของการศึกษา จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.สุรจภูมิ วิจารณ์ อาจารย์ ดร. สุวรรณ พลอยพิชิต และรองศาสตราจารย์มณฑิ ภูฎาการ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นผู้เชี่ยวชาญในการประเมินคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอริเชลลี ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณนายณรัตน์ เจริญวโรดม รองประธาน บริษัท เทคนิค แอ็ดเวอร์ไทซ์ จำกัด ผู้ให้ความอนุเคราะห์และช่วยเหลือในการจัดทำและซ่อมบำรุงเครื่องมือการทดลองแท็งก์น้ำของทอริเชลลี และขอขอบคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำหรับทุนสวสค.

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของผู้วิจัยที่ให้การส่งเสริมและสนับสนุนในทุกๆเรื่อง อีกทั้งยังเป็นกำลังใจให้เสมอมา

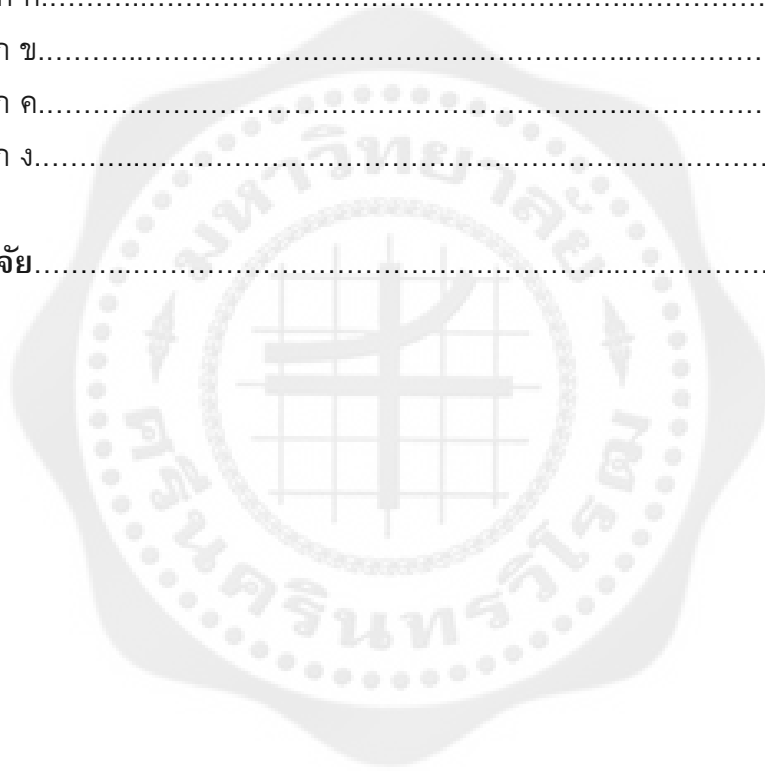
สุทธินี อภิวัฒน์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายในการวิจัย.....	2
ความสำคัญของการวิจัย.....	3
ขอบเขตในการทำวิจัย.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
ของไหล (Fluid)	4
สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)	7
สมการแบร์นูลลี (Bernoulli equation)	8
การทดลองแท็งก์น้ำของทอริริเซลลี (Torricelli's tank experiment)	12
กระบวนการการเรียนรู้เชิงรุก (Active Learning) และการใช้ปัญหา เป็นฐาน (Problem based learning)	17
3 วิธีการดำเนินวิจัย	23
การออกแบบและการสร้างเครื่องมือการทดลองแท็งก์น้ำของทอริริเซลลี.....	23
ขั้นตอนการทดลองแท็งก์น้ำของทอริริเซลลี.....	26
การหาสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการทดลองแท็งก์น้ำของทอริริเซลลี.....	27
การหาสัมประสิทธิ์ความเร็วทางทฤษฎีจากสมการแบร์นูลลีที่คิดการสูญเสีย พลังงาน	29
การสร้างคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอริริเซลลี.....	30
4 ผลการทดลอง	32
ผลการทดลองเพื่อหาสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการทดลองแท็งก์น้ำของ ทอริริเซล.....	32
ผลการทดลองเพื่อหาสัมประสิทธิ์ความเร็วจากทฤษฎี.....	35
ผลการทดลองเพื่อหาเลขเรย์โนลด์.....	39
ผลการประเมินคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอริริเซลลีโดยผู้เชี่ยวชาญ.....	42

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง.....	44
บรรณานุกรม.....	46
ภาคผนวก.....	49
ภาคผนวก ก.....	50
ภาคผนวก ข.....	67
ภาคผนวก ค.....	93
ภาคผนวก ง.....	232
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	234



บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	แสดงเลขเรย์โนลด์ของรูปแบบการไหลต่าง ๆ	7
2	แสดงค่า α_2 และ l ของรูเปิดประเภทขอบกึ่งคมและขอบคม ที่ระดับรูเปิด 10, 35, และ 60 ซม.....	37
3	ตารางแสดงค่าเฉลี่ยผลการประเมินความเหมาะสมขององค์ประกอบต่างๆ ในคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอริเชลลี ทั้ง 6 ด้าน.....	43



บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แสดงรูปประกอบคำถาม.....	1
2 แสดงรูปร่างที่ไม่แน่นอนของของเหลวซึ่งเปลี่ยนตามภาชนะบรรจุ.....	4
3 จำลองเส้นกระแสของอนุภาคในของไหล และความเร็วของอนุภาคที่มีทิศ ในแนวเส้นสัมผัส.....	5
4 จำลองหลอดการไหล โดยอนุภาคไม่สามารถไหลออกนอกหลอดการไหลได้.....	6
5 แสดงรูปแบบการไหลของของไหล (ก) การไหลแบบราบเรียบ (ข) การไหล แบบปั่นป่วน.....	6
6 จำลองการไหลในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ.....	8
7 พิจารณาของไหลที่ไหลผ่านท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ.....	9
8 การพิจารณาความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดในการทดลองแท็งก์น้ำของ ทอร์ริเชลลี.....	10
9 ของเหลวที่ไหลออกจากก้นด้านข้างขนาดเล็กของแท็งก์น้ำ.....	12
10 แท็งก์น้ำแบบต่าง ๆ ที่ใช้ประกอบการคำนวณ.....	13
11 จำลองลักษณะการไหลของของไหลเมื่อไหลผ่านขอบกั้นขนาดเล็ก (ก) การไหลแบบแนบติด (ข) การไหลแบบโพรง	13
12 การติดตั้งการทดลองของเปาโลและแอนโทนีโอ.....	14
13 แสดงการจำลองการติดตั้งการทดลองของคาลเวอร์ท์.....	14
14 (ก) ของเหลวไหลผ่านรูเปิด (ข) ของเหลวไหลผ่านรูเปิดเมื่อเทียบกับทฤษฎี.....	15
15 แสดงการไหลของของไหลผ่านรูเปิดประเภทต่าง ๆ (ก) ขอบคม (ข) ขอบไหลเหลี่ยม (ค) ขอบเหลี่ยม พร้อมทั้งแสดงค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 3 ชนิด	16
16 แสดงส่วนประกอบของการเรียนรู้เชิงรุกทั้ง 3 ส่วน.....	17
17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการจัดกิจกรรมการเรียนรู้แบบการใช้ปัญหา เป็นฐานกับส่วนประกอบทั้ง 3 ของการเรียนรู้เชิงรุก.....	22
18 (ก) จำลองการสร้างส่วนของแท็งก์น้ำ (ข) แสดงภาพด้านข้างของรูเปิด ประเภทขอบกั้นคม (ซ้าย) และขอบคม (ขวา)	24
19 จำลองการตัดแผ่นอะคลีริกในการสร้างส่วนรองรับน้ำ.....	24
20 จำลองการสร้างส่วนรองรับน้ำ.....	24
21 จำลองการสร้างส่วนโครงเหล็กรองรับน้ำ.....	25

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
22 จำลองการสร้างส่วนโครงเหล็กรองรับแท้งก์น้ำ.....	25
23 แสดงชุดการทดลองแท้งก์น้ำของทอร์ริเชลลี.....	25
24 แสดงการใช้ระดับน้ำตั้งชุดการทดลองให้อยู่ในแนวตั้ง.....	26
25 แสดงระดับน้ำนิ่งที่ระยะเกิน 100 ซม.	26
26 แสดงการเปิดจุกอย่างทีละระดับรูเปิด 5 ซม.	26
27 แสดงการวัดระยะตกของน้ำ.....	27
28 แสดงการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองแท้งก์น้ำของทอร์ริเชลลี	27
29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเร็ว (C_v) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับระดับรูเปิด (x) กรณีรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม (จุดสี่เหลี่ยม) และขอบคม (จุดกลม) (ก) รูเปิด (h) 10 ซม. (ข) รูเปิด (h) 35 ซม. (ค) รูเปิด (h) 60 ซม.	33
30 แสดงการไหลของลำน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม ที่มีลักษณะการไหลแบบโพรงที่ระดับรูเปิด 40 ซม. และระดับน้ำในช่วง 80-100 ซม.	34
31 แสดงการไหลของลำน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม ที่มีลักษณะการไหลแบบแนบติดที่ระดับรูเปิด 40 ซม. และระดับน้ำในช่วง 40-60 ซม.	34
32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกำลังสอง (u^2) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับรูเปิด (x) จากทฤษฎีของทอร์ริเชลลี (เส้นทึบ) เทียบกับการทดลองสำหรับรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม (จุดโปร่ง) และขอบคม (จุดทึบ) (ก) รูเปิด (h) 10 ซม. (ข) รูเปิด (h) 35 ซม. (ค) รูเปิด (h) 60 ซม.	36
33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเร็ว (C_v) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับระดับรูเปิด (x) กรณีรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม (จุดโปร่ง) และขอบคม (จุดทึบ) เทียบกับทฤษฎี (เส้นทึบ) (ก) รูเปิด (h) 10 ซม. (ข) รูเปิด (h) 35 ซม. (ค) รูเปิด (h) 60 ซม.	39
34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ (Re) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับระดับรูเปิด (x) กรณีรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม (จุดโปร่ง) และขอบคม (จุดทึบ) เทียบกับทฤษฎี (เส้นทึบ) (ก) รูเปิด (h) 10 ซม. (ข) รูเปิด (h) 35 ซม. (ค) รูเปิด (h) 60 ซม. (ดูภาคผนวก ข. สำหรับกรณีรูเปิดอื่นๆ)	41

บทที่ 1

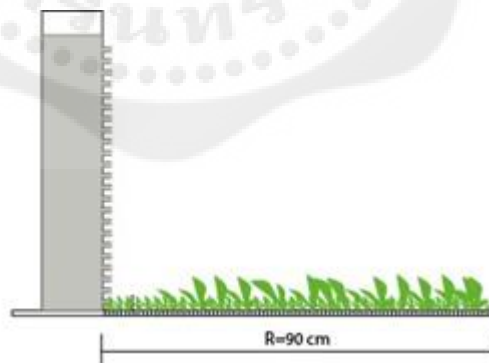
บทนำ

ภูมิหลัง

ความรู้เรื่องกลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) เป็นความรู้พื้นฐานที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการบริหารจัดการเรื่องการอุปโภคและบริโภคของมนุษย์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน รวมไปถึงด้านอุตสาหกรรม ซึ่งเครื่องจักรและกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมนั้น มักจะประกอบด้วยของไหล เช่น เครื่องปรับอากาศ ระบบน้ำ เป็นต้น ดังนั้นการทำความเข้าใจในพื้นฐานของกลศาสตร์ของไหลจึงเป็นสิ่งจำเป็น ที่ผ่านมานั้นความรู้เรื่องกลศาสตร์ของไหลมีวิวัฒนาการโดยอาศัยการศึกษาค้นคว้าของนักวิทยาศาสตร์ นักคณิตศาสตร์ และนักฟิสิกส์ (ผศ.มัชฌิมา ฐนพิมพ์สาร, 2555: 16-20) โดยผู้ได้รับการยกย่องคนหนึ่งนั้นคือ อีแวนเกลิสตา ทอรรีเซลลี (Evangelista Torricelli)

อีแวนเกลิสตา ทอรรีเซลลี นักฟิสิกส์ชาวอิตาลีผู้มีชีวิตอยู่ในช่วงคริสต์ศักราช 1608-1647 เป็นผู้ประดิษฐ์คิดค้นบารอมิเตอร์ (barometer) อีกทั้งยังค้นพบหลักการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของเหลว (v) ที่ไหลผ่านรูเปิด (orifice) กับระดับความสูงของผิวของของเหลวเทียบกับระดับรูเปิด (h) ตามสมการ $v = \sqrt{2gh}$

ผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาการหาระยะทางการตกของน้ำที่ไหลที่สุด ซึ่งสัมพันธ์กับระดับน้ำและระดับรูเปิด โดยตั้งคำถามว่า “ถ้าเราต้องการรดน้ำแปลงผักที่มีความยาว 90 เซนติเมตร จะต้องใส่น้ำเท่าไรและเปิดรูไหน จึงจะสามารถรดน้ำแปลงผักได้ทั้งหมด โดยใช้ระดับน้ำต่ำที่สุด” ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 แสดงรูปประกอบคำถาม

จากการคำนวณพบว่า “สำหรับระดับน้ำหนึ่งๆ ระยะทางการตกของน้ำที่ไหลที่สุดจะมีค่าเท่ากับระดับน้ำที่ใส่ เมื่อเปิดรูตรงกลาง”

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างชุดการทดลองแท็งก์น้ำทอร์ริเชลลี เพื่อทำการทดลองวัดระยะทางการตกของน้ำ ที่ไหลผ่านรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม (semi-sharp edge) พบว่าระยะทางการตกของน้ำมีค่าน้อยกว่าอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับทฤษฎีสำหรับของไหลอุดมคติ (ideal fluid) เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานระหว่างการไหล เพื่อที่จะอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ผู้วิจัยจึงศึกษาสัมประสิทธิ์ความเร็ว (velocity coefficient) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดทั้งประเภทขอบกึ่งคมและขอบคม (sharp edge) ที่ระดับน้ำต่าง ๆ จากการทดลองพบว่า สัมประสิทธิ์ความเร็วมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อระดับน้ำเข้าใกล้รูเปิด นอกจากนี้ผู้วิจัยยังสามารถหาสมการสัมประสิทธิ์ความเร็ว ที่สอดคล้องกับการทดลองได้ โดยการวิเคราะห์สมการแบร์นูลลีที่คิดการสูญเสียพลังงานร่วมด้วย

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ความเร็วของรูเปิดประเภทขอบคม มีแนวโน้มมากกว่าสัมประสิทธิ์ความเร็วของรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม ที่ระดับเดียวกัน ผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์ใช้ผลการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี เพื่อใช้ในการจัดการเรียนรู้เชิงรุก (active learning) แบบการใช้ปัญหาเป็นฐาน (problem based learning) ซึ่งผู้วิจัยได้จัดทำคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี สำหรับผู้เรียนระดับมัธยมศึกษาตอนปลายและระดับอุดมศึกษา โดยระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ผู้วิจัยทำคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำทอร์ริเชลลี เฉพาะการใช้รูเปิดประเภทขอบคม เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งส่งผลให้ระยะทางการตกของน้ำจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีสำหรับของไหลอุดมคติ มากกว่าการตกของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม สำหรับระดับอุดมศึกษา ผู้วิจัยได้จัดทำบทปฏิบัติการแท็งก์น้ำทอร์ริเชลลี โดยผู้วิจัยแนะนำให้ใช้รูเปิดประเภทขอบกึ่งคมร่วมกับรูเปิดประเภทขอบคม เพื่อให้ผู้เรียนเข้าใจหลักการของสัมประสิทธิ์ความเร็วในการทดลองแท็งก์น้ำทอร์ริเชลลีเพิ่มขึ้น

ความมุ่งหมายในการวิจัย

1. เพื่อวัดและคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วในการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี สำหรับรูเปิดทั้งประเภทขอบกึ่งคมและขอบคม
2. เพื่อจัดทำคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำทอร์ริเชลลี สำหรับใช้ประกอบการเรียนการสอนในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายและระดับอุดมศึกษา

ความสำคัญของการวิจัย

ทำการทดลองและเข้าใจหลักการทางฟิสิกส์ของการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี พร้อมทั้งนำหลักการที่ได้ไปประยุกต์ใช้เพื่อจัดทำคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี สำหรับประกอบการเรียนการสอนในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายและระดับอุดมศึกษา

ขอบเขตในการทำวิจัย

1. ทำการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วในการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์รีเซลลี สำหรับเปิดประเภทขอบกึ่งคมและขอบคม
2. วิเคราะห์และพิจารณาความหมายทางฟิสิกส์ของผลการทดลอง พร้อมทั้งจัดทำคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำทอร์รีเซลลี สำหรับการเรียนการสอนในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายและระดับอุดมศึกษา



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตามหัวข้อ ดังต่อไปนี้

1. ของไหล (Fluid)
2. สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)
3. สมการแบร์นูลลี (Bernoulli equation)
4. การทดลองแท็งก์น้ำของทอริริเซลลี (Torricelli's tank experiment)
5. กระบวนการการเรียนรู้เชิงรุก (Active Learning) และการใช้ปัญหาเป็นฐาน

(Problem based learning)

1. ของไหล (Fluid)

สสารในสภาพปกติมี 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ที่อุณหภูมิหนึ่งของแข็งมีรูปร่างและปริมาตรคงตัว ถ้าถูกแรงไม่มากอัด ส่วนของเหลวจะมีปริมาตรคงตัวและมีรูปทรงตามภาชนะที่บรรจุ ดังภาพประกอบ 2 และปริมาตรจะลดลงเล็กน้อยเมื่อถูกแรงอัด ส่วนแก๊สมีรูปร่างและปริมาตรไม่คงตัว ปริมาตรของแก๊สขึ้นอยู่กับปริมาตรภาชนะที่บรรจุ แก๊สมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมากกว่าของเหลวมาก แม้อุณหภูมิจะเปลี่ยนเพียงเล็กน้อยก็ตาม แต่เนื่องจากของเหลวและแก๊สมีรูปร่างไม่แน่นอน อีกทั้งสามารถไหลจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งได้ จึงสามารถเรียกของเหลวและแก๊สว่า ของไหล (Fluid)



ภาพประกอบ 2 แสดงรูปร่างที่ไม่แน่นอนของของเหลวซึ่งเปลี่ยนตามภาชนะบรรจุ

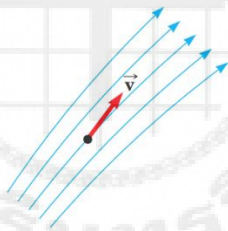
ที่มา: Natkamol Chand. (2558: ออนไลน์).

1.1. คุณสมบัติของของไหลในอุดมคติ

- 1) เป็นการไหลโดยไม่หมุน (Irrotational flow) คือ การไหลที่ไม่มีการไหลวนรอบจุดใด ๆ ในของไหล
- 2) เป็นการไหลที่ไม่มีแรงต้านเนื่องจากความหนืด (Inviscid flow) กล่าวคือ ไม่มีความเสียดทานภายในเนื้อของไหล
- 3) ไม่สามารถอัดได้ (Incompressible flow) คือ ในทุกๆ ส่วนของของไหลมีความหนาแน่นคงตัว

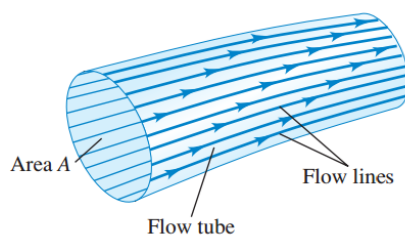
1.2. การไหลของของไหลในอุดมคติ

ในของไหลที่ไหลอย่างสม่ำเสมออนุภาคหนึ่ง ๆ ของของไหลจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางเดินเส้นหนึ่งเรียกว่า เส้นกระแส (streamline) โดยความเร็วของอนุภาคนั้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ มีทิศในแนวเส้นสัมผัส ณ ตำแหน่ง ภาพประกอบ 3 และเส้นกระแสของอนุภาคแต่ละเส้นจะไม่ตัดกัน ถ้าเส้นกระแสจำนวนหนึ่งอยู่เรียงกันเป็นมัด ภาพประกอบ 4 เรียกมัดของเส้นกระแสนี้ว่า หลอดของของไหล (tube of flow) หลอดการไหลนี้จึงเสมือนท่อที่มีของไหลไหลเข้าทางปลายข้างหนึ่งและไหลออกทางปลายอีกข้างหนึ่ง



ภาพประกอบ 3 จำลองเส้นกระแสของอนุภาคในของไหล และความเร็วของอนุภาคที่มีทิศในแนวเส้นสัมผัส

ที่มา: serway; & Jewett. (2008: 400).



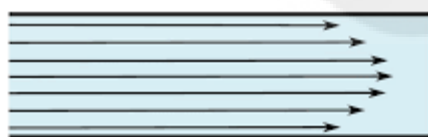
ภาพประกอบ 4 จำลองหลอดการไหล โดยอนุภาคไม่สามารถไหลออกนอกหลอดการไหลได้

ที่มา: Young; & Freedman. (2000: 400).

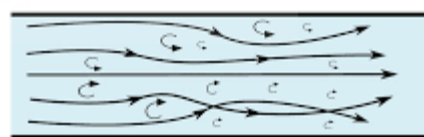
1.3. รูปแบบการไหลของของไหล

1) การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) คือ รูปแบบการไหลที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบ ไม่มีการผสมกันระหว่างชั้นของไหล ลักษณะการไหลแบบนี้ โดยทั่วไปเกิดขึ้นกับของไหลที่มีความหนืด (viscosity) สูงและไหลด้วยความเร็วต่ำ หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ของไหลไหลผ่านมีขนาดใหญ่มาก ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของไหลที่ไหลภายในท่อ ดังภาพประกอบ 5(ก)

2) การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) โดยทั่วไปเกิดขึ้นกับของไหลที่มีค่าความหนืด (viscosity) ต่ำและไหลด้วยความเร็วสูง หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ของไหลไหลผ่านมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของไหลที่ไหลภายในท่อ รูปแบบการไหลของของไหลมีทิศทางและความเร็วที่ไม่แน่นอน และมีการผสมกันระหว่างชั้นของไหลในขณะที่เคลื่อนที่ ดังภาพประกอบ 5(ข)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 5 แสดงรูปแบบการไหลของของไหล (ก) การไหลแบบราบเรียบ (ข) การไหลแบบปั่นป่วน

ที่มา: Young; & Freedman. (2012: 390).

1.4 เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number: Re)

เลขเรย์โนลด์ไม่มีหน่วย และมีความสำคัญอย่างมาก กล่าวคือเลขเรย์โนลด์นี้ใช้เป็นตัวกำหนดรูปแบบการไหลของของไหลว่าเป็นแบบใด ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$Re = \frac{ud}{\nu} = \frac{ud\rho}{\mu} \quad (2.1)$$

เมื่อ	u	คือ	ความเร็วของของไหล (เมตร/วินาที)
	d	คือ	ระยะทางหรือความยาว (เมตร)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
	μ	คือ	ความหนืดพลวัตของของไหล (พาสคัล·วินาที)
	ν	คือ	ความหนืดจลน์ของของไหล (ตารางเมตร/วินาที)

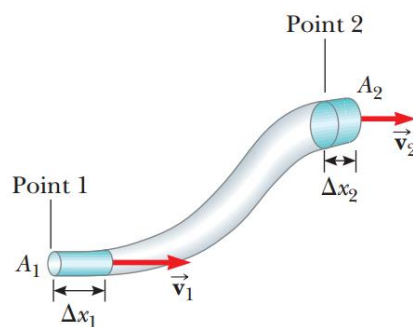
ตาราง 1 แสดงเลขเรย์โนลด์ของรูปแบบการไหลต่างๆ เลขเรย์โนลด์ของการไหลในช่วง 2000 ถึง 4000 เป็นช่วงรอยต่อระหว่างสภาวะการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน เรียกว่า การไหลแบบช่วงต่อ (transition flow)

เลขเรย์โนลด์	รูปแบบการไหล
ต่ำกว่า 2000	การไหลแบบราบเรียบ
2000-4000	การไหลแบบช่วงต่อ
มากกว่า 4000	การไหลแบบปั่นป่วน

ตาราง 1 แสดงเลขเรย์โนลด์ของรูปแบบการไหลต่าง ๆ

2. สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

สมการความต่อเนื่องเป็นสมการที่นิยมใช้ในศึกษาการไหลของของไหลภายในท่อ การไหลของของไหลในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอไหลจากจุดที่ 1 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A_1 ไปยังจุดที่ 2 พื้นที่หน้าตัด A_2 ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 จำลองการไหลในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ

ที่มา: Serway; & Jewett. (2008: 400).

จากภาพประกอบ 6 แสดงการไหลในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ เมื่อของไหลอุดมคติไหลอย่างสม่ำเสมอผ่านหลอดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน ปริมาตรที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด A_1 ในเวลา Δt จะเท่ากับปริมาตรที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด A_2 ในเวลา Δt ที่เท่ากัน นั่นคือ มวลของของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด A_1 ในเวลา Δt คือ $\Delta m_1 = \rho A_1 v_1 \Delta t$ จะเท่ากับมวลของของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด A_2 คือ $\Delta m_2 = \rho A_2 v_2 \Delta t$ ดังนั้น มวลที่ไหลผ่านแต่ละส่วนมีค่าเท่ากัน จะได้

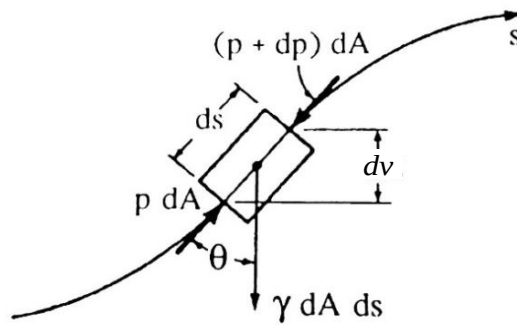
$$\rho A_1 v_1 \Delta t = \rho A_2 v_2 \Delta t \quad (2.2)$$

$$\text{หรือ} \quad A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (2.3)$$

สมการ (2.3) เรียกว่า สมการความต่อเนื่อง (continuity equation) สรุปได้ว่า ผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดกับอัตราเร็วของของไหลอุดมคติ ไม่ว่าจะอยู่ที่ตำแหน่งใดในท่อจะมีค่าคงตัว

3. สมการแบร์นูลลี (Bernoulli equation)

สมการแบร์นูลลี (Bernoulli equation) อธิบายว่าสำหรับของไหลอุดมคติ ผลรวมของความดัน พลังงานจลน์ต่อปริมาตรและพลังงานศักย์ต่อปริมาตรของของไหลจะมีค่าคงที่ทุกๆ จุดบนเส้นกระแส สมการของแบร์นูลลีมีประโยชน์ในการนำมาใช้แก้ปัญหาต่างๆ เช่น ใช้ในการคำนวณหาความดันหรืออัตราเร็วของของไหลที่บริเวณต่างๆ ได้



ภาพประกอบ 7 อนุภาคของไหลในอุดมคติ

ที่มา : สุนันท์, (2542).

เมื่อพิจารณาการไหลของของไหลที่ไม่มีความเสียดทานและอัดตัวไม่ได้เมื่อมีการไหลแบบคงตัว (steady flow) จะเห็นว่าแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหลคือแรงจากความดันที่กระทำที่ปลายทั้งสองด้านของอนุภาคของไหล (สุนันท์, 2542)

$$\text{จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน} \quad \sum F = P \cdot dA - (P + dP)dA = -dP \cdot dA \quad (2.4)$$

เมื่อ dA เป็นพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับเส้นกระแส (streamline) ของอนุภาคของไหล นอกจากนี้ก็มีน้ำหนักของของไหล

$$W = -\rho g \cdot ds \cdot dA \cdot \cos \theta = -\rho g \cdot ds \cdot dA \left(\frac{dy}{ds} \right) \quad (2.5)$$

จากสมการ (2.5) จะได้

$$W = -\rho g \cdot dA \cdot dy \quad (2.6)$$

$$\text{จากความสัมพันธ์} \quad a = v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t}$$

เมื่อพิจารณาการไหลแบบคงตัว (steady flow) จะได้

$$a = v \frac{dv}{ds}$$

(2.7)

ดังนั้น จากสมการ (2.4), (2.6) และ (2.7)

$$-dP \cdot dA - \rho g \cdot dA \cdot dy = (\rho \cdot dA \cdot ds) v \frac{dv}{ds} \quad (2.8)$$

หารสมการ (2.8) ด้วย $-\rho \cdot dA$ ตลอดสมการ จะได้

$$\frac{dP}{\rho} + v \cdot dv + g \cdot dy = 0 \quad (2.9)$$

จัดรูปสมการ (2.9) ได้เป็น

$$\frac{dP}{\gamma} + d\left(\frac{v^2}{2g}\right) + dy = 0 \quad ; \gamma = \rho g \quad (2.10)$$

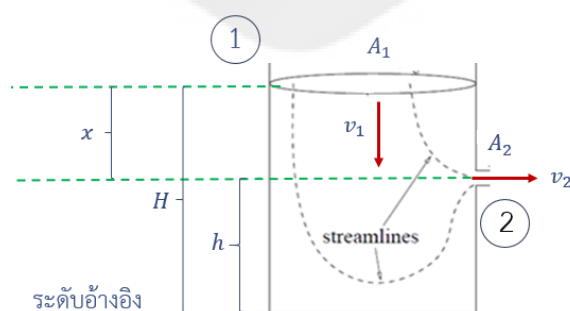
อินทิเกรตสมการ (2.10) จะได้

$$\int \frac{dP}{\gamma} + \int d\left(\frac{v^2}{2g}\right) + \int dy = \text{ค่าคงที่} \quad (2.11)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + y = \text{ค่าคงที่} \quad (2.12)$$

เมื่อ	P	คือ	ความดัน (นิวตัน/ตารางเมตร)
	ρ	คือ	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
	v	คือ	ความเร็วของของไหล (เมตร/วินาที)
	g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตร/วินาที ²)
	y	คือ	ความสูงของของไหลในแต่ละจุด (เมตร)

สมการ (2.12) เรียกว่า สมการแบร์นูลลี ซึ่งกล่าวว่า “ผลรวมของความดัน พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และพลังงานศักย์โน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ ภายในท่อที่ของไหลไหลผ่านจะมีค่าคงตัว” ในการหาอัตราเร็วของของไหลที่พุ่งออกจากรูขนาดเล็กของถังกักน้ำ สมการของแบร์นูลลีสามารถประยุกต์ใช้ ได้ดังนี้



ภาพประกอบ 8 พิจารณาความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านรูเปิดในการทดลองถังกักน้ำของทอริริเซลลี

จากภาพประกอบ 8 แสดงการพิจารณาความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านรูเปิดในการทดลองแท่งกั้นน้ำของทอริเชลลี กำหนดบริเวณที่ 1 คือผิวน้ำในแท่งกั้นน้ำ และบริเวณที่ 2 คือรูเปิด

กำหนดให้	A_1	คือ	พื้นที่หน้าตัดของแท่งกั้นน้ำ (ตารางเมตร)
	A_2	คือ	พื้นที่หน้าตัดของรูเปิด (ตารางเมตร)
	v_1	คือ	ความเร็วของน้ำในแท่งกั้นน้ำ (เมตร/วินาที)
	v_2	คือ	ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิด (เมตร/วินาที)
	H	คือ	ความสูงของระดับน้ำเทียบกับระดับอ้างอิง (เมตร)
	h	คือ	ความสูงของระดับของรูเปิดเทียบกับระดับอ้างอิง (เมตร)
	x	คือ	ระยะห่างระหว่างระดับน้ำถึงรูเปิด (เมตร)

จากสมการ (2.12) สมการแบร์นูลลี เมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในภาพประกอบ 8 จะได้

$$\frac{1}{2}v_1^2 + \frac{P_1}{\rho} + gH = \frac{1}{2}v_2^2 + \frac{P_2}{\rho} + gh \quad (2.13)$$

จัดรูปสมการ (2.3) สมการความต่อเนื่อง เพื่อหาค่า v_1 จะได้

$$v_1 = \left(\frac{A_2 v_2}{A_1} \right) \quad (2.14)$$

แทนค่า v_1 จากสมการ (2.14) ลงในสมการ (2.13) จะได้

$$\frac{1}{2} \left(\frac{A_2 v_2}{A_1} \right)^2 + \frac{P_1}{\rho} + gH = \frac{1}{2}v_2^2 + \frac{P_2}{\rho} + gh \quad (2.15)$$

ค่าความดัน ณ จุดที่ 1 และจุดที่ 2 คือความดันบรรยากาศ ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (2.15) ใหม่ได้ดังสมการ

$$\frac{1}{2} \left(\frac{A_2 v_2}{A_1} \right)^2 + gH = \frac{1}{2}v_2^2 + gh \quad (2.16)$$

จัดรูปสมการ (2.16) ใหม่ จะได้

$$g(H - h) = \frac{1}{2}v_2^2 \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \quad (2.17)$$

ในกรณีที่พื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ 1 (A_1) มีค่ามากกว่า พื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ 2 (A_2) มาก ๆ ส่งผลให้กำลังสองของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ 2 และพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ 1 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นจึงเขียนสมการ (2.17) ได้ใหม่เป็น

$$g(H - h) = \frac{1}{2}v_2^2 \quad (2.18)$$

ดังนั้น ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิด จะได้ดังสมการ

$$v_2 = \sqrt{2g(H-h)} \quad (2.19)$$

สมการ (2.19) เรียกว่า “สมการของทอริเซลลี” ซึ่งเป็นสมการที่ใช้อธิบายความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านรูเปิดขนาดเล็กข้างแท็งก์น้ำ โดยความเร็วของของไหลจะขึ้นอยู่กับระดับน้ำเหนือรูเปิด

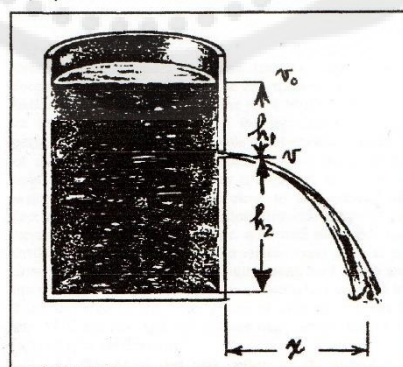
ในกรณีที่ของไหลไม่ใช่ของไหลในอุดมคติ ความเร็วของน้ำที่พุ่งออกจากรูเปิดจะมีค่าน้อยกว่าความเร็วที่คำนวณโดยสมการของทอริเซลลี ดังนั้น ในการอธิบายการไหลของของไหลจริง จึงนิยามสัมประสิทธิ์ความเร็วโดย $c_v = u_2/v_2 \leq 1$ หรือ

$$u_2 = c_v \sqrt{2g(H-h)} \quad (2.20)$$

เมื่อ c_v คือ สัมประสิทธิ์ความเร็ว
 u_2 คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหลจริงที่พุ่งออกจากรูเปิด (เมตร/วินาที)
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตร/วินาที²)

4. การทดลองแท็งก์น้ำทอริเซลลี (Torricelli's tank experiment)

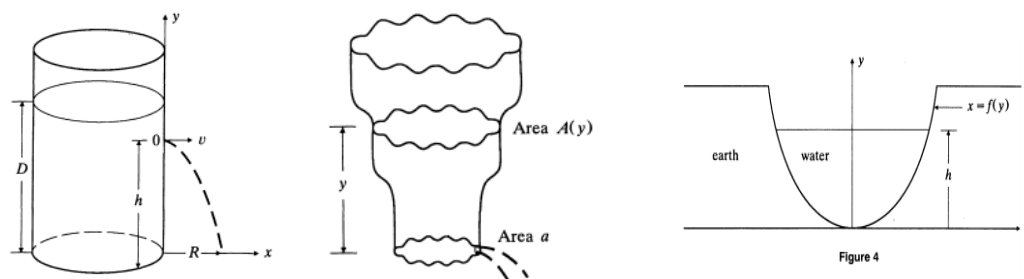
ที่ผ่านมาได้มาการวิจัยค้นคว้าเกี่ยวกับสมการของทอริเซลลีที่น่าสนใจ อี.เจ.แอลซาลโด (E.J. Ansaldo. 1982: 243) ได้กล่าวว่าตัวอย่างที่ง่ายที่สุดในการสอนการใช้สมการแบร์นูลลี สำหรับนักเรียนชั้นปีที่ 1 คือ การใช้สมการแบร์นูลลีในการอธิบายสมการของทอริเซลลี ดังภาพประกอบ 9 ซึ่งใช้ในการออกความคิดเห็นและโต้เถียงในชั้นเรียน



ภาพประกอบ 9 ของเหลวที่ไหลออกจากรูด้านข้างขนาดเล็กของแท็งก์น้ำ

ที่มา: E.J. Ansaldo. (1982: 243).

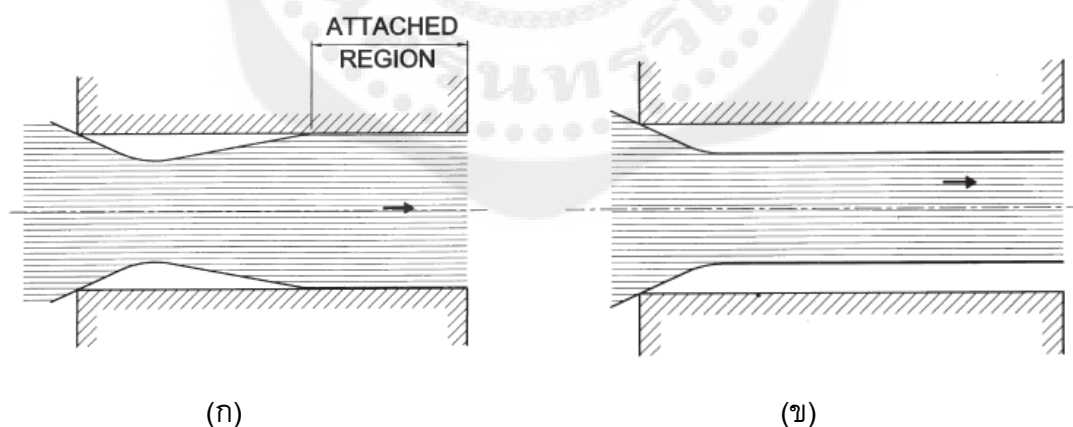
ต่อมาซี.ดับเบิลยู.กรอตซ์ (C.W.Groetsch. 1993: 210-217) ได้ทำการหาความสัมพันธ์ของระดับรูเปิดและระดับน้ำของแท่งกั้นน้ำชนิดต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 แท่งกั้นน้ำแบบต่าง ๆ ที่ใช้ประกอบการคำนวณ

ที่มา: C.W. Groetsch. (1993: 210-217).

ในปี 1999 (K. Ramamurthi; & K. Nandakumar. 1999: 133-143) ได้ทำการศึกษา ลักษณะเฉพาะของการไหลผ่านรูเปิดทรงกระบอกขอบคมขนาดเล็ก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.3 และ 2 มิลลิเมตร และมีอัตราส่วนลักษณะ (aspect ratio) ระหว่าง 1 และ 50 พบว่ารูปแบบการไหลของของไหล สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การไหลแบบแนบติด (attached flow) และการไหลแบบโพรง (cavitated flow) ดังภาพประกอบ 11 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 11 จำลองลักษณะการไหลของของไหลเมื่อไหลผ่านขอบกั้นคมขนาดเล็ก
(ก) การไหลแบบแนบติด (attached flow) (ข) การไหลแบบโพรง (cavitated flow)

ที่มา: K. Ramamurthi; & K. Nandakumar. (1999: 134).

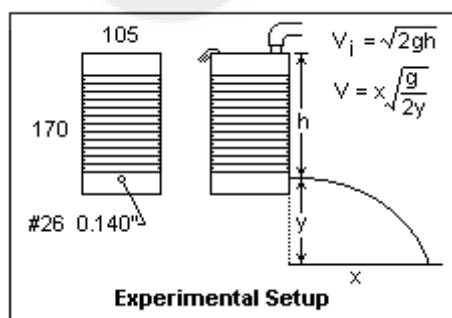
ในปี ค.ศ. 2000 เปาโลและแอนโทนีโอ (Paulo; & Antonio. 2000: 110-119) ได้ทำการทดลองพลศาสตร์ของไหลแบบง่ายๆ คือน้ำที่ไหลออกจากกรูด้านข้างของขวดทรงกระบอก และวัดความเร็วของน้ำที่ไหลออกจากกรู ซึ่งมีความสัมพันธ์กับเวลาและระดับน้ำที่อยู่ในขวด ผลการทดลองที่ได้นั้นจะถูกเปรียบเทียบกับทฤษฎี เปาโลและแอนโทนีโอยังได้เสนอการทดลองในระบบคล้ายๆ กันโดยใช้ขวดสองขวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของกรูเท่ากัน น้ำที่ไหลจากขวดที่หนึ่งจะไหลออกไปขวดที่สองที่อยู่ต่ำกว่า ดังภาพประกอบ 12 และแก้สมการด้วยการวิเคราะห์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี



ภาพประกอบ 12 การติดตั้งการทดลองของเปาโลและแอนโทนีโอ

ที่มา: Paulo; & Antonio. (2000: 111).

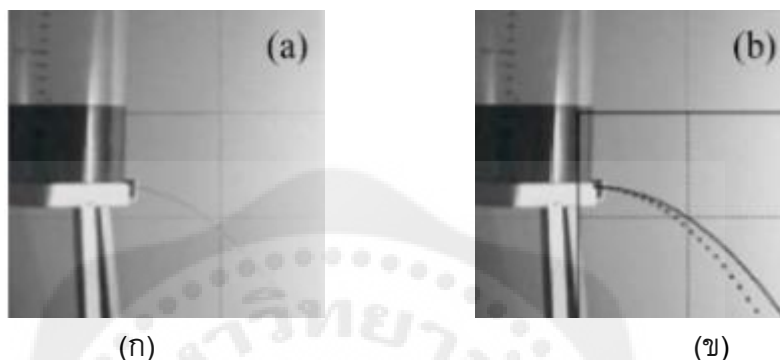
หลังจากนั้นเจ.บี.คาลเวอร์ท (J.B. Calvert. 2003) ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็ว (c_v) สัมประสิทธิ์การหดตัว (c_c) และสัมประสิทธิ์การจ่าย (c_d) โดยการจับเวลาน้ำที่ไหลจากด้านบนลงมาด้านล่าง พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.90 0.76 และ 0.685 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 แสดงการจำลองการติดตั้งการทดลองของคาลเวอร์ท

ที่มา: J.B. Calvert. (2003).

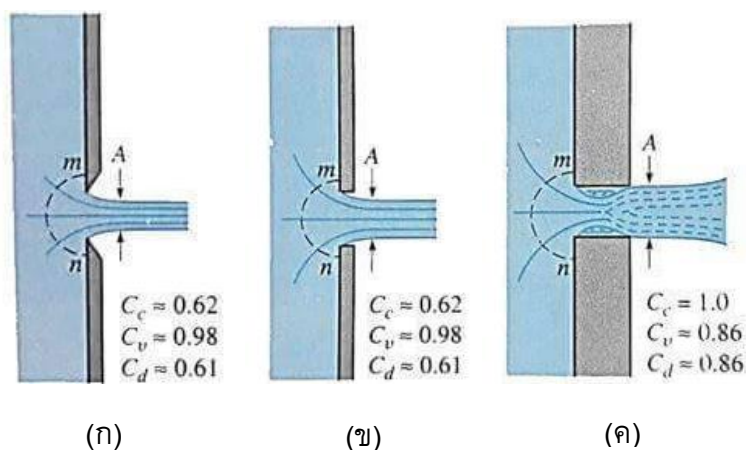
ในปี ค.ศ. 2005 ซาเลตาและโทเบีย (Saleta; & Tobia. 2004: 598-602) ได้ทำการทดลองที่ง่าย ๆ และราคาถูก ดังภาพประกอบ 14 เพื่อศึกษาการระบายน้ำของภาชนะใส่ของเหลวทรงกระบอก ซึ่งการทดลองประกอบด้วยภาชนะทรงกระบอกที่มองผ่านได้ง่ายและกล้องดิจิทัลที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ อธิบายผลลัพธ์โดยใช้สมการของแบร์นูลลี สำหรับการไหลที่เกิดขึ้นจริงที่มีสูญเสียพลังงานผลลัพธ์จากการทดลองถูกอธิบายโดยหลักการของทอริเซลลี



ภาพประกอบ 14 (ก) ของเหลวไหลผ่านรูเปิด (ข) ของเหลวไหลผ่านรูเปิดเมื่อเทียบกับทฤษฎี

ที่มา : Saleta; & Tobia. (2005: 600).

ในการทดลองแท็งก์น้ำของทอริเซลลี ลักษณะทางกายภาพของรูเปิดต่างชนิดกันจะส่งผลให้เส้นกระแสของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดนั้นต่างกันไปด้วย รูเปิดสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ ขอบคม (Sharp edge) ขอบไหลเหลี่ยม (square shoulder) และขอบเหลี่ยม (shoulder edge) ดังภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 แสดงการไหลของของไหลผ่านรูเปิดประเภทต่าง ๆ

(ก) ขอบคม (ข) ขอบไหล่เหลี่ยม (ค) ขอบเหลี่ยม พร้อมทั้งแสดงค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 3 ชนิด

ที่มา: Siddique. (2015: Online).

จากภาพประกอบ 15 จะเห็นว่านอกจากสัมประสิทธิ์ความเร็วที่ใช้คำนวณความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดแล้ว ยังมีสัมประสิทธิ์ที่สำคัญอีก 2 ประเภท ซึ่งนิยามดังนี้

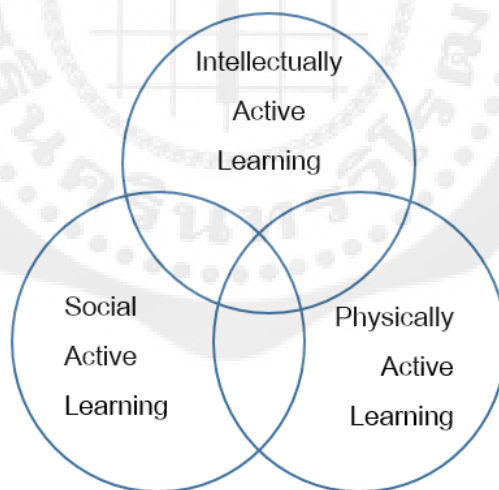
$$\text{สัมประสิทธิ์การหดตัว } (C_c) = \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดของลำของไหล}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของรูเปิด}}$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การจ่าย } (C_d) = \frac{\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ได้จากการทดลอง}}{\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรตามทฤษฎีของของไหลอุดมคติ}}$$

ผู้วิจัยได้ศึกษาการไหลของน้ำผ่านรูเปิดประเภทขอบคม (sharp edge) ดังภาพประกอบ 15 (ก) และรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม (semi-sharp edge) ซึ่งของไหลที่ไหลผ่านรูเปิดประเภทนี้ จะแสดงพฤติกรรมของการไหลคล้ายกับการไหลผ่านรูเปิดประเภทขอบไหล่เหลี่ยม (square shoulder edge) ที่ระดับน้ำสูงๆ ซึ่งมีรูปแบบการไหลเป็นการไหลแบบโพรง (cavitated flow) ดังภาพประกอบ 11(ข) และจะแสดงพฤติกรรมของการไหลคล้ายกับการไหลผ่านรูเปิดประเภทขอบเหลี่ยม (square edge) เมื่อระดับน้ำเข้าใกล้รูเปิด ซึ่งมีรูปแบบการไหลเป็นการไหลแบบแนบติด (attached flow) ดังภาพประกอบ 11(ก)

5. การจัดกิจกรรมการเรียนรู้เชิงรุก (Active Learning) และการใช้ปัญหาเป็นฐาน (Problem based learning)

การจัดการเรียนรู้เชิงรุก (Active learning) คือการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ให้นักเรียนมีส่วนร่วมในการเรียนการสอน (Collins & O'Brien, 2003, p.5) ซึ่งการจัดการเรียนรู้เชิงรุกจะทำให้ผู้เรียนได้รับการพัฒนา 3 ด้านด้วยกัน ได้แก่ ด้านสติปัญญา ด้านสังคม และด้านกายภาพ ดังภาพประกอบ 16 สำหรับด้านสติปัญญา (Intellectually) ต้องการให้ผู้เรียนได้ระดมสมองเกี่ยวกับเนื้อหาที่เรียน โดยการใช้ความคิดแบบมีวิจารณญาณ (Critical Thinking) มีความสามารถในการคิดวิเคราะห์ คิดอย่างมีเหตุผล (Anderson & Krathwohl, 2010) สำหรับด้านสังคม (socially) ต้องการให้ผู้เรียนสามารถทำงานร่วมกับผู้อื่นได้ หรือการร่วมมือกับคนหลายคนที่มีพื้นฐานต่างกัน ทั้งแนวคิด ความเชื่อ หรือความรู้ เพื่อทำงานหรือกิจกรรมใดๆ ให้ประสบความสำเร็จได้ (Edwards, 2014) สำหรับด้านกายภาพ (physically) ต้องการให้ผู้เรียนได้เรียนรู้ผ่านการปฏิบัติ หรือการลงมือทำ “ความรู้” ที่เกิดขึ้นเป็นความรู้ที่ได้จากประสบการณ์ กระบวนการในการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ให้ผู้เรียนได้มีโอกาสลงมือทำมากกว่าการฟังเพียงอย่างเดียว (Nesin, 2012)



ภาพประกอบ 16 แสดงส่วนประกอบของการเรียนรู้เชิงรุกทั้ง 3 ด้าน

ที่มา : Edwards, S. (2005: 27).

แนวคิดการจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐาน (Problem based learning : PBL) (ภัทรารัตน์ มากมี. 2554:7-14) มีรากฐานมาจากความคิดของ จอห์น ดิวอี้ พัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกโดยคณะวิทยาศาสตร์สุขภาพ (Faculty of Health Science) มหาวิทยาลัย Mc Master ประเทศแคนาดา เพื่อการเตรียมตัวสอบให้กับนักศึกษาแพทย์ฝึกหัด วิธีการนี้ได้กลายเป็นรูปแบบ (Model) ที่มหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกานำไปเป็นแบบอย่าง ต่อมามหาวิทยาลัย Mc Master ได้พัฒนาหลักสูตรแพทย์ที่ใช้ PBL ในการสอนเป็นครั้งแรก ทำให้มหาวิทยาลัยนี้เป็นที่ยอมรับและรู้จักกันทั่วโลกว่า เป็นผู้นำทางการจัดการเรียนรู้แบบ PBL มหาวิทยาลัยชั้นนำในสหรัฐอเมริกาได้นำรูปแบบการจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐานมาใช้ในการสอนหลายๆ แห่งและเป็นที่ยอมรับมากขึ้น ขยายออกไปสู่การสอนในสาขาอื่น เช่น วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ ภาษาศาสตร์ สังคมศาสตร์ พฤติกรรมศาสตร์ เป็นต้น

สำหรับในประเทศไทย การเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐานเริ่มใช้ครั้งแรกในหลักสูตรแพทยศาสตรบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2531 และประยุกต์ใช้ในหลักสูตรสาธารณสุขศาสตรบัณฑิต ทั้งนี้การเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐาน เป็นวิธีการเรียนการสอนรูปแบบหนึ่งที่นำมาปรับใช้กับการศึกษาหลายระดับ

Gallagher (1997: 332-362) ได้ให้ความหมายว่าการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐาน เป็นการเรียนรู้ที่ผู้เรียนต้องเรียนรู้จากการเรียน โดยผู้เรียนจะทำงานร่วมกันเป็นกลุ่มเพื่อค้นหาวិธีการแก้ปัญหา โดยจะบูรณาการความรู้ที่ต้องการให้ผู้เรียนได้รับแก้ปัญหาเข้าด้วยกัน ปัญหาที่ใช้มีลักษณะเกี่ยวกับชีวิตประจำวันและมีความสัมพันธ์กับผู้เรียน การเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐานจะมุ่งเน้นพัฒนาผู้เรียนในด้านทักษะการเรียนรู้มากกว่าความรู้ที่ผู้เรียนจะได้มาและพัฒนาผู้เรียนสู่การเป็นผู้ที่มีความสามารถเรียนรู้โดยการชี้นำตนเองได้

Barell (1998: 7) ได้ให้ความหมายของการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐานไว้ว่า เป็นกระบวนการของการสำรวจเพื่อที่จะตอบคำถามสิ่งที่อยากรู้ยากเห็น ข้อสงสัยและความไม่มั่นใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์ธรรมชาติในชีวิตจริงที่มีความซับซ้อน ปัญหาที่ใช้ในกระบวนการเรียนรู้จะเป็นปัญหาที่ไม่ชัดเจนมีความยากหรือมีข้อสงสัยมาก มีแนวทางในการแก้ปัญหาอย่างหลากหลาย

ทิตนา แคมมณี (2547: 137-138) กล่าวถึงการจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐานว่า เป็นการจัดสภาพการณ์ของการเรียนการสอนที่ใช้ปัญหาเป็นเครื่องมือในการช่วยให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ตามเป้าหมาย โดยผู้สอนอาจนำผู้เรียนไปเผชิญสถานการณ์ปัญหาจริง หรือผู้สอนอาจจัดสภาพการณ์ให้ผู้เรียนเผชิญปัญหา และฝึกกระบวนการคิดวิเคราะห์ปัญหาและการแก้ปัญหาเป็นกลุ่ม ซึ่งจะช่วยให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจในปัญหานั้นอย่างชัดเจน ได้เห็นทางเลือกและวิธีการที่

หลากหลายในปัญหานั้น รวมทั้งให้ผู้เรียนเกิดความใฝ่รู้ เกิดทักษะกระบวนการคิด และกระบวนการแก้ปัญหา

ญดาภัก กิจทวี (2551: 29) สรุปว่าการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐาน เป็นกระบวนการจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหามาเป็นตัวกระตุ้นให้ผู้เรียนได้ศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลด้วยตนเอง เพื่อนำไปสู่การแก้ปัญหา โดยจะแบ่งผู้เรียนเป็นกลุ่มย่อยเพื่อช่วยกันศึกษา อภิปรายปัญหา โดยนำเอาข้อมูลและประสบการณ์ที่ผู้เรียนมีอยู่นั้นมาวิเคราะห์อย่างมีวิจารณญาณ เพื่อที่จะให้ผู้เรียนได้จดจำความรู้ใหม่ไว้ได้นาน และรู้จักนำไปประยุกต์ใช้กับสถานการณ์ต่างๆ ให้ผู้เรียนได้ฝึกทักษะการแก้ปัญหาเพื่อให้เกิดความเข้าใจในปัญหานั้นได้อย่างชัดเจนและถูกต้องจนสามารถแก้ไขปัญหาก็พบได้ในที่สุด

สุพัตรา เกานิล (2557: 17) สรุปความหมายของการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐานไว้ว่าเป็นการเรียนรู้อีกรูปแบบหนึ่งที่ใช้ปัญหาเป็นตัวกระตุ้น เพื่อนำทางให้มีความอยากรู้อยากเห็น กระตุ้นให้ผู้เรียนใช้ทักษะการคิดแก้ปัญหาและนำไปสู่การตัดสินใจที่ถูกต้องด้วยตนเอง มีการศึกษาค้นคว้าจากข้อมูลที่หลากหลายเพื่อนำมาแก้ปัญหา ใช้กระบวนการกลุ่มในการลงมือปฏิบัติจริงก่อนที่จะเผชิญปัญหาและแก้ปัญหา

สรุปได้ว่าวิธีการสอนโดยใช้ปัญหาเป็นฐานเป็นการจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นเครื่องมือกระตุ้นผู้เรียนให้มีความสนใจใคร่รู้และต้องการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเพื่อนำไปสู่การแก้ปัญหา ซึ่งผู้สอนอาจจัดสภาพการณ์ให้ผู้เรียนได้เผชิญปัญหาและฝึกกระบวนการวิเคราะห์และแก้ปัญหา เพื่อให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจในปัญหาอย่างชัดเจนและสามารถใช้ทักษะกระบวนการที่นำไปสู่การแก้ปัญหาได้

ลักษณะสำคัญของการจัดการเรียนรู้แบบใช้ปัญหาเป็นฐาน (ตามแนวคิดของสำนักงานเลขาธิการสภาการศึกษา)(สำนักงานเลขาธิการ. 2559: ออนไลน์)

1. ต้องเป็นสถานการณ์ที่เป็นปัญหา และเริ่มต้นการจัดกระบวนการเรียนรู้ด้วยการใช้ปัญหาเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดกระบวนการเรียนรู้
2. ปัญหาที่นำมาใช้ในการจัดกระบวนการเรียนรู้ ควรเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นและพบเห็นได้ในชีวิตจริงของผู้เรียนหรือมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นจริง
3. ผู้เรียนเรียนรู้โดยการนำตนเอง (Self – Directed Learning) ค้นหาและแสวงหาความรู้ได้ด้วยตนเอง ดังนั้น ผู้เรียนจึงต้องวางแผนการเรียนรู้ด้วยตนเอง บริหารเวลาเอง คัดเลือกวิธีการเรียนรู้และประสบการณ์การเรียนรู้ รวมทั้งประเมินการเรียนรู้ได้ด้วยตนเอง

4. ผู้เรียนเรียนรู้เป็นกลุ่มย่อย เพื่อประโยชน์ในการค้นหามุมมอง ข้อมูลร่วมกัน เป็นการพัฒนาทักษะแก้ปัญหาด้วยเหตุและผล ฝึกให้ผู้เรียนมีทักษะในการรับส่งข้อมูล เรียนรู้เกี่ยวกับความแตกต่างระหว่างคน และฝึกการจัดระบบตนเองเพื่อพัฒนาความสามารถในการทำงานร่วมกันเป็นทีม ความรู้คำตอบที่ได้มีความหลากหลาย องค์ความรู้จะผ่านการวิเคราะห์โดยผู้เรียน มีการสังเคราะห์และตัดสินใจร่วมกัน การจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐานนี้ นอกจากการจัดการเรียนเป็นกลุ่มแล้วยังสามารถจัดให้ผู้เรียนเรียนรู้เป็นรายบุคคลได้ แต่อาจทำให้ผู้เรียนขาดทักษะในการทำงานร่วมกันกับผู้อื่น

5. การเรียนรู้มีลักษณะการบูรณาการความรู้และบูรณาการทักษะกระบวนการต่าง ๆ เพื่อให้ผู้เรียนได้รับความรู้และคำตอบที่กระจ่างชัด

6. ความรู้ที่เกิดขึ้นจากการเรียนรู้จะได้มาภายหลังจากผ่านกระบวนการเรียนรู้โดยใช้การแก้ปัญหาเป็นฐาน

7. การประเมินผลเป็นการประเมินผลจากสภาพจริง โดยพิจารณาจากการปฏิบัติงานตามความก้าวหน้าของผู้เรียน

การจัดการเรียนรู้แบบใช้ปัญหาเป็นฐาน สิ่งสำคัญที่สุดคือ ปัญหาหรือสถานการณ์ที่จะเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดกระบวนการเรียนรู้ ลักษณะสำคัญของปัญหาตามข้อสรุปของสำนักงานเลขาธิการสภาการศึกษา มีดังนี้

1. เกิดขึ้นในชีวิตจริงและเกิดจากประสบการณ์ หรือผู้เรียนมีโอกาสเผชิญกับปัญหานั้น
2. เป็นปัญหาที่พบบ่อย มีความสำคัญ มีข้อมูลประกอบเพียงพอสำหรับการค้นคว้า
3. เป็นปัญหาที่ยังไม่มีคำตอบชัดเจน เป็นปัญหาที่มีความซับซ้อน คลุมเครือ หรือผู้เรียนเกิดความสงสัย
4. ปัญหาที่เป็นประเด็นขัดแย้ง ข้อถกเถียงในสังคมยังไม่มีคำตอบ
5. เป็นปัญหาอยู่ในความสนใจ เป็นสิ่งที่อยากรู้ แต่ไม่รู้
6. เป็นปัญหาที่สร้างความเดือดร้อน เสียหาย เกิดโทษภัยและเป็นสิ่งไม่ดีหากใช้ข้อมูลเพียงลำพังคนเดียวอาจทำให้การแก้ปัญหาผิดพลาด
7. เป็นปัญหาที่มีการยอมรับว่าจริง ถูกต้อง แต่ผู้เรียนไม่เชื่อว่าจริง ไม่สอดคล้องกับความคิดของผู้เรียน
8. ปัญหาที่อาจมีคำตอบหรือมีแนวทางในการแสวงหาคำตอบได้หลายทาง ครอบคลุมการเรียนรู้ที่กว้างขวางหลากหลายเนื้อหา
9. เป็นปัญหาที่ไม่สามารถหาคำตอบได้ทันที ต้องการการสำรวจค้นคว้าและการรวบรวมข้อมูลหรือทดลองดูก่อน จึงจะได้คำตอบ ไม่สามารถคาดเดาหรือทำนายได้ง่าย ๆ ว่า

ต้องใช้ความรู้อะไร ยุทธวิธีในการสืบเสาะหาความรู้จะเป็นอย่างไรหรือคำตอบ หรือผลของความรู้เป็นอย่างไร

10. เป็นปัญหาที่มีความยากง่ายเหมาะสมกับพื้นฐานของผู้เรียน

11. เป็นปัญหาส่งเสริมความรู้ด้านทักษะ สอดคล้องกับหลักสูตรการศึกษา

การจัดการเรียนรู้แบบการใช้ปัญหาเป็นฐาน เป็นรูปแบบหนึ่งในการจัดการเรียนรู้เชิงรุก วิธีการสอนโดยใช้ปัญหาเป็นฐานเป็นการจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นเครื่องมือกระตุ้นผู้เรียนให้มีความสนใจใคร่รู้และต้องการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเพื่อนำไปสู่การแก้ปัญหา ซึ่งผู้สอนอาจจัดสภาพการณ์ให้ผู้เรียนได้เผชิญปัญหาและฝึกกระบวนการวิเคราะห์และแก้ปัญหา เพื่อให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจในปัญหาอย่างชัดเจนและสามารถใช้ทักษะกระบวนการที่นำไปสู่การแก้ปัญหาได้ ผู้วิจัยได้เลือกการจัดกิจกรรมการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐาน (PBL) แบบ 6 ขั้นตอน ดังนี้

1. กำหนดปัญหา: เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพื่อที่จะให้แน่ใจว่า ผู้เรียนนั้นรู้สึกเชื่อมต่อกับปัญหา ซึ่งการแนะนำปัญหานั้นจะทำให้แก่นักเรียนนั้นตื่นตัวในการเรียน

2. ทำความเข้าใจปัญหา: หลังจากการเรียนรู้เกี่ยวกับงานของพวกเขาผู้เรียนควรจะมีหลายโอกาสที่จะระดมความคิดแก้ปัญหา ข้อเสนอแนะทั้งหมดควรได้รับการยอมรับและได้รับการบันทึกไว้

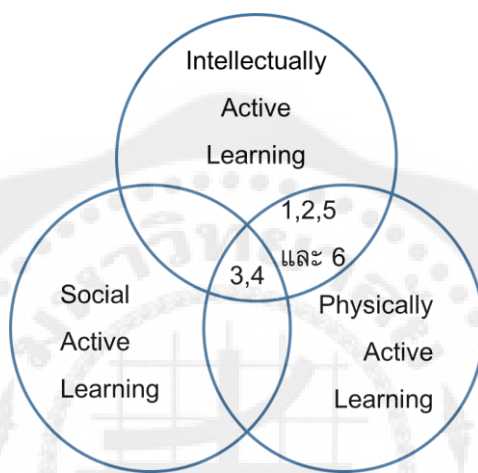
3. ดำเนินการศึกษาค้นคว้า: สำหรับบางปัญหาผู้เรียนจะกำหนดว่าเนื้อหาที่พวกเขาต้องการที่จะเรียนรู้ สำหรับบางคนอื่น ๆ ผู้สอนต้องตัดสินใจว่าจะสอนอยู่บนพื้นฐานของปัญหาและเนื้อหาวัตถุประสงค์ เนื้อหาค้นพบโดยระหว่างผู้เรียนทเรียนจะมีบทบาทสำคัญในความสำเร็จของพวกเขา.

4. สังเคราะห์ความรู้: ในขณะที่ผู้เรียนเรียนรู้เนื้อหาที่อาจารย์ได้ให้กลับไปหน่วยมีปัญหา

5. สรุปและประเมินค่าของคำตอบ: การสื่อสารสำคัญ ผู้เรียนต้องสามารถระดมคำตอบที่เป็นไปได้ ทำงานร่วมกันเพื่อประเมินทางเลือก เลือกการตอบสนองที่ดีที่สุด และสามารถสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. นำเสนอและประเมินผล: มันเป็นสิ่งสำคัญที่ผู้เรียนจะได้รับโอกาสที่จะดูที่กระบวนการและประเมินวิธีการที่พวกเขาทำ ผู้เรียนควรประเมินผลงานของตนเองที่ทำโดยกลุ่มของพวกเขา

ซึ่งแต่ละขั้นตอนของการจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐานทั้ง 6 ขั้นตอนนั้น สามารถทำให้ผู้เรียนได้พัฒนาทั้ง 3 ด้าน คือด้านสติปัญญา ด้านสังคม และด้านกายภาพ โดยขั้นตอนกำหนดปัญหา (1) ทำความเข้าใจปัญหา(2) สรุปและประเมินค่าของคำตอบ(5) นำเสนอและประเมินผล(6) จะช่วยให้ผู้เรียนได้พัฒนาทางด้านสติปัญญาและด้านกายภาพ ขั้นตอนการเรียนการสอนที่สำคัญคือ ขั้นตอนในการศึกษาค้นคว้า(3) และสังเคราะห์ความรู้ (4) เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะสามารถทำให้ผู้เรียนได้พัฒนาด้านสติปัญญา ด้านกายภาพ และด้านสังคมไปพร้อมกัน แสดงดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการจัดกิจกรรมการเรียนรู้แบบการใช้ปัญหาเป็นฐาน กับส่วนประกอบทั้ง 3 ของการเรียนรู้เชิงรุก ซึ่งหมายเลขแทนขั้นตอนการใช้ปัญหาเป็นฐาน

ที่มา : Apiwan, S. (2018: 030002-1-030002-6).

บทที่ 3

วิธีการดำเนินวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้ดำเนินการวิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การออกแบบและการสร้างเครื่องมือการทดลองแท็งก์น้ำของทอรรีเซลล์
2. ขั้นตอนการทดลองแท็งก์น้ำของทอรรีเซลล์
3. การหาสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการทดลองแท็งก์น้ำของทอรรีเซลล์
4. การหาสัมประสิทธิ์ความเร็วทางทฤษฎีจากสมการแบร์นูลลีที่คิดการสูญเสียพลังงาน
5. การสร้างคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอรรีเซลล์

1. การออกแบบและการสร้างเครื่องมือการทดลองแท็งก์น้ำของทอรรีเซลล์

1.1. วัสดุและอุปกรณ์

- 1) แผ่นอะคริลิกใส ความหนา 6 มิลลิเมตร
- 2) เหล็กฉาก ขนาด 1.5 x 1.5 นิ้ว
- 3) เหล็กกล่อง ขนาด 1.5 x 1.5 นิ้ว
- 4) จุกยางเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร
- 5) ล้อแบบล้อคได้ จำนวน 4 ล้อ
- 6) สายยาง

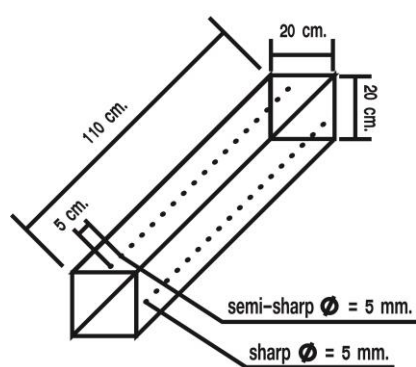
1.2. ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างการทดลองแท็งก์น้ำของทอรรีเซลล์

ในการออกแบบแท็งก์น้ำของทอรรีเซลล์นั้น ผู้วิจัยได้แบ่งส่วนประกอบได้เป็น 3 ส่วน คือ

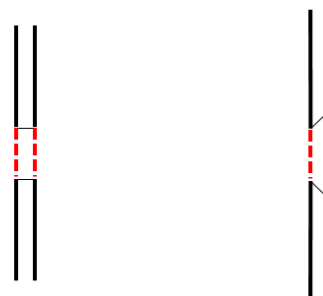
- 1) ส่วนของแท็งก์น้ำ
- 2) ส่วนรองรับน้ำ
- 3) ส่วนโครงสร้างเหล็ก

ส่วนที่ 1 แท็งก์น้ำ

- 1) ตัดแผ่นอะคริลิกใส ความกว้าง 80 เซนติเมตร และความยาว 110 เซนติเมตร
- 2) พับแผ่นอะคริลิกให้เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ด้านละ 20 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 18(ก)
- 3) เจาะรูเปิดประเกศขอบกึ่งคมและขอบคม เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ทุกๆ ความยาว 5 เซนติเมตร ภาพประกอบ 18(ข)



(ก)

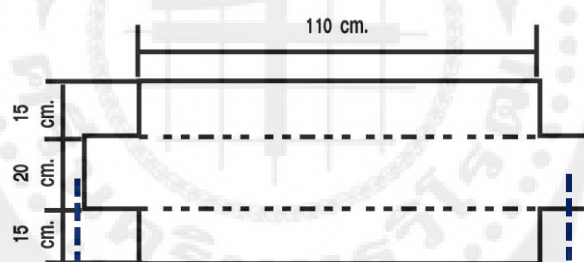


(ข)

ภาพประกอบ 18 (ก) จำลองการสร้างส่วนของแท็งก์น้ำ (ข) แสดงภาพด้านข้างของรูปเปิดประเภทขอบกึ่งคม (ซ้าย) และขอบคม (ขวา)

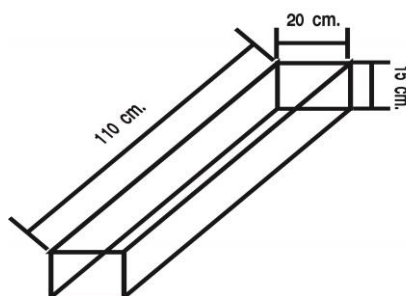
ส่วนที่ 2 ส่วนรองรับน้ำ

1. ตัดแผ่นอะคริลิกใส ความหนา 6 มิลลิเมตร ให้มีขนาดดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 จำลองการตัดแผ่นอะคริลิกในการสร้างส่วนรองรับน้ำ

2. พับแผ่นอะคริลิกตามรอยปะภาพประกอบ 19 จะได้กล่องอะคริลิก ภาพประกอบ 20

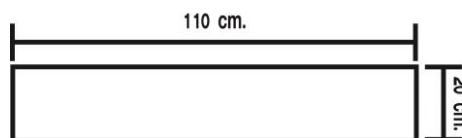


ภาพประกอบ 20 จำลองการสร้างส่วนรองรับน้ำ

ส่วนที่ 3 ส่วนโครงสร้างเหล็ก

ส่วนที่ 3.1 โครงสร้างเหล็กรองรับน้ำ

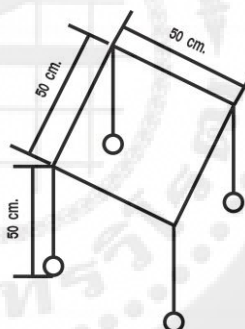
1. ตัดเหล็กจากความยาว 20 และ 110 เซนติเมตร อย่างละ 2 เส้น
2. นำเหล็กจากทั้งหมดมาเชื่อมไว้ด้วยกัน ดังภาพประกอบ 21



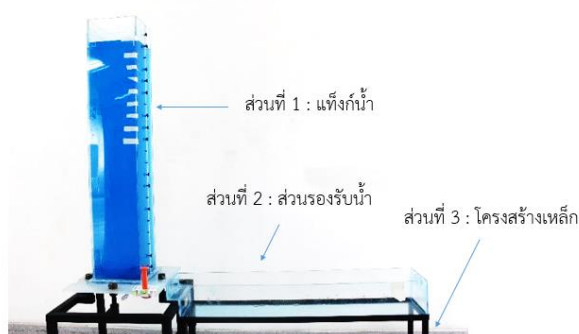
ภาพประกอบ 21 จำลองการสร้างส่วนโครงสร้างเหล็กรองรับน้ำ

ส่วนที่ 3.2 โครงสร้างเหล็กรองรับแท็งก์น้ำ

- 1) นำเหล็กกล่องมาตัดความยาว 50 เซนติเมตร จำนวน 8 เส้น
- 2) นำเหล็กกล่อง 4 เส้น มาเชื่อมต่อกันให้เป็นสี่เหลี่ยม
- 3) นำเหล็กกล่องส่วนที่เหลือ มาเชื่อมกับล้อ ทั้ง 4 เส้น
- 4) นำเหล็กกล่องที่เชื่อมกับล้อมาติดให้ครบทั้งสี่มุมของเหล็กสี่เหลี่ยม ดังภาพประกอบ 22 และประกอบทุกส่วนเข้าด้วยกัน จะได้ชุดการทดลองแท็งก์น้ำของทอริริเชลลี ดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 22 จำลองการสร้างส่วนโครงสร้างเหล็กรองรับแท็งก์น้ำ



ภาพประกอบ 23 แสดงชุดการทดลองแท็งก์น้ำของทอริริเชลลี

2. ขั้นตอนการทดลองเท็งก์น้ำของทอริเชลลี

ในการทดลองเท็งก์น้ำของทอริเชลลี ผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองเท็งก์น้ำของทอริเชลลีออกเป็น 2 ตอน ตามประเภทของรูเปิด คือ ขอบกึ่งคมและขอบคม โดยการทดลองทั้ง 2 ตอนมีการขั้นตอนการทดลองดังนี้

2.1 ใช้ที่วัดระดับน้ำตั้งชุดทดลองให้อยู่ในแนวตั้ง ก่อนที่จะเติมน้ำในเท็งก์เก็บน้ำ



ภาพประกอบ 24 แสดงการใช้ระดับน้ำตั้งชุดการทดลองให้อยู่ในแนวตั้ง

2.2 ใส่ น้ำในเท็งก์เก็บน้ำของชุดการทดลองให้เกินระยะ 100 เซนติเมตร รอให้ระดับน้ำนิ่ง



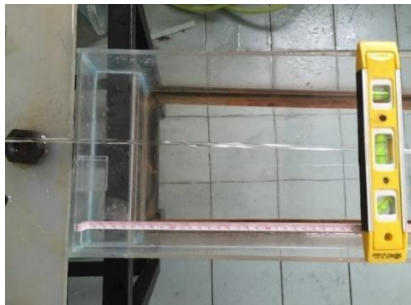
ภาพประกอบ 25 แสดงระดับน้ำนิ่งที่ระยะเกิน 100 เซนติเมตร

2.3 เปิดจุกยางรูเปิดที่ต้องการปล่อยน้ำ



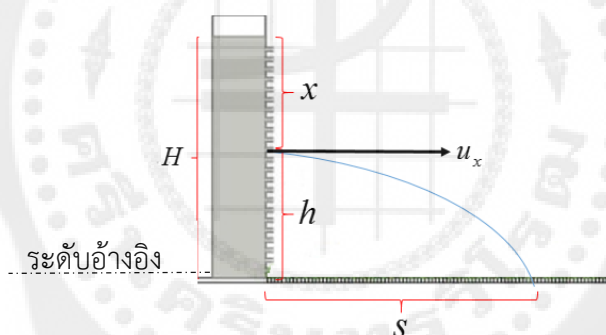
ภาพประกอบ 26 แสดงการเปิดจุกยางที่ระดับรูเปิด 5 เซนติเมตร

2.4 วัดระยะทางการตกของน้ำ เมื่อระดับน้ำถึงระยะต่าง ๆ ทุก 5 เซนติเมตร บันทึกผลในตารางบันทึกผลการทดลอง ซึ่งแต่ละรูเปิดทำการปล่อยน้ำ ทำการทดลองซ้ำทั้งหมดอีก 10 ครั้ง



ภาพประกอบ 27 แสดงการวัดระยะทางการตกของน้ำ

3. การหาสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการทดลองแท่งกั้นน้ำของทอริริเซลลี



ภาพประกอบ 28 แสดงการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองแท่งกั้นน้ำของทอริริเซลลี

เนื่องจากการหาสัมประสิทธิ์ความเร็วจากสมการ (2.20) ต้องทราบความเร็วก่อน ซึ่งสามารถหาความเร็ว โดยใช้การเคลื่อนที่แบบวิถีโค้งของน้ำ ดังภาพประกอบ 28

กำหนดให้	S	คือ	ระยะทางการตกของน้ำ (เมตร)
	H	คือ	ความสูงของระดับน้ำเทียบกับระดับอ้างอิง (เมตร)
	h	คือ	ความสูงของระดับของรูเปิดเทียบกับระดับอ้างอิง (เมตร)
	x	คือ	ระยะห่างระหว่างระดับน้ำถึงรูเปิด (เมตร)

จากสมการการเคลื่อนที่แบบวิถีโค้ง

$$h = u_y t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (3.1)$$

เมื่อ $u_y = 0$ สามารถหาค่าเวลา t ได้เป็น

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (3.2)$$

จากสมการการเคลื่อนที่ในหนึ่งมิติ ความเร็วในการเคลื่อนที่หาได้จาก

$$u_x = \frac{s}{t} \quad (3.3)$$

แทนค่าความเร็วจากสมการ (2.19) และเวลาจากสมการ (3.2) ลงในสมการ (3.3)

$$\text{จะได้} \quad s = c_v \sqrt{2g \cdot (H-h)} \cdot \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (3.4)$$

$$\text{หรือ} \quad s = 2c_v \sqrt{(Hh - h^2)} \quad (3.5)$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์ความเร็วสามารถหาจากสมการ

$$c_v = \frac{s}{2\sqrt{(Hh - h^2)}} \quad (3.6)$$

$$\text{หรือ} \quad c_v = \frac{s}{2\sqrt{(H-x)x}} \quad (3.7)$$

เมื่อ x คือ ระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับรูเปิด ($x = H - h$)

สมการ (3.7) เป็นสมการที่ใช้หาสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการทดลองแท่งกั้นน้ำของทอร์ริเชลลี ในการทดลองเริ่มใส่น้ำให้เกินระดับน้ำ (H) 100 เซนติเมตรเล็กน้อย แล้วเปิดจุกยางรูเปิดที่ต้องการปล่อยน้ำ ในการทดลองนี้ผู้วิจัยทดลองที่ระดับรูเปิด (h) ตั้งแต่ 5 – 70 เซนติเมตร และเริ่มวัดระยะทางการตกของน้ำ (s) เมื่อระดับน้ำถึง 100 เซนติเมตร และทำการวัดระยะทางการตกของน้ำ เมื่อระดับน้ำลดลง ทุกๆ 5 เซนติเมตร บันทึกผลในตารางบันทึกผลการทดลอง จากนั้นทำการทดลองซ้ำทั้งหมดอีก 10 ครั้ง ในแต่ละรูเปิด

* เนื่องจากการไหลของของไหลจริงในช่วงเริ่มทำการทดลองเป็นการไหลแบบไม่คงที่ (unsteady flow) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเริ่มใส่น้ำที่ระดับมากกว่า 100 เซนติเมตร เพื่อให้ระดับน้ำ 100 เซนติเมตร เป็นการไหลแบบคงที่ (steady flow)

4. การหาสัมประสิทธิ์ความเร็วจากสมการแบร์นูลลีที่คิดการสูญเสียพลังงาน

สมการแบร์นูลลี ในกรณีที่คิดการสูญเสียพลังงาน (Salet; & Tobia. 2004: 598) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\frac{1}{2}\alpha_1 u_1^2 + \frac{P_1}{\rho} + gH = \frac{1}{2}\alpha_2 u_2^2 + \frac{P_2}{\rho} + gh + \Delta w_{loss} \quad (3.8)$$

เมื่อ	α	คือ	สัมประสิทธิ์พลังงานจลน์ (kinetic energy coefficient) ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของความเร็ว (velocity profile)
	u	คือ	อัตราเร็วเฉลี่ยของของไหล (เมตร/วินาที)
	Δw_{loss}	คือ	พลังงานที่สูญเสียไปจากกระบวนการไหล

จากสมการ (2.3) สมการความต่อเนื่อง จัดรูปสมการใหม่เพื่อหาค่า u_1 จะได้

$$u_1 = \left(\frac{A_2 u_2}{A_1} \right) \quad (3.9)$$

แทนค่า u_1 จากสมการ (3.9) ลงในสมการ (3.8) จะได้

$$\frac{1}{2}\alpha_1 \left(\frac{A_2 u_2}{A_1} \right)^2 + \frac{P_1}{\rho} + gH = \frac{1}{2}\alpha_2 u_2^2 + \frac{P_2}{\rho} + gh + gl \quad (3.10)$$

ค่าความดัน ณ จุดที่ 1 และจุดที่ 2 คือความดันบรรยากาศ ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ (3.10) ใหม่ได้ดังสมการ

$$\frac{1}{2}\alpha_1 \left(\frac{A_2 u_2}{A_1} \right)^2 + gH = \frac{1}{2}\alpha_2 u_2^2 + gh + gl \quad (3.11)$$

จัดรูปสมการ (3.11) ใหม่ จะได้

$$g[(H-h)-l] = \frac{1}{2}u_2^2 \left[\alpha_2 - \alpha_1 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \quad (3.12)$$

ในกรณีที่พื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ 1 (A_1) มีค่ามากกว่า พื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ 2 (A_2) มาก ๆ ส่งผลให้กำลังสองของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ 2 และพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ 1 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นจึงเขียนสมการ (3.12) ใหม่เป็น

$$g[(H-h)-l] = \frac{1}{2}\alpha_2 u_2^2 \quad (3.13)$$

จัดรูปสมการ (3.13) เพื่อหาความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิด จะได้ดังสมการ

$$u_2^2 = \frac{2g}{\alpha_2}(x-l) \quad (3.14)$$

จากสมการ (2.20) และสมการ (3.13) จับเท่ากันจะได้

$$c_v^2(2gx) = \frac{2g}{\alpha_2}(x-l) \quad (3.15)$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์ความเร็วสามารถหาได้จากสมการ

$$c_v(x) = \sqrt{\frac{1}{\alpha_2} \left(1 - \frac{l}{x}\right)} \quad (3.16)$$

สมการ (3.16) เป็นสมการแสดงสัมประสิทธิ์ความเร็วทางทฤษฎี ซึ่งอาศัยสมการแบร์นูลลีที่คิดการสูญเสียพลังงาน โดยสามารถหาสัมประสิทธิ์ความเร็วได้ในทุกระยะห่างระหว่างระดับน้ำและรูเปิด (x) จากสมการจะเห็นได้ว่า ค่า α_2 และ l เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของการทดลองแท็งก์น้ำของทอรัลเซลล์ แต่ละรูเปิดจะมีค่า α_2 และ l ที่แตกต่างกันไป ในบทที่ 4 เราเรียกค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วที่หาได้จากสมการ (3.16) ว่า “ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วจากทฤษฎี”

5. การสร้างคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอรัลเซลล์ ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย และอุดมศึกษา

1. ศึกษาหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน 2551 รายวิชาฟิสิกส์ เรื่องของไหล
2. กำหนดจุดประสงค์การเรียนรู้ทั้ง 3 ด้าน ได้แก่ ด้านความรู้ ด้านทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ และด้านเจตคติทางวิทยาศาสตร์
3. นำผลการทดลองแท็งก์น้ำของทอรัลเซลล์ที่ผู้วิจัยศึกษา มาจัดทำเป็นเนื้อหาของคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอรัลเซลล์
4. สร้างคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอรัลเซลล์
5. ส่งคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอรัลเซลล์ให้อาจารย์ที่ปรึกษาพิจารณาความถูกต้องของคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอรัลเซลล์
6. จัดทำแบบประเมินสำหรับผู้เชี่ยวชาญเพื่อประเมินความเหมาะสมขององค์ประกอบต่างๆในคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอรัลเซลล์
7. ส่งแบบประเมินสำหรับผู้เชี่ยวชาญเพื่อประเมินความเหมาะสมขององค์ประกอบต่างๆในคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอรัลเซลล์ ให้อาจารย์ที่ปรึกษาพิจารณาความถูกต้อง
8. แต่งตั้งผู้เชี่ยวชาญประเมินคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอรัลเซลล์

9. นำผลการประเมินคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอรรีเซลล์จากผู้เชี่ยวชาญมาหาค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบต่างๆ ในคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอรรีเซลล์

10. ปรับแก้คู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอรรีเซลล์ตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ และส่งให้ผู้เชี่ยวชาญพิจารณาความถูกต้องของคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอรรีเซลล์เป็นครั้งที่ 2



บทที่ 4

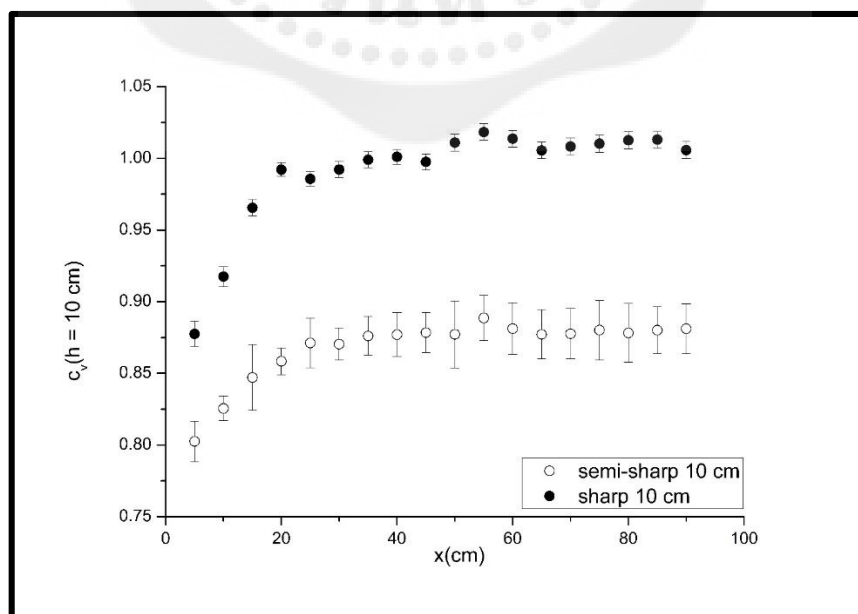
ผลการทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้แบ่งผลการทดลอง ตามหัวข้อต่อไปนี้

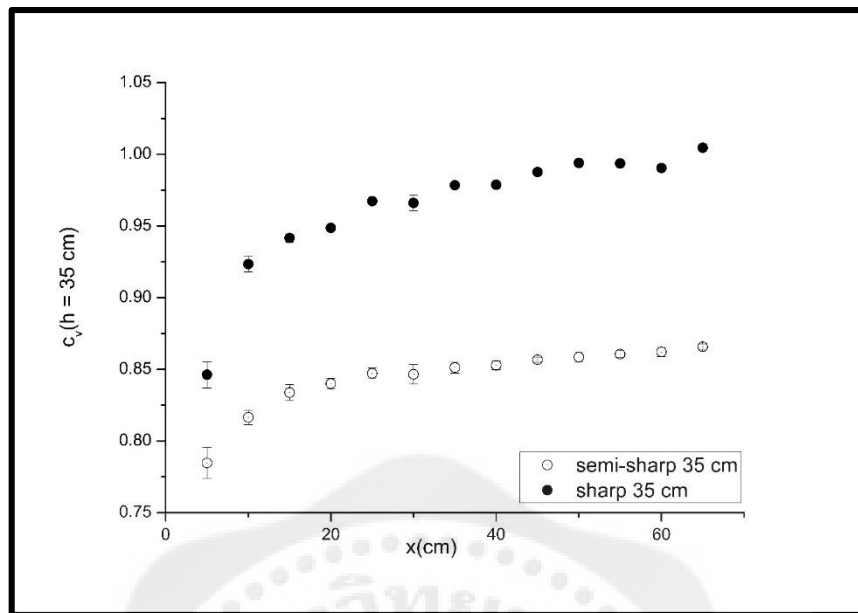
1. ผลการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการทดลองแท่งก้น้ำของทอรรีเซลล์
2. ผลการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วจากทฤษฎี
3. ผลการทดลองเพื่อหาเลขเรย์โนลด์
4. ผลการประเมินคู่มือการทดลองแท่งก้น้ำของทอรรีเซลล์โดยผู้เชี่ยวชาญ

1. ผลการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการทดลองแท่งก้น้ำของทอรรีเซลล์

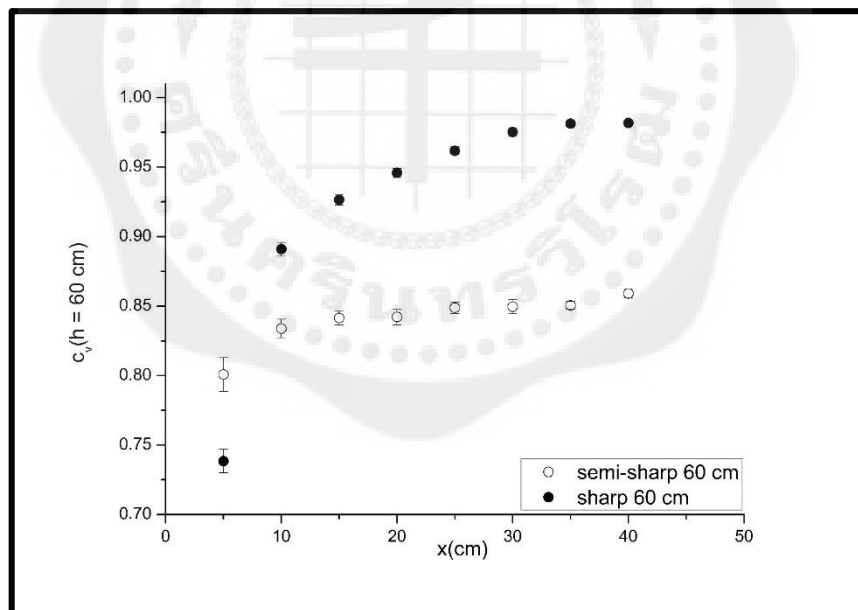
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสัมประสิทธิ์ความเร็ว ในการทดลองแท่งก้น้ำของทอรรีเซลล์ โดยแบ่งรูเปิดออกเป็น 2 ประเภท คือ รูเปิดประเภทขอบกึ่งคมและขอบคม โดยผู้วิจัยได้ทำการวัดระยะทางการตกของน้ำ เมื่อระดับน้ำลดลงทุกๆ 5 เซนติเมตร ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการทดลองสามารถหาได้จากสมการ (3.7) (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ก.1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของสัมประสิทธิ์ความเร็ว ที่ระดับน้ำต่างๆ ผู้วิจัยได้พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเร็ว (c_v) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับรูเปิด (x) ดังภาพประกอบ 29 แท่งความคลาดเคลื่อน (Error bar) ที่แต่ละจุดของผลการทดลองในภาพประกอบ 29 แสดงถึงค่าความไม่แน่นอนในการวัด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ก.2)



(ก)



(ข)



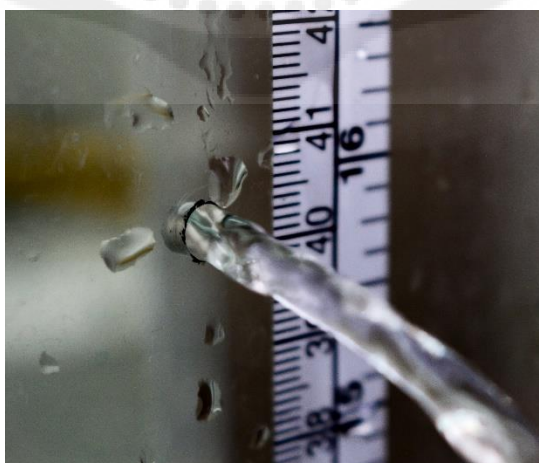
(ค)

ภาพประกอบ 29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเร็ว (c_v) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับระดับรูเปิด (x) กรณีรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม (จุดโปร่ง) และขอบคม (จุดทึบ)
 (ก) รูเปิด (h) 10 ซม. (ข) รูเปิด (h) 35 ซม. (ค) รูเปิด (h) 60 ซม.

จากภาพประกอบ 29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเร็ว (c_v) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับระดับรูเปิด (x) สำหรับขอบกึ่งคม (จุดโปร่ง) เห็นได้ชัดว่าสัมประสิทธิ์ความเร็วของรูเปิด 10, 35, และ 60 ซม. มีแนวโน้มเหมือนกัน (ดูภาคผนวก ข.1 ในกรณีอื่นๆ) โดยในกรณีที่ระดับน้ำสูงๆ นั้นคือระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับรูเปิดต่างกันมากๆ ลำน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดนั้นจะมีลักษณะการไหลแบบโพรง ดังภาพประกอบ 30 และสัมประสิทธิ์ความเร็วจะมีค่าคงที่โดยประมาณโดยมีค่าประมาณ 1 สำหรับรูเปิดประเภทขอบคม ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ความเร็วในกรณีของของไหลอุดมคติ และมีค่าประมาณ 0.85 สำหรับรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม เมื่อระดับน้ำลดลงเข้าใกล้รูเปิดมากขึ้น สัมประสิทธิ์ความเร็วจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากลำน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดในช่วงนี้มีลักษณะการไหลแบบแนบติด ในช่วงที่สัมประสิทธิ์ความเร็วกำลังลดลงนี้ สัมประสิทธิ์ความเร็วของรูเปิดประเภทขอบคม ก็ยังคงมากกว่าของรูเปิดประเภทขอบกึ่งคมเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากผนังของรูเปิดประเภทขอบคมจะบางกว่าประเภทขอบกึ่งคมอยู่พอสมควร ดังภาพประกอบ 31



ภาพประกอบ 30 แสดงการไหลของลำน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม ที่มีลักษณะการไหลแบบโพรง ที่ระดับรูเปิด 40 ซม. และระดับน้ำในช่วง 80-100 ซม.

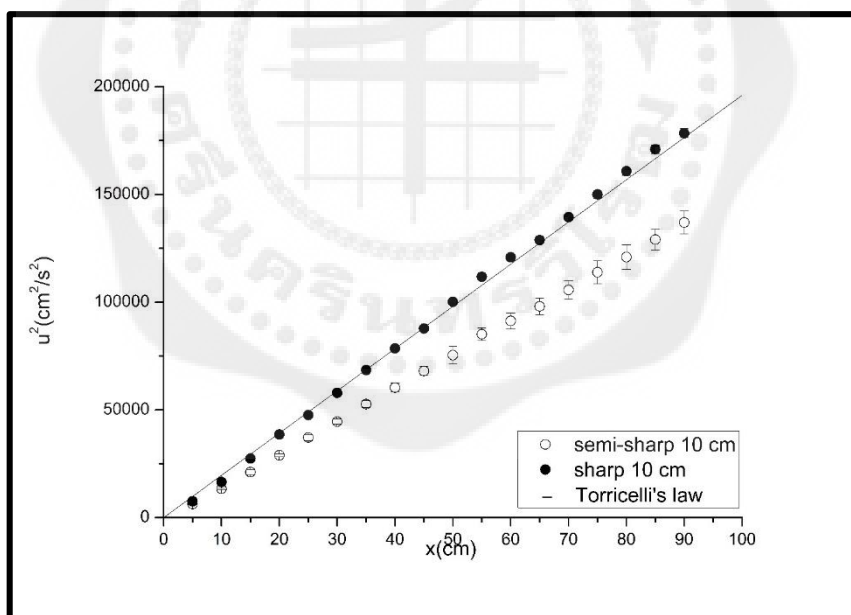


ภาพประกอบ 31 แสดงการไหลของลำน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม ที่มีลักษณะการไหลแบบแนบติด ที่ระดับรูเปิด 40 ซม. และระดับน้ำในช่วง 40-60 ซม.

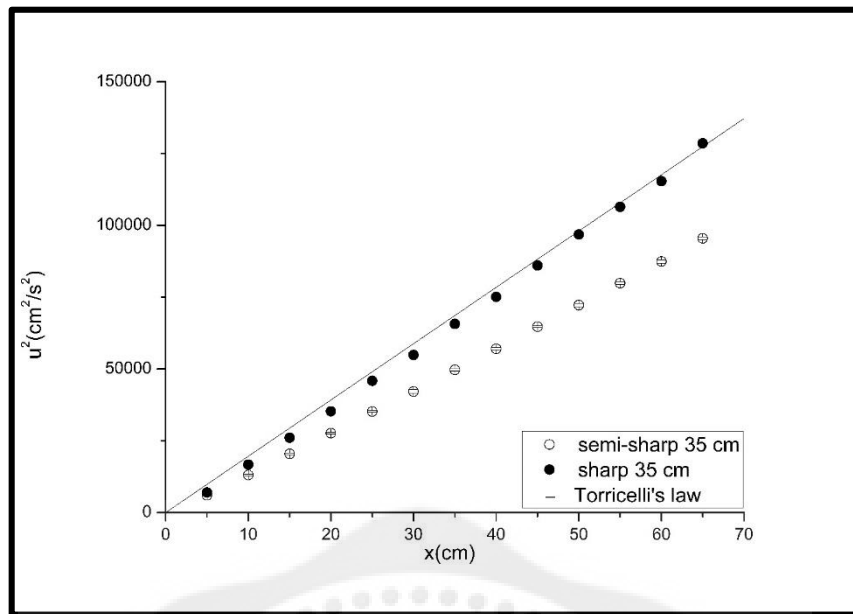
จากภาพประกอบ 29 จะเห็นได้ว่า สำหรับรูเปิดประเภทขอบคม (จุดทึบ) สัมประสิทธิ์ความเร็วของรูเปิด 10, 35, และ 60 ซม. จะมีแนวโน้มคล้ายกับรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม แต่สัมประสิทธิ์ความเร็วของรูเปิดประเภทขอบคมที่ระดับน้ำต่าง ๆ จะมากกว่าเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากผนังของรูเปิดประเภทขอบคมนั้นจะบางกว่าประเภทขอบกึ่งคมอยู่มาก

2. ผลการทดลองเพื่อหาสัมประสิทธิ์ความเร็วจากทฤษฎี

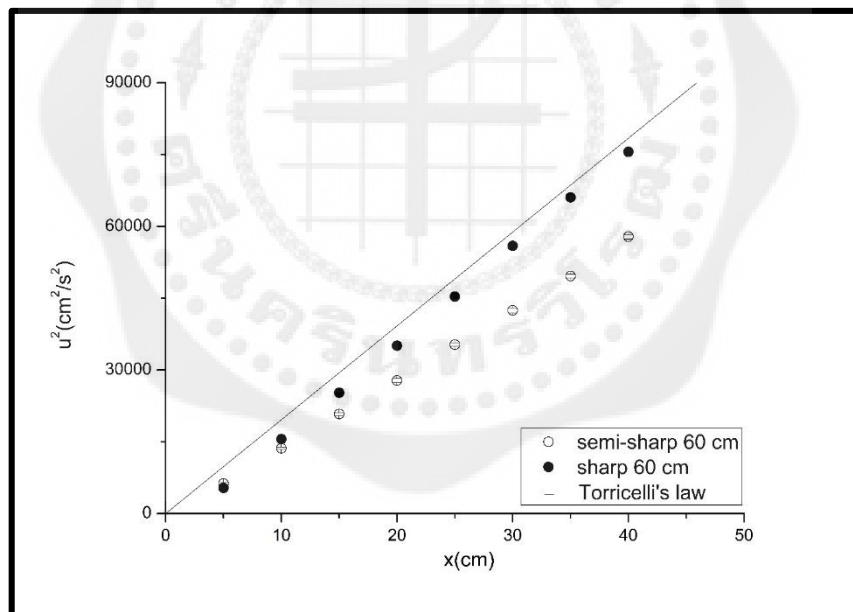
จากที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วจากทฤษฎี เราจำเป็นต้องทราบค่า α_2 และ l ก่อน ซึ่งสามารถหาค่า α_2 และ l ได้จากความชันและจุดตัดแกน x ของสมการ (3.14) สามารถมองเป็นสมการเส้นตรงได้ ถ้าค่า α_2 และ l เป็นค่าคงที่ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทดลองพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกำลังสอง (u^2) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับรูเปิด (x) ของรูเปิดประเภทขอบกึ่งคมและขอบคม ดังภาพประกอบ 32 (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ก.3)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกำลังสอง (u^2) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับรูเปิด (x) จากทฤษฎีของทอริเซลลี (เส้นทึบ) เทียบกับการทดลอง สำหรับรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม(จุดโปร่ง) และขอบคม (จุดทึบ) (ก) รูเปิด (h) 10 ซม. (ข) รูเปิด (h) 35 ซม. (ค) รูเปิด (h) 60 ซม.

จากภาพประกอบ 32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกำลังสอง (u_2^2) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับรูเปิด (x) จะเห็นได้ชัดว่าความเร็วกำลังสอง (u_2^2) ของรูเปิดประเภทขอบคมมีค่ามากกว่าขอบกึ่งคม เนื่องจากสัมประสิทธิ์ความเร็วของรูเปิดประเภทขอบคมมีค่ามากกว่านั่นเอง (เข้าใกล้ 1) ส่งผลให้ความเร็วกำลังสองของรูเปิดประเภทขอบคม (จุดทึบ) มีค่าใกล้เคียงกับเส้นทึบมากกว่า โดยเส้นทึบแสดงความเร็วกำลังสองที่คำนวณมาจากสมการของทอริเซลลี ในกรณีของไหลในอุดมคติ ซึ่งมีสัมประสิทธิ์ความเร็วเท่ากับ 1 (ดูภาคผนวก ข.3 สำหรับกรณีอื่นๆ)

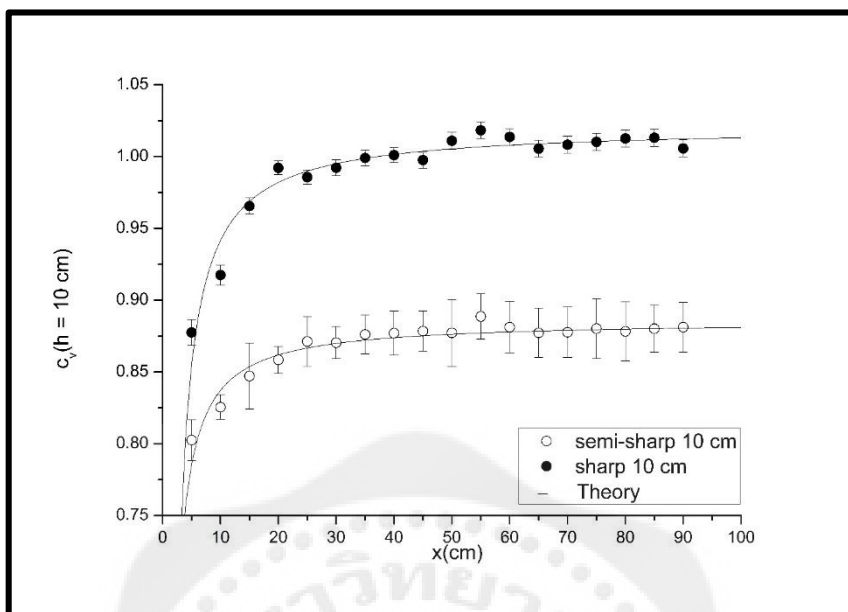
นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกำลังสอง (u_2^2) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับรูเปิด (x) มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ซึ่งหมายความว่าเราสามารถหาค่า α_2 และ l (ที่สามารถประมาณเป็นค่าคงที่) ได้จากความชันและจุดตัดแกน x ของเส้นตรงที่ได้จากการพิตกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวตามลำดับ โดยค่าของ α_2 และ l ของรูเปิดประเภทขอบกึ่งคมและขอบคม ที่ระดับรูเปิด 10, 35, และ 60 ซม. แสดงได้ดังตารางที่ 2

ระดับรูเปิด (h)	ขอบกึ่งคม (semi-sharp)		ขอบคม (sharp)	
	α_2	l (ซม.)	α_2	l (ซม.)
10 ซม.	1.275	1.067	0.956	1.489
35 ซม.	1.323	1.157	0.982	1.886
60 ซม.	1.347	0.700	0.974	2.363

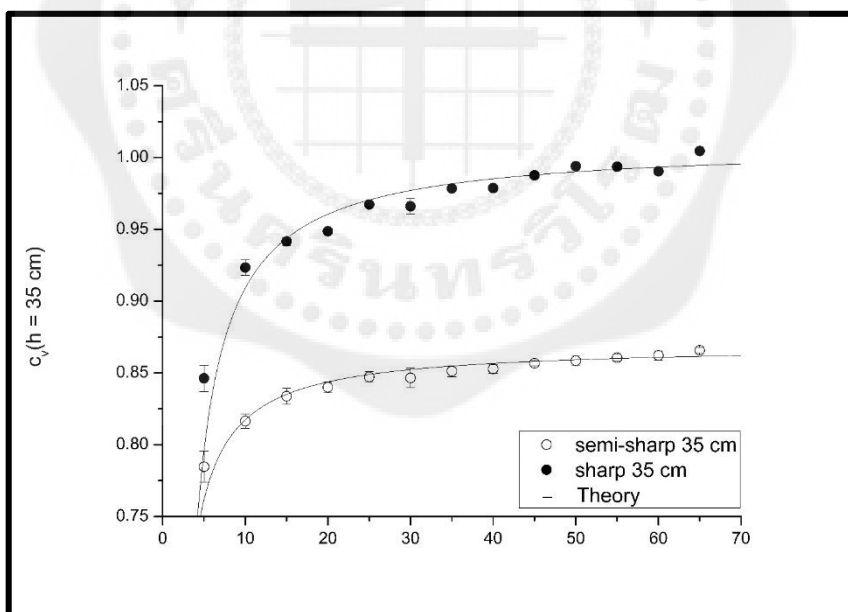
ตาราง 2 แสดงค่า α_2 และ l ของรูเปิดประเภทขอบกึ่งคมและขอบคม ที่รูเปิด 10, 35, และ 60 ซม.

เมื่อแทนค่า α_2 และ l ลงในสมการ (3.16) จะได้สัมประสิทธิ์ความเร็วจากทฤษฎี ซึ่งสามารถหาสัมประสิทธิ์ความเร็วได้ทุกระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับรูเปิด โดยที่สัมประสิทธิ์ความเร็วที่ได้จากทฤษฎีจะแตกต่างกันออกไป สำหรับรูเปิดประเภทต่างๆ ขึ้นอยู่กับค่า α_2 และ l ของรูเปิดนั้นๆ ค่า l ซึ่งเท่ากับ $\Delta w_{loss}/g$ แสดงถึงพลังงานที่สูญเสียไป เนื่องจากกระบวนการไหล ซึ่งส่วนใหญ่จะสูญเสียไปที่บริเวณรูเปิด โดยพลังงานที่สูญเสียไปมากน้อยจะขึ้นอยู่กับความเร็วและพื้นที่ที่น้ำสัมผัสรูเปิด ในช่วงที่ x มีค่ามากๆ น้ำจะไหลแรงแต่มีพื้นที่สัมผัสผิวน้อย ในขณะที่ x น้อยๆ น้ำไหลเบาแต่มีพื้นที่สัมผัสผิวน้ำมากขึ้น ทำให้ตลอดกระบวนการไหล l มีค่าคงที่โดยประมาณ

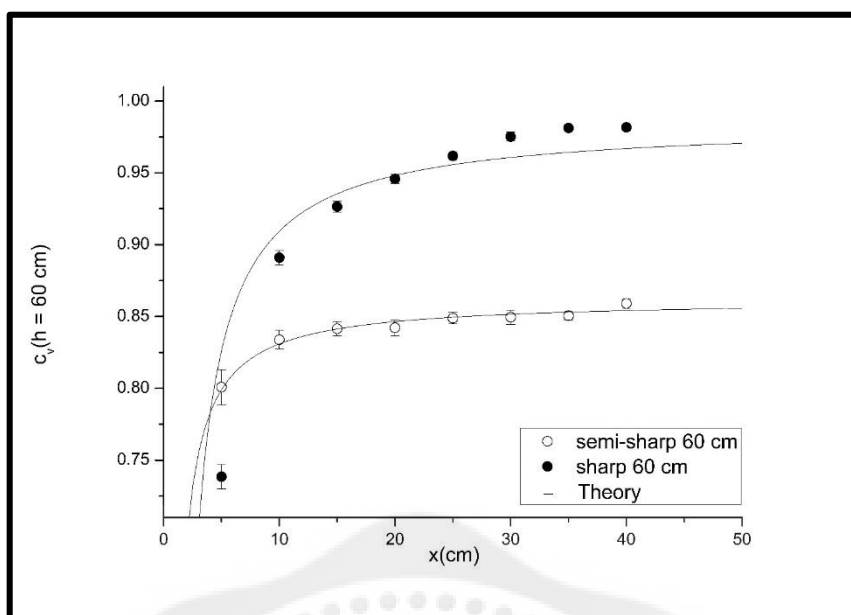
เมื่อนำค่า α_2 และ l ในตารางที่ 2 ไปแทนค่าในสมการ (3.16) จะสามารถเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการทดลอง (ภาพประกอบ 29) กับทฤษฎีได้ ดังภาพประกอบ 33 (ดูภาคผนวก ข.3 สำหรับกรณีอื่นๆ) โดยเส้นทึบแสดงสัมประสิทธิ์ความเร็วจากทฤษฎี



(n)



(n)



(ค)

ภาพประกอบ 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเร็ว (c_v) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับระดับรูเปิด (x) กรณีรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม (จุดโปร่ง) และขอบคม (จุดทึบ) เทียบกับ ทฤษฎี (เส้นทึบ) (ก) รูเปิด (h) 10 ซม. (ข) รูเปิด (h) 35 ซม. (ค) รูเปิด (h) 60 ซม.

จากภาพประกอบ 33 จะเห็นได้ชัดว่าสัมประสิทธิ์ความเร็วของรูเปิด 10, 35, และ 60 ซม. จากการทดลองและทฤษฎีสอดคล้องกันเป็นอย่างดี เมื่อระดับน้ำลดลงเข้าใกล้รูเปิด สัมประสิทธิ์ความเร็วจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เกิดจากการที่ลำนํ้ามีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลผ่านรูเปิดจากแบบโพรงไปเป็นแบบแนบติด ดังที่ได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 1

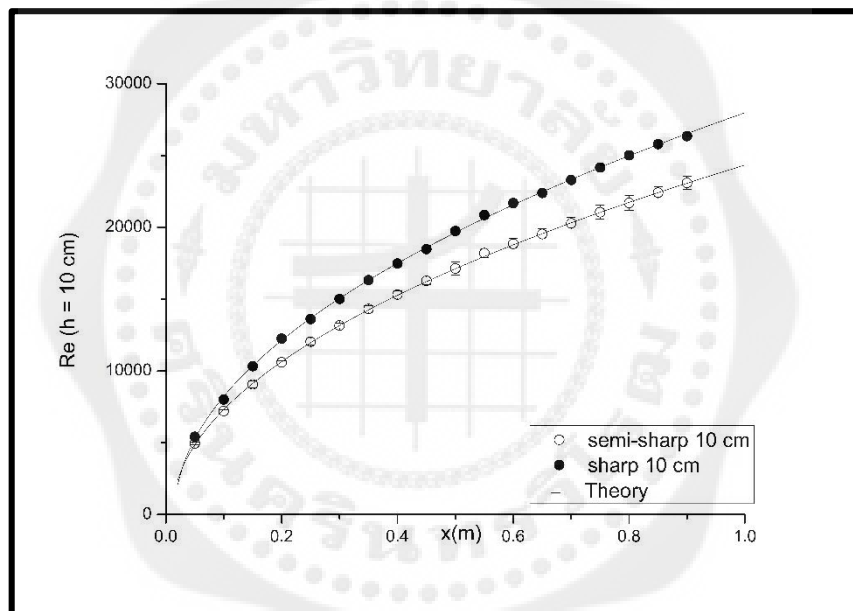
3. ผลการทดลองเพื่อหาเลขเรย์โนลด์

เลขเรย์โนลด์เป็นปริมาณที่แสดงถึงรูปแบบการไหล ว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ ($Re < 2000$) แบบช่วงต่อ ($2000 < Re < 4000$) หรือแบบปั่นป่วน ($Re > 4000$) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.1) ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ เมื่อแทนค่าความเร็วจากสมการ (2.20) จะได้เลขเรย์โนลด์ดังสมการ

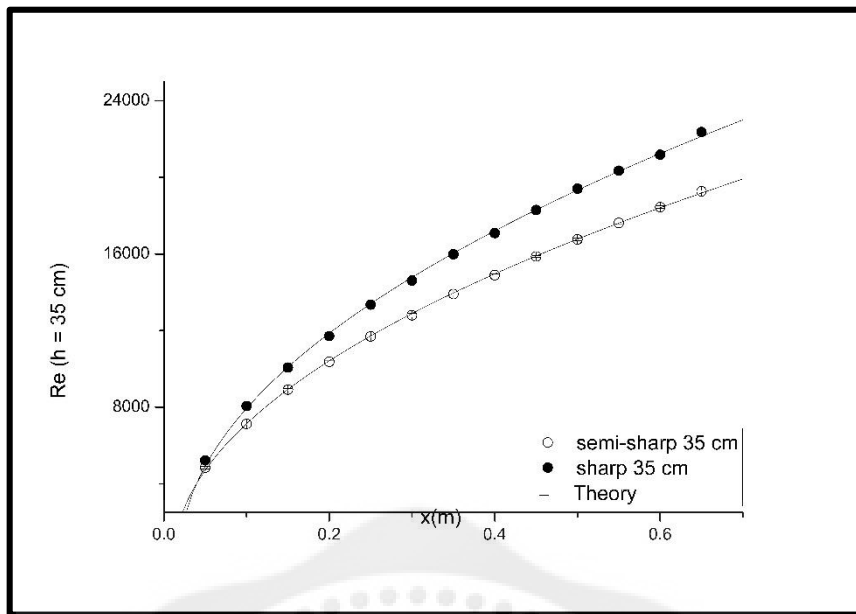
$$Re = \frac{\rho c_v \sqrt{2gx} d}{\mu} \quad (4.1)$$

เมื่อ	C_v	คือ	สัมประสิทธิ์ความเร็ว
	x	คือ	ระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ (เมตร)
	d	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางท่อ (เมตร)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
	μ	คือ	ความหนืดพลวัตของของไหล (พาสคัล·วินาที)

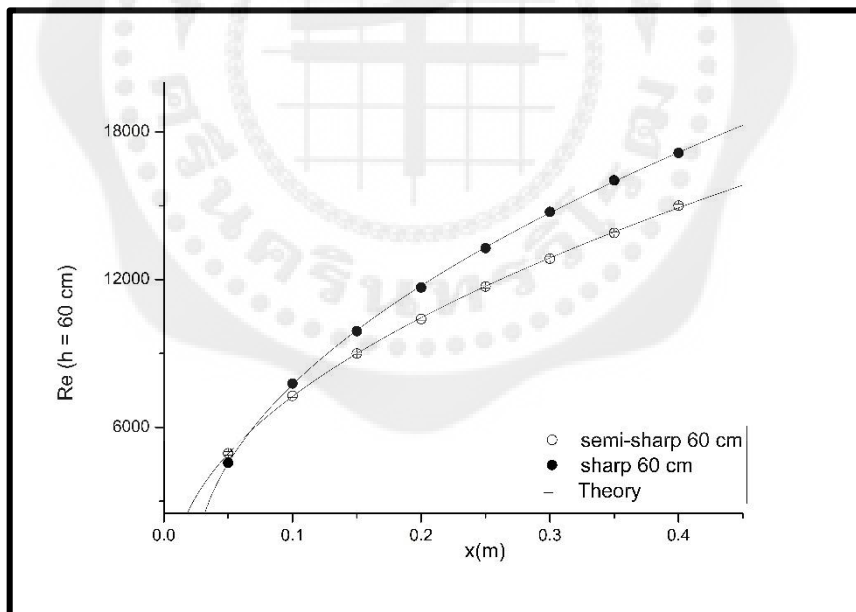
สำหรับงานวิจัยนี้ จะเรียกเลขเรย์โนลด์ที่แทนสัมประสิทธิ์ความเร็วที่ได้จากการทดลองว่า “เลขเรย์โนลด์จากการทดลอง” และในกรณีที่แทนสัมประสิทธิ์ความเร็วจากทฤษฎีสมการ (3.16) จะเรียกเลขเรย์โนลด์ที่ได้ว่า “เลขเรย์โนลด์จากทฤษฎี” แทนค่าต่างๆลงในสมการ (4.1) จะได้จุดการทดลองดังกราฟด้านล่าง (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ก.4 และ ก.5)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ (Re) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับระดับรูเปิด (x) กรณีรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม (จุดโป่ง) และขอบคม (จุดทึบ) เทียบกับทฤษฎี (เส้นทึบ) (ก) รูเปิด (h) 10 ซม. (ข) รูเปิด (h) 35 ซม. (ค) รูเปิด (h) 60 ซม.

จากภาพประกอบ 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ (Re) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับระดับรูเปิด (x) โดยเส้นทึบแสดงเลขเรย์โนลด์จากทฤษฎี (ดูภาคผนวก ข.4 สำหรับกรณีอื่นๆ) จะเห็นได้ชัดว่า เลขเรย์โนลด์ของรูเปิดประเภทขอบคมมีค่ามากกว่าเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าสัมประสิทธิ์ความเร็วที่ตำแหน่ง x ต่างๆ ของรูเปิดประเภทขอบคมมีค่ามากกว่าประเภทขอบกึ่งคม

จากกราฟสังเกตได้ว่า ไม่ว่าจะเป็นรูเปิดประเภทขอบคมหรือประเภทขอบกึ่งคม เลขเรย์โนลด์ล้วนมีค่ามากกว่า 4000 ขึ้นไป ซึ่งตามเกณฑ์สรุปได้ว่า การไหลของน้ำในขณะที่ผ่านมารูเปิดมีรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน ที่ทุกๆ ตำแหน่ง x ในการทดลอง อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าเลขเรย์โนลด์จะมีค่ามากกว่า 4000 ในแต่ละตำแหน่ง x แต่ความยาวของท่อที่ของไหลต้องการในการปรับตัว หรือที่เรียกว่า ความยาวช่วงขาเข้า (Entrance length) ซึ่งมีค่าประมาณ $10d$ หรือเท่ากับ 5 ซม. สำหรับการทดลองแท่งก้น้ำของทอริเชลลี เมื่อ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ซึ่งมีค่ามากกว่าความหนาของผนัง (6 มิลลิเมตร) ถึงประมาณ 8 เท่า ดังนั้นจึงไม่สามารถสรุปได้ว่า การไหลของน้ำผ่านรูเปิดในการทดลองนี้ มีรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน จากการสังเกตลำน้ำที่ไหลผ่านรูเปิด ผู้วิจัยพบว่าลำน้ำที่ไหลออกมามีลักษณะคมชัด เป็นระเบียบ ซึ่งน่าจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ

4. ผลการประเมินคู่มือการทดลองแท่งก้น้ำของทอริเชลลีโดยผู้เชี่ยวชาญ

คู่มือการทดลองแท่งก้น้ำของทอริเชลลี ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายและระดับอุดมศึกษา ใช้ในหน่วยการเรียนรู้เรื่องของไหล ผู้วิจัยได้แบ่งองค์ประกอบของคู่มือการทดลองแท่งก้น้ำของทอริเชลลีออกเป็น 6 ด้านดังนี้

- ด้านที่ 1 การพิมพ์และรูปเล่ม
- ด้านที่ 2 คู่มือครู
- ด้านที่ 3 แผนการจัดการเรียนรู้
- ด้านที่ 4 เอกสารประกอบการเรียน
- ด้านที่ 5 แบบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน
- ด้านที่ 6 บทปฏิบัติการฟิสิกส์

ผู้วิจัยจัดทำเล่มคู่มือการทดลองแท่งก้น้ำของทอริเชลลี และส่งให้ผู้เชี่ยวชาญ 3 คน ประเมินความเหมาะสมขององค์ประกอบ 6 ด้านของคู่มือการทดลองแท่งก้น้ำของทอริเชลลี

ตาราง 3 แสดงค่าเฉลี่ยผลการประเมินความเหมาะสมขององค์ประกอบ 6 ด้าน ของคู่มือการทดลอง
แท้งก์น้ำของทอริเชลลี โดยผู้เชี่ยวชาญ 3 คน (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ค)

ด้านที่ประเมิน	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 5	ด้านที่ 6	รวม
ค่าเฉลี่ย	0.87	1	0.8	1	1	1	0.95

จากตาราง 3 แสดงค่าเฉลี่ยผลการประเมินความเหมาะสมขององค์ประกอบ 6 ด้าน ของคู่มือการทดลองแท้งก์น้ำของทอริเชลลี ในภาพรวมผลการประเมินคู่มือการทดลองแท้งก์น้ำของทอริเชลลีมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในระดับดีมาก (0.95) สำหรับด้านที่ 1 ด้านการพิมพ์และรูปเล่ม ผู้เชี่ยวชาญระบุว่ามีปัญหาในด้านการพิมพ์ผิด พิมพ์ตกหล่น และการเว้นวรรคยังไม่ถูกต้อง ซึ่งผู้วิจัยได้ปรับแก้ด้านการพิมพ์และรูปเล่มตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ และสำหรับด้านที่ 3 ผู้เชี่ยวชาญ 1 คน ไม่แน่ใจการประเมินด้านแผนการจัดการเรียนรู้

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

ในการจัดทำวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์ความเร็วในการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี (Torricelli's tank experiment) ของรูเปิดประเภทขอบคม (sharp edge) และขอบกึ่งคม (semi-sharp edge) และจัดทำคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี สำหรับประกอบการเรียนการสอนในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายและระดับอุดมศึกษา โดยเริ่มแรกผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาการหาระยะทางการตกของน้ำที่ไกลที่สุด ซึ่งสัมพันธ์กับระดับน้ำและระดับรูเปิด ด้วยการตั้งคำถามว่า “ถ้าเราต้องการรดน้ำแปลงผักที่มีความยาว 90 เซนติเมตร จะต้องใส่น้ำเท่าไรและเปิดรูไหน จึงจะสามารถรดน้ำแปลงผักได้ทั้งหมด โดยใช้ระดับน้ำต่ำที่สุด” จากการคำนวณพบว่า “สำหรับระดับน้ำหนึ่งๆ ระยะทางการตกของน้ำที่ไกลที่สุดจะมีค่าเท่ากับระดับน้ำที่ใส่ เมื่อเปิดรูตรงกลาง”

ต่อมาผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างชุดการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี เพื่อทำการทดลองวัดระยะทางการตกของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม พบว่าระยะทางการตกของน้ำมีค่าน้อยกว่าอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับทฤษฎีสำหรับของไหลอุดมคติ (ideal fluid) เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานระหว่างการไหล ในกรณีที่ของไหลไม่ใช่ของไหลในอุดมคติ ความเร็วของน้ำที่พุ่งออกจากรูเปิดจะมีค่าน้อยกว่าความเร็วที่คำนวณโดยสมการของทอร์ริเชลลี (Torricelli's equation) ดังนั้น ในการอธิบายการไหลของของไหลจริง จึงนิยามสัมประสิทธิ์ความเร็ว (velocity coefficient : c_v) โดย $c_v = u_2 / v_2 \leq 1$ เมื่อ u_2 คือความเร็วจากการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี และ v_2 คือความเร็วที่คำนวณจากสมการของทอร์ริเชลลี สำหรับของไหลอุดมคติ ผู้วิจัยได้ศึกษาสัมประสิทธิ์ความเร็ว ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดทั้งประเภทขอบกึ่งคมและขอบคมที่ระดับน้ำต่างๆ จากการทดลองพบว่า สัมประสิทธิ์ความเร็วของรูเปิดในระดับต่างๆ มีแนวโน้มเหมือนกัน โดยในกรณีที่ระดับน้ำสูงๆ ลำน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดจะมีลักษณะการไหลแบบโพรงและสัมประสิทธิ์ความเร็วจะมีค่าคงที่โดยประมาณโดยมีค่าประมาณ 1 สำหรับรูเปิดประเภทขอบคม ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ความเร็วในกรณีของของไหลอุดมคติ และมีค่าประมาณ 0.85 สำหรับรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม เมื่อระดับน้ำลดลงเข้าใกล้รูเปิดมากขึ้น สัมประสิทธิ์ความเร็วจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากลำน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดในช่วงนี้มีลักษณะการไหลแบบแนบติด ในช่วงที่สัมประสิทธิ์ความเร็วกำลังลดลงนี้ สัมประสิทธิ์ความเร็วของรูเปิดประเภทขอบคม ก็ยังคงมากกว่าของรูเปิดประเภทขอบกึ่งคมเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากผนังของรูเปิดประเภทขอบคมจะบางกว่าประเภทขอบกึ่งคมอยู่พอสมควร นอกจากนี้ผู้วิจัยยังสามารถหาสมการของสัมประสิทธิ์ความเร็วที่สอดคล้องกับการทดลองได้ โดยการวิเคราะห์สมการแบร์นูลลี (Bernoulli equation) ที่คิดการสูญเสียพลังงานร่วมด้วย

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ความเร็วของรูเปิดประเภทขอบคม มีแนวโน้มมากกว่าของรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม ที่ระดับรูเปิดเดียวกัน ผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์ใช้ผลการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี เพื่อใช้ในการจัดการเรียนรู้เชิงรุก (active learning) แบบการใช้ปัญหาเป็นฐาน (problem based learning) ซึ่งผู้วิจัยได้จัดทำคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี สำหรับระดับมัธยมศึกษาตอนปลายและระดับอุดมศึกษา โดยระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ผู้วิจัยทำเอกสารการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี เฉพาะการใช้รูเปิดประเภทขอบคม เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งส่งผลให้ระยะทางการตกของน้ำจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีสำหรับของไหลอุดมคติมากกว่าการตกของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม สำหรับระดับอุดมศึกษา ผู้วิจัยได้จัดทำบทปฏิบัติการแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี โดยผู้วิจัยแนะนำให้ใช้รูเปิดประเภทขอบกึ่งคมร่วมกับรูเปิดประเภทขอบคม เพื่อให้ผู้เรียนเข้าใจหลักการของสัมประสิทธิ์ความเร็วในการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลีมากขึ้น





บรรณานุกรม

กระทรวงการศึกษธิการ. (2551). หลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551.

กรุงเทพฯ: ชุมชนสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย กระทรวงฯ.

กฤตชัย(สมชาย) จันทระจตุรงค์. คู่มือกฟิเตดฟิสิกส์ ม.4-5-6 ฉบับเตรียมสอบสายวิทย์ เล่ม 1.

นนทบุรี: ธรรมบัณฑิต.

กอบเกียรติ ผ่องพุฒ. (2540). ทฤษฎีและตัวอย่างโจทย์กลศาสตร์ของของไหล Mathcad. พิมพ์ครั้งที่ 1.

กรุงเทพฯ: แมคกรอ - ฮิล .

มัชฌิณี ธนพิมพ์สาร. (2555). กลศาสตร์ของไหลสถิต (MECHANICS OF FLUID STATIC). พิมพ์ครั้งที่ 1. ม.ป.ท.: ปิตาบุคส์ .

ทวีข จิตรสมบูรณ์. (2553). ทฤษฎีและตัวอย่างโจทย์กลศาสตร์ของของไหล Mathcad. พิมพ์ครั้งที่ 1.

กรุงเทพฯ: แมคกรอ - ฮิล .

ไพศาล สุวรรณน้อย. (2559). เอกสารประกอบการบรรยายโครงการพัฒนาการเรียนการสอน.

กรุงเทพฯ

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. (2553). คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ ฟส 180 ปฏิบัติการฟิสิกส์ทั่วไป. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

ภัทราวดี มากมี. (2554, มกราคม-มิถุนายน). การเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐาน. วารสารวิชาการ. ปีที่ (ฉบับที่): หน้าที่ย่างอิง มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ฉบับสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์.

กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย.

วิจารณ์ พานิช. (2555). วิธีสร้างการเรียนรู้เพื่อศิษย์ในศตวรรษที่ 21. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: มูลนิธิสดศรี-สฤษดิ์วงศ์.

วิศิษฐ์ จาตุรमान; และ ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์. (2535). กลศาสตร์ของไหล. พิมพ์ครั้งที่ 4.

กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดบุคยูเคชั่น .

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) กระทรวงการศึกษธิการ. (2555). ครู 143

กรุงเทพฯ: กระทรวงการศึกษธิการ.

Ansaldo E. (1982) On Bernoulli, Torricelli, and the siphon. *The Physics Teacher*. 20: 243- 4.

Apiwan S. (2018) Development of instructional manual encouraging student active learning for high school teaching on fluid mechanics through Torricelli's tank experiment.

INTERNATIONAL CONFERENCE FOR SCIENCE EDUCATORS AND TEACHERS

(ISET) 2017: Proceedings of the 5th International Conference for Science Educators and Teachers (ISET) 2017. (1923): 030002-1-030002-6.

Clanet C. (2000) Clepsydrae, from Galilei to Torricelli. *Physics of Fluids*. 12(11): 2743-51.

Collins JW, (2011) O'Brien NP. The Greenwood dictionary of education. ABC-CLIO.

- De Oliveira PMC, (2000) Delfino A, Costa EV, Leite CAF. Pin-hole water flow from cylindrical bottles. *Physics Education*. 35(2): 110.
- Delisle R. (1997) How to use problem-based learning in the classroom. Ascd; 1997.
- Dougherty RL, Franzini J. (1985) *Fluid Mechanics with Engineering Application*. McGraw-Hill. 419-21.
- Edwards S. (2014) getting them to talk: A guide to leading discussions in middle grades classrooms. Association for Middle Level Education.
- Edwards S. (2015) Active Learning in the Middle Grades: This Article Offers Examples of Developing Students' Participation as a Central Tenet of Ideal Middle Level Education That Is Intellectually Active, Socially Active, and Physically Active. *Middle School Journal*. 46(5): 26-32.
- Groetsch C. (1993) Inverse problems and Torricelli's law. *The College Mathematics Journal*. 24(3): 210-7.
- Jewett JW, Serway RA. (2008) *Physics for scientists and engineers with modern physics*. Cengage Learning EMEA.
- Kirkup, Les; & Frenkel, Robert B. (2006). *An Introduction to Uncertainty in Measurement: Using the Gum (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)*. Cambridge University Press.
- Mills D, Adler C. (2003) *Physics for Scientists and Engineers Student Solutions Manual*. Macmillan.
- Nesin G. (2012) this we believe in action: Implementing successful middle level schools. Weste, Westerville, OH: *Association for Middle Level Education*.
- Saletaa ME, Tobiab D, Gilc S. Experimental study of Bernoulli's equation with losses.
- Stix A. (2004) Social studies strategies for active learning. Teacher Created Materials.
- Wheeler D. (2005) A taxonomy for learning, teaching and assessing. *Revista Brasileira de Aprendizagem Aberta ea Distância*. 1.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

- ก.1 การคำนวณสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการทดลอง
- ก.2 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการทดลอง
- ก.3 การคำนวณความเร็วเฉลี่ยกำลังสองและค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานความเร็วเฉลี่ยกำลังสอง
- ก.4 การคำนวณเลขเรย์โนลด์
- ก.5 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของเลขเรย์โนลด์

ก.1 การคำนวณสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการทดลอง

ในการทดลองนี้เราทำการทดลองวัดระยะทางการตกของน้ำ (s) เมื่อระดับน้ำลดลงทุก ๆ 5 เซนติเมตร ของรูเปิดประเภทขอบกึ่งคมที่ระดับ 35 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำ 40 เซนติเมตร ทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังตาราง ก.1

s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}
20.6	21.2	20.8	20.7	21.1	20.7	20.8	20.1	20.8	20.8

ตาราง ก.1 แสดงระยะทางการตกของน้ำวัดที่ระดับน้ำ 40 เซนติเมตร

เนื่องจากระดับรูเปิดเท่ากับ 35 เซนติเมตร และระดับน้ำเท่ากับ 40 เซนติเมตรทั้ง 10 ครั้ง ดังนั้นระยะห่างระหว่างระดับน้ำถึงรูเปิด (x) เท่ากับ 5 เซนติเมตรทั้ง 10 ครั้ง

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

ตาราง ก.2 แสดงระยะห่างระหว่างระดับน้ำถึงรูเปิดในการทดลองทั้ง 10 ครั้ง

ในการแสดงการคำนวณนั้น เราวัดระยะทางการตกของน้ำ เมื่อระดับน้ำเท่า 40 เซนติเมตร ทั้ง 10 ครั้ง ดังนั้นระดับน้ำที่เรานำมาคำนวณเท่ากันทั้ง 10 ครั้ง ดังตาราง ก.3

H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_8	H_9	H_{10}
40	40	40	40	40	40	40	40	40	40

ตาราง ก.3 แสดงระดับน้ำในการทดลองทั้ง 10 ครั้ง

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็ว สามารถหาได้จากสมการ

$$c_v = \frac{s}{2\sqrt{(H-x)x}} \quad (\text{ก.1})$$

เนื่องจากในการทดลองนี้ ทำการทดลองซ้ำ 10 ครั้ง ดังนั้นค่าต่าง ๆ ที่นำมาแทนค่าในสมการ (ก.1) สามารถหาได้จากสมการ (ก.2)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ x_i คือ ค่าสังเกตของข้อมูลลำดับที่ i
 n คือ จำนวนตัวอย่างข้อมูล

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็ว จากสมการ (ก.1) เราต้องหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตของระยะทางการตกของน้ำ (s) ระยะห่างระหว่างระดับน้ำถึงรูเปิด (x) และระดับน้ำ (H) โดยแทนค่าผลการทดลองจากตาราง ก.1, ก.2 และ ก.3 ลงในสมการ (ก.2) จะได้

ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของระยะทางการตกของน้ำ (x_s)

$$x_s = \frac{\sum_{i=1}^n x_{s_i}}{n}$$

$$x_s = \frac{20.6 + 21.2 + 20.8 + 20.7 + 21.1 + 20.7 + 20.8 + 20.1 + 20.8 + 20.8}{10}$$

$$x_s = 20.76 \text{ เซนติเมตร}$$

ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของระยะห่างระหว่างระดับน้ำถึงรูเปิด (x_x)

$$x_x = \frac{\sum_{i=1}^n x_{x_i}}{n}$$

$$x_x = \frac{5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5}{10}$$

$$x_x = 5 \text{ เซนติเมตร}$$

ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของระดับน้ำ (x_H)

$$x_H = \frac{\sum_{i=1}^n x_{H_i}}{n}$$

$$x_H = \frac{40 + 40 + 40 + 40 + 40 + 40 + 40 + 40 + 40 + 40}{10}$$

$$x_H = 40 \text{ เซนติเมตร}$$

แทนค่าเฉลี่ยเลขคณิตของระยะทางการตกของน้ำ (x_s) ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของระยะห่างระหว่างระดับน้ำถึงรูเปิด (x_x) และค่าเฉลี่ยเลขคณิตของระดับน้ำ (x_H) ที่ได้จากการแทนค่าในสมการ (ก.2) ลงในสมการ (ก.1) จะได้

$$c_v = \frac{20.76}{2\sqrt{(40-5)5}} = 0.785 \quad (\text{ก.3})$$

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วของรูเปิดประเภทขอบกึ่งคมระดับ 35 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำ 40 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 0.785

ก.2 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของสัมประสิทธิ์ความเร็ว

การประมาณค่าที่ดีที่สุดของระยะทางการตกของน้ำ (s) ระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับรูเปิด (x) และระดับน้ำ (H) จะถูกนำมารวมกันเพื่อหาการประมาณค่าที่ดีที่สุดของสัมประสิทธิ์ความเร็ว (c_v) ซึ่งในการหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน (standard uncertainty) ของสัมประสิทธิ์ความเร็ว นั้น เราจำเป็นต้องหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของแต่ละตัวก่อน

ก.2.1 การประมาณค่าที่ดีที่สุดและความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะทางการตกของน้ำ

ก.2.1.1 การประมาณค่าที่ดีที่สุดของระยะทางการตกของน้ำ

การประมาณค่าที่ดีที่สุดของระยะทางการตกของน้ำ สามารถหาได้จากสมการ

$$s = x_s + z_s \quad (\text{ก.4})$$

โดยที่ x_s คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทางการตกของน้ำทั้ง 10 ครั้ง

z_s คือ พจน์แก้ไขเพื่อคิดผลกระทบของความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะทางการตกของน้ำ $u(x_s)$ สามารถหาได้จากสมการ

$$u(x_s) = S.D.(s) / \sqrt{n} \quad (\text{ก.5})$$

เมื่อ $S.D.(s)$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่างของระยะทางการตกของน้ำ

ในการหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะทางการตกของน้ำ $u(x_s)$ เราต้องหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานประชากรของระยะทางการตกของน้ำ จากสมการ

$$S.D.(s) = \sqrt{\frac{\sum (x_{s_i} - x_s)^2}{n-1}} \quad (\text{ก.6})$$

แทนค่าค่าเฉลี่ยเลขคณิตของระยะทางการตกของน้ำ และระยะทางการตกของน้ำทั้ง 10 ครั้ง จากตาราง ก.1 ลงในสมการ (ก.6) จะได้

$$S.D.(s) = \sqrt{\frac{\sum (x_{s_i} - x_s)^2}{n-1}} = 0.295 \quad (\text{ก.7})$$

แทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะทางการตกของน้ำ จากสมการ (ก.7) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.295 ลงในสมการ (ก.5) เพื่อหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะทางการตกของน้ำ $u(x_s)$ จะได้

$$\begin{aligned} u(x_s) &= 0.295 / \sqrt{10} \\ u(x_s) &= 0.093 \end{aligned} \quad (\text{ก.8})$$

เลขของศาเสรี (ν_{x_s}) ที่สอดคล้องกับ $u(x_s)$ จะมีค่าเท่ากับจำนวนครั้งที่ทำการทดลองน้อยลงหนึ่งซึ่งในที่นี้ $\nu_{x_s} = 10-1=9$

ก.2.1.2 การคำนวณค่าแก้และความไม่แน่นอนมาตรฐานของพจน์แก้ที่เกิดจากผลกระทบของความคลาดเคลื่อนเชิงระบบของระยะทางการตกของน้ำ

การประมาณค่าที่ดีที่สุดของค่าแก้ขึ้นอยู่กับหลายปริมาณ ได้แก่ ข้อผิดพลาดการสอบเทียบ และข้อผิดพลาดความละเอียด ในการทดลองนี้ เราจำกัดค่าแก้และค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของค่าแก้ที่เกิดจากผลกระทบของความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ เพื่อการพิจารณาข้อผิดพลาดความละเอียดเท่านั้น เราควบคุมการประมาณค่าที่ดีที่สุดของค่าแก้ให้มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้น จากสมการ (ก.4) การประมาณค่าที่ดีที่สุดของระยะทางการตกของน้ำ คือ

$$s = x_s + z_s = (20.76 + 0) = 20.76 \text{ ซม.} \quad (\text{ก.9})$$

ความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากข้อจำกัดความละเอียดของเครื่องมือวัด $u(z_s)$ สามารถหาได้จากสมการ

$$u(z_s) = \delta / \sqrt{12} \quad (\text{ก.10})$$

เมื่อ δ คือ ค่าความละเอียดของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดระยะทางการตกของน้ำ

ในการทดลองเท็งก์น้ำของทอริริเซลล์ เครื่องมือวัดที่ใช้มีความละเอียดเท่ากับ 0.1 เซนติเมตร ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากข้อจำกัดความละเอียดของเครื่องมือวัด จะเท่ากับ

$$u(z_s) = 0.1 / \sqrt{12} = 0.029 \quad (\text{ก.11})$$

เนื่องจากความไม่แน่นอน $u(z_s)$ เป็นศูนย์ เลขของศาเสรีที่สอดคล้องกับ $u(z_s)$ จึงมีค่ามากเข้าสู่นันต์ นั่นคือ $v_{z_s} \rightarrow \infty$

ก.2.1.3 การรวมกันของความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะทางการตกของน้ำ

การรวมกันของความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะทางการตกของน้ำ $u^2(s)$ สามารถหาได้จากสมการ

$$u^2(s) = u^2(x_s) + u^2(z_s) \quad (\text{ก.12})$$

แทนค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะทางการตกของน้ำ $u(x_s)$ และความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากข้อจำกัดความละเอียดของเครื่องมือวัด $u(z_s)$ ลงในสมการ (ก.12) จะได้

$$u^2(s) = (0.093)^2 + (0.028)^2$$

$$u^2(s) = 0.009$$

$$u(s) = 0.098 \quad (\text{ก.13})$$

เพราะฉะนั้น การรวมกันของความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะทางการตกของน้ำมีค่าเท่ากับ 0.098

ในการคำนวณเลขของศาเสรียังผล สำหรับความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะทางการตกของน้ำ เราใช้สูตรของ Welch-Satterthwaite จากสมการ

$$v_{eff}(s) = \frac{u^4(s)}{\frac{u^4(x_s)}{v_{x_s}} + \frac{u^4(z_s)}{v_{z_s}}} \quad (\text{ก.14})$$

แทนค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะทางการตกของน้ำ $u(x_s)$ จากสมการ (ก.8) ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากข้อจำกัดความละเอียดของเครื่องมือวัด $u(z_s)$ จากสมการ (ก.11) และค่าความไม่แน่นอนของระยะทางการตกของน้ำ $u(s)$ จากสมการ (ก.13) ลงในสมการ (ก.14) จะได้

$$v_{eff}(s) = \frac{9.110 \times 10^{-5}}{\left(\frac{0.00006147}{9} \right) + 0}$$

$$v_{eff}(s) = 10.804 \quad (\text{ปัดลงให้เป็น } 10) \quad (\text{ก.15})$$

ดังนั้น เลขของศาเสรียังผลของความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะทางการตกของน้ำมีค่าเท่ากับ 10

ก.2.2 การประมาณค่าที่ดีที่สุดและความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ

ก.2.2.1 การประมาณค่าที่ดีที่สุดของระยะทางการตกของน้ำ

การประมาณค่าที่ดีที่สุดของระยะทางการตกของน้ำ สามารถหาได้จาก

$$X = X_x + Z_x \quad (\text{ก.16})$$

โดยที่ X_x คือ ค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ

Z_x คือ พจน์แก้ไขเพื่อคิดผลกระทบของความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ $u(x_x)$ สามารถหาได้จากสมการ

$$u(x_x) = S.D.(x) / \sqrt{n} \quad (\text{ก.17})$$

เมื่อ $S.D.(x)$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่างของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ

การหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ $u(x_x)$ ต้องหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานประชากรของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำจากสมการ

$$S.D.(x) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_x)^2}{n-1}} \quad (\text{ก.18})$$

แทนค่าเฉลี่ยเลขคณิตของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ และระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำทั้ง 10 ครั้งจากตาราง ก.3 ลงในสมการ (ก.18) จะได้

$$S.D.(x) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_x)^2}{10-1}} = 0 \quad (\text{ก.19})$$

แทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำจากสมการ (ก.19) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 ลงในสมการ (ก.17) เพื่อหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ $u(x_x)$ จะได้

$$u(x_x) = 0 / \sqrt{10} = 0 \quad (\text{ก.20})$$

เลขของศาเสรี (ν_{x_x}) ที่สอดคล้องกับ $u(x_x)$ จะมีค่าเท่ากับจำนวนครั้งที่ทำการทดลองน้อยลงหนึ่ง ซึ่งในที่นี้ $\nu_{x_x} = 10-1=9$

ก.2.2.2 การคำนวณค่าแก้และความไม่แน่นอนมาตรฐานของพจน์แก้ที่เกิดจากผลกระทบของความคลาดเคลื่อนเชิงระบบของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ

การประมาณค่าที่ดีที่สุดของค่าแก้ขึ้นอยู่กับหลายปริมาณ ได้แก่ ข้อผิดพลาดการสอบเทียบ และข้อผิดพลาดความละเอียด ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยจำกัดค่าแก้และความไม่แน่นอนมาตรฐานของค่าแก้ที่เกิดจากผลกระทบของความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ เพื่อการพิจารณาข้อผิดพลาดความละเอียดเท่านั้น ผู้วิจัยควบคุมการประมาณค่าที่ดีที่สุดของค่าแก้ให้มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้น จากสมการ (ก.16) การประมาณค่าที่ดีที่สุดของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ คือ

$$x = x_x + z_x = 5 + 0 \text{ ซม.}$$

ความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากข้อจำกัดความละเอียดของเครื่องมือวัด $u(z)$ สามารถหาได้จากสมการ

$$u(z_x) = \delta / \sqrt{12} \quad (\text{ก.21})$$

เมื่อ δ คือ ค่าความละเอียดของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ

ในการทดลองแท่งก้นน้ำของทอรัลลี เครื่องมือวัดที่ใช้มีค่าความละเอียดเท่ากับ 0.2 เซนติเมตร ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากข้อจำกัดความละเอียดของเครื่องมือวัด จะเท่ากับ

$$u(z_x) = 0.2 / \sqrt{12}$$

$$u(z_x) = 0.058 \quad (\text{ก.22})$$

เนื่องจากความไม่แน่นอน $u(z_x)$ เป็นศูนย์ เลขของศาเสรีที่สอดคล้องกับ $u(z_x)$ จึงมีค่ามากเข้าสู่อินฟินิตี้ นั่นคือ $\nu_{z_x} \rightarrow \infty$

ก.2.2.3 การรวมกันของความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ

การรวมกันของความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ สามารถหาได้จากสมการ

$$u^2(x) = u^2(x_x) + u^2(z_x) \quad (\text{ก.23})$$

แทนค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ $u(x_x)$ จากสมการ (ก.20) และความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากข้อจำกัดความละเอียดของเครื่องมือวัด $u(z_x)$ จากสมการ (ก.22) ลงในสมการ (ก.23)

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad u^2(x) &= (0)^2 + (0.058)^2 \\ u^2(x) &= 0.003 \\ u(x) &= 0.058 \end{aligned} \quad (\text{ก.24})$$

เพราะฉะนั้น การรวมกันของความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำมีค่าเท่ากับ 0.058

ในการคำนวณเลขของศาเสรียังผล สำหรับความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ เราใช้สูตรของ Welch-Satterthwaite จากสมการ

$$v_{\text{eff}}(x) = \frac{u^4(x)}{\frac{u^4(x_x)}{v_{x_x}} + \frac{u^4(z_x)}{v_{z_x}}} \quad (\text{ก.25})$$

แทนค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ $u(x_x)$ จากสมการ (ก.20) ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากข้อจำกัดความละเอียดของเครื่องมือวัด $u(z_x)$ จากสมการ (ก.22) และค่าความไม่แน่นอนของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ $u(x)$ จากสมการ (ก.24) ลงในสมการ (ก.25) จะได้

$$v_{\text{eff}}(x) = \frac{1.110 \times 10^{-5}}{\left(\frac{0}{9}\right) + 0} = \text{หาค่าไม่ได้} \quad (\text{ก.26})$$

ดังนั้น เลขของศาเสรียังผลของความไม่แน่นอนมาตรฐานของระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำหาค่าไม่ได้

ก.2.3 การประมาณค่าที่ดีที่สุดและความไม่แน่นอนมาตรฐานของระดับน้ำ

ก.2.3.1 การประมาณค่าที่ดีที่สุดของระดับน้ำ

การประมาณค่าที่ดีที่สุดของระดับน้ำ สามารถหาได้จากสมการ

$$H = x_H + z_H \quad (\text{ก.27})$$

โดยที่ x_H คือ ค่าเฉลี่ยของการวัดระดับน้ำทั้ง 10 ครั้ง

z_H คือ พจน์แก้สำหรับผลกระทบของความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของระดับน้ำ $u(x_H)$ สามารถหาได้จาก

$$u(x_H) = S.D.(H) / \sqrt{n} \quad (\text{ก.28})$$

เมื่อ $S.D.(H)$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่างของระดับน้ำ

ในการหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของระดับน้ำ $u(x_H)$ เราต้องหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่างของระดับน้ำ จากสมการ

$$S.D.(H) = \sqrt{\frac{\sum (x_{H_i} - x_H)^2}{n-1}} \quad (\text{ก.29})$$

แทนค่าค่าเฉลี่ยเลขคณิตระดับน้ำ และระดับน้ำทั้ง 10 ครั้งจากตาราง ก.3 จะได้

$$S.D.(H) = \sqrt{\frac{\sum (x_{H_i} - x_H)^2}{10-1}} = 0 \quad (\text{ก.30})$$

แทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับน้ำ ที่ได้จากสมการ (ก.30) ลงในสมการ (ก.28) เพื่อหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของระดับน้ำ $u(x_H)$ จะได้

$$u(x_H) = 0 / \sqrt{10} = 0 \quad (\text{ก.31})$$

เลขของศาเสรี (ν_{x_H}) ที่สอดคล้องกับ $u(x_H)$ จะมีค่าเท่ากับจำนวนครั้งที่ทำการทดลองน้อยลงหนึ่ง ซึ่งในที่นี้ $\nu_{x_H} = 10-1=9$

ก.2.3.2 การคำนวณค่าแก้และความไม่แน่นอนมาตรฐานของพจน์แก้ที่เกิดจากผลกระทบของความคลาดเคลื่อนเชิงระบบของระดับน้ำ

การประมาณค่าที่ดีที่สุดของค่าแก้ขึ้นอยู่กับหลายปริมาณ ได้แก่ ข้อผิดพลาดการสอบเทียบ และข้อผิดพลาดความละเอียด ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยจำกัดค่าแก้และค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของค่าแก้ที่เกิดจากผลกระทบของความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ เพื่อการพิจารณาข้อผิดพลาดความละเอียดเท่านั้น ผู้วิจัยควบคุมการประมาณค่าที่ดีที่สุดของค่าแก้ให้มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้น จากสมการ (ก.27) การประมาณค่าที่ดีที่สุดของระดับน้ำ คือ

$$H = x_H + z_H = 40 + 0 = 40 \text{ ซม.}$$

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากข้อจำกัดความละเอียดของเครื่องมือวัด $u(z)$ สามารถหาได้จากสมการ

$$u(z_H) = \delta / \sqrt{12} \quad (\text{ก.32})$$

เมื่อ δ คือ ค่าความละเอียดของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดระดับน้ำ

ในการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี เครื่องมือวัดที่ใช้มีค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 เซนติเมตร ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากข้อจำกัดความละเอียดของเครื่องมือวัด จะเท่ากับ

$$u(z_H) = 0.1/\sqrt{12}$$

$$u(z_H) = 0.029 \quad (\text{ก.33})$$

เนื่องจากความไม่แน่นอน $u(z_x)$ เป็นศูนย์ เลขของศาเสรีที่สอดคล้องกับ $u(z_x)$ จึงมีค่ามาก เข้าสู่อนันต์ นั่นคือ $v_{x_s} \rightarrow \infty$

ก.2.3.3 การรวมกันของความไม่แน่นอนมาตรฐานของระดับน้ำ

การรวมกันของความไม่แน่นอนมาตรฐานของระดับน้ำ สามารถหาได้จาก

$$u^2(H) = u^2(x_H) + u^2(z_H) \quad (\text{ก.34})$$

แทนค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของระดับน้ำ $u(x_H)$ จากสมการ (ก.31) และความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากข้อจำกัดความละเอียดของเครื่องมือวัด $u(z_H)$ จากสมการ (ก.33) ลงในสมการ (ก.34)

จะได้

$$u^2(H) = (0)^2 + (0.029)^2$$

$$u^2(H) = 0.0008$$

$$u(H) = 0.029 \quad (\text{ก.35})$$

เพราะฉะนั้น การรวมกันของความไม่แน่นอนมาตรฐานของระดับน้ำมีค่าเท่ากับ 0.029

ในการคำนวณเลขของศาเสรียังผลสำหรับความไม่แน่นอนมาตรฐานของระดับน้ำ เราใช้สูตรของ Welch-Satterthwaite จากสมการ

$$v_{\text{eff}}(H) = \frac{u^4(H)}{\frac{u^4(x_H)}{v_{x_H}} + \frac{u^4(z_H)}{v_{z_H}}} \quad (\text{ก.36})$$

แทนค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของระดับน้ำ $u(x_H)$ จากสมการ (ก.31) ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากข้อจำกัดความละเอียดของเครื่องมือวัด $u(z_H)$ จากสมการ (ก.33) และค่าความไม่แน่นอนของของระยะทางการตกของน้ำ $u(H)$ จากสมการ (ก.35) ลงในสมการ (ก.36)

จะได้

$$v_{\text{eff}}(H) = \frac{6.944 \times 10^{-7}}{\left(\frac{0}{9}\right) + 0} = \text{หาค่าไม่ได้} \quad (\text{ก.37})$$

ดังนั้น เลขของศาเสรียังผลของความไม่แน่นอนมาตรฐานของระดับน้ำหาค่าไม่ได้

ก.2.4 ความไม่แน่นอนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์ความเร็ว

ในเรื่องความคลาดเคลื่อนในการวัดระยะทางการตกของน้ำ ระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำ และระดับน้ำ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันในการหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์ความเร็ว สามารถหาได้จากสมการ

$$u^2(c_v) = \left(\frac{\partial c_v}{\partial s} u(s) \right)^2 + \left(\frac{\partial c_v}{\partial x} u(x) \right)^2 + \left(\frac{\partial c_v}{\partial H} u(H) \right)^2 \quad (\text{ก.38})$$

$$\text{เมื่อ} \quad \frac{\partial c_v}{\partial s} = \frac{1}{2\sqrt{(H-x)x}} \quad (\text{ก.39})$$

$$\frac{\partial c_v}{\partial s} = \frac{1}{2\sqrt{(40-5)5}} = 0.038$$

$$\frac{\partial c_v}{\partial x} = \frac{s_{avg}(H-2x)}{2\sqrt{(Hx-x^2)^{\frac{3}{2}}}} \quad (\text{ก.40})$$

$$\frac{\partial c_v}{\partial x} = \frac{20.76(40-2(5))}{2\sqrt{(40(5)-(5)^2)^{\frac{3}{2}}}} = 0.067$$

$$\frac{\partial c_v}{\partial H} = \frac{s_{avg}x}{2\sqrt{(Hx-x^2)^{\frac{3}{2}}}} \quad (\text{ก.41})$$

$$\frac{\partial c_v}{\partial H} = \frac{20.76(5)}{2\sqrt{(40(5)-(5)^2)^{\frac{3}{2}}}} = -0.0112$$

แทนค่าอนุพันธ์ย่อยที่ได้จากสมการ (ก.39) สมการ (ก.40) และสมการ (ก.41) พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานจากสมการ (ก.13) สมการ (ก.24) และสมการ (ก.35) ลงในสมการ (ก.38) จะได้

$$u^2(c_v) = 2.89 \times 10^{-5}$$

$$u(c_v) = 0.005 \quad (\text{ก.42})$$

แทนค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์ความเร็ว $u(c_v)$ จากสมการ (ก.42) ลงในสมการ

$$v_{eff}(c_v) = \frac{u^4(c_v)}{\frac{u_1^4(c_v)}{v_1} + \frac{u_2^4(c_v)}{v_2} + \frac{u_3^4(c_v)}{v_3}} \quad (\text{ก.43})$$

จะสามารถหาค่าเลขเฉลี่ยยังผลได้เป็น

$$v_{eff}(c_v) = \frac{u^4(c_v)}{\frac{u_1^4(c_v)}{v_1} + \frac{u_2^4(c_v)}{v_2} + \frac{u_3^4(c_v)}{v_3}} = 44.669 \text{ (ปัดลงเป็น 44)} \quad (\text{ก.44})$$

เมื่อ $u_1^2(c_v) = \left(\frac{\partial c_v}{\partial s} u(s) \right)^2$ (ก.45)

$$u_2^2(c_v) = \left(\frac{\partial c_v}{\partial x} u(x) \right)^2 \quad (\text{ก.46})$$

$$u_3^2(c_v) = \left(\frac{\partial c_v}{\partial H} u(H) \right)^2 \quad (\text{ก.47})$$

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์ความเร็วสามารถหาค่าได้จากสมการ

$$U(c_v) = k \times u(c_v) \quad (\text{ก.48})$$

เมื่อ k คือ ตัวประกอบครอบคลุม (coverage factor)

$v_{\text{eff}}(c_v)$ จากสมการ (ก.44) มีค่าเท่ากับ 44 จากตาราง ก.4 ตัวประกอบครอบคลุม (coverage factor) มีค่าเท่ากับ 2.02 แทนค่าลงในสมการ (ก.48) จะได้

$$\begin{aligned} U(c_v) &= 2.02 \times u(c_v) \\ U(c_v) &= 2.02 \times 0.005 \\ U(c_v) &= 0.011 \end{aligned} \quad (\text{ก.49})$$

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วมีค่าอยู่ในช่วง $c_v \pm U(c_v) = 0.785 \pm 0.011$

เลของศาเสรี (Degree of freedom)	ตัวประกอบ ครอบคลุม (Coverage factor)	เลของศาเสรี (Degree of freedom)	ตัวประกอบ ครอบคลุม (Coverage factor)
2	4.30	15	2.13
3	3.18	16	2.12
4	2.78	17	2.11
5	2.57	18	2.10
6	2.45	19	2.09
7	2.36	20	2.09
8	2.31	25	2.06
9	2.26	30	2.04
10	2.23	40	2.02
11	2.20	50	2.01
12	2.18	100	1.98
13	2.16	Infinite	1.96
14	2.14		

ตาราง ก.4 แสดงตัวประกอบครอบคลุมที่ 95% (k) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเลของศาเสรี (ν)

ก.3 การคำนวณความเร็วเฉลี่ยกำลังสองและค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานความเร็วเฉลี่ยกำลังสอง

ก.3.1 การคำนวณความเร็วเฉลี่ยกำลังสอง

จากสมการทอริเชลลีในกรณีของไหลจริง

$$u_2 = c_v \sqrt{2gx} \quad (\text{ก.50})$$

ยกกำลังสองสมการ (ก.50) ทั้งสองข้าง จะได้

$$u_2^2 = c_v^2 (2gx) \quad (\text{ก.51})$$

แทนค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วจากสมการ (ก.3) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับรูเปิด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5 เซนติเมตร จะได้

$$u_2^2 = (0.785)^2 (2 \times 980 \times 5)$$

$$u_2^2 = 6033.686 \quad \text{cm}^2 / \text{s}^2$$

ก.3.2 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยกำลังสอง

ในการหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยกำลังสอง จากสมการ

$$u^2(u_2^2) = \left(\frac{\partial u_2^2}{\partial x} \cdot u(x) \right)^2 + \left(\frac{\partial u_2^2}{\partial c_v} \cdot u(c_v) \right)^2 \quad (\text{ก.51})$$

เมื่อ
$$\frac{\partial u_2^2}{\partial x} = 2gc_v^2 \quad (\text{ก.52})$$

$$\frac{\partial u_2^2}{\partial x} = 2 \times 980 \times (0.785)^2 = 1206.737$$

$$\frac{\partial u_2^2}{\partial c_v} = 4gxc_v \quad (\text{ก.53})$$

$$\frac{\partial u_2^2}{\partial c_v} = 4 \times 980 \times 5 \times 0.785 = 15379.223$$

แทนค่าอนุพันธ์ย่อยที่ได้จากสมการ (ก.52) และสมการ (ก.53) พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานจากสมการ (ก.24) และสมการ (ก.42) ลงในสมการ (ก.51)

จะได้

$$\begin{aligned} u^2(u_2^2) &= 11669.994 \\ u(u_2^2) &= 108.028 \end{aligned} \quad (\text{ก.54})$$

แทนค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยกำลังสอง จากสมการ (ก.42) ลงในสมการ

$$v_{eff}(u_2^2) = \frac{u^4(u_2^2)}{\frac{u_1^4(u_2^2)}{v_1} + \frac{u_2^4(u_2^2)}{v_2}} \quad (\text{ก.55})$$

จะสามารถหาค่าเลขเฉลี่ยยังผลได้เป็น

$$v_{eff}(u_2^2) = \frac{u^4(u_2^2)}{\frac{u_1^4(u_2^2)}{v_1} + \frac{u_2^4(u_2^2)}{v_2}} = 128.986 \text{ (ปัดเศษลงเป็น 128)} \quad (\text{ก.56})$$

เมื่อ
$$u_1^2(u_2^2) = \left(\frac{\partial u_2^2}{\partial x} \cdot u(x) \right)^2 \quad (\text{ก.57})$$

$$u_2^2(u_2^2) = \left(\frac{\partial u_2^2}{\partial c_v} \cdot u(c_v) \right)^2 \quad (\text{ก.58})$$

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยกำลังสอง สามารถหาค่าได้จากสมการ

$$U(u_2^2) = k \times u(u_2^2) \quad (\text{ก.59})$$

เมื่อ k คือ ตัวประกอบครอบคลุม (coverage factor)

นำค่า $v_{eff}(u_2^2)$ จากสมการ (ก.56) ไปเทียบค่าในตาราง ก.4 จะได้ตัวประกอบครอบคลุม (coverage factor) มีค่าเท่ากับ 1.96 ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของความเร็วเฉลี่ยกำลังสองในสมการ (ก.59)

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad U(u_2^2) &= 19.6 \times u(u_2^2) \\ U(u_2^2) &= 211.734 \end{aligned} \quad (\text{ก.60})$$

ดังนั้น ค่าความเร็วเฉลี่ยกำลังสองมีค่าอยู่ในช่วง $u_2^2 \pm U(u_2^2) = 6033.686 \pm 211.734$

ก.4. การคำนวณเลขเรย์โนลด์

คุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศา	
ความหนาแน่น (ρ)	995.7
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d)	0.005
ความหนืด (μ)	0.000798

ตาราง ก.5 แสดงคุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศา

การคำนวณเลขเรย์โนลด์ สำหรับรูเปิดประเภทขอบกึ่งคมที่ระดับ 35 เซนติเมตร ระดับน้ำ 40 เซนติเมตร ดังนั้น ระยะห่างระหว่างรูเปิดกับระดับน้ำคือ $40 - 35 = 5$ เซนติเมตร

$$\text{จาก} \quad \text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (\text{ก.61})$$

จากสมการทอริเซลลีในกรณีของไหลจริง

$$u_2 = c_v \sqrt{2gx} \quad (\text{ก.62})$$

แทนค่าสมการ (ก.62) ลงในสมการ (ก.61) สำหรับ v

$$\text{จะได้} \quad \text{Re} = \frac{\rho c_v \sqrt{2gx} d}{\mu} \quad (\text{ก.63})$$

แทนค่าสัมประสิทธิ์ความเร็ว จากสมการ (ก.3) และคุณสมบัติของน้ำจากตาราง ก.5 ลงในสมการ (ก.63) จะได้

$$\text{Re} = \frac{(995.7)(0.785)\sqrt{2(9.8)(0.05)}(0.005)}{0.000798}$$

$$\text{Re} = 4846.040$$

ดังนั้น เลขเรย์โนลด์มีค่าเท่ากับ 4846.040

ก.5 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของเลขเรย์โนลด์

ในการหาความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของเลขเรย์โนลด์ จากสมการ

$$u^2(\text{Re}) = \left(\frac{\partial \text{Re}}{\partial c_v} \cdot u(c_v) \right)^2 \quad (\text{ก.64})$$

หาอนุพันธ์ของสมการ (ก.63) จะได้

$$\frac{\partial \text{Re}}{\partial c_v} = \frac{\rho \sqrt{2gxL}}{\mu} \quad (\text{ก.65})$$

แทนค่าคุณสมบัติของน้ำ จากตาราง ก.5 ลงในสมการ (ก.65) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{Re}}{\partial c_v} &= \frac{(995.7) \sqrt{2(9.8)(0.05)(0.005)}}{0.000798} \\ \frac{\partial \text{Re}}{\partial c_v} &= 6176.019 \end{aligned} \quad (\text{ก.66})$$

จากแทนค่า $u(c_v)$ จากสมการ (ก.42) และ $\frac{\partial \text{Re}}{\partial c_v}$ จากสมการ (ก.66) ลงในสมการ (ก.64)

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad u^2(\text{Re}) &= 1099.195 \\ u(\text{Re}) &= 33.154 \end{aligned} \quad (\text{ก.67})$$

แทนค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของเลขเรย์โนลด์ จากสมการ (ก.67) ลงในสมการ

$$v_{\text{eff}}(\text{Re}) = \frac{u^4(\text{Re})}{\frac{u_1^4(\text{Re})}{v_1}} \quad (\text{ก.68})$$

เมื่อ $v_1 = v_{\text{eff}}(c_v) = 44$ (ดูสมการ (ก.44)) จะสามารถหาค่าเลขเรย์โนลด์ได้เป็น

$$v_{\text{eff}}(\text{Re}) = \frac{u^4(\text{Re})}{\frac{u_1^4(\text{Re})}{v_1}} = 44 \quad (\text{ก.69})$$

$$\text{เมื่อ} \quad u_1^2(\text{Re}) = \left(\frac{\partial \text{Re}}{\partial c_v} \cdot u(c_v) \right)^2 \quad (\text{ก.70})$$

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของเลขเรย์โนลด์ สามารถหาค่าได้จากสมการ

$$U(\text{Re}) = k \times u(\text{Re}) \quad (\text{ก.71})$$

เมื่อ k คือ ตัวประกอบครอบคลุม (coverage factor)

นำค่า $v_{eff}(Re)$ จากสมการ (ก.69) ไปเทียบค่าในตาราง ก.4 จะได้ตัวประกอบครอบคลุม (coverage factor) มีค่าเท่ากับ 1.96 ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของเลขเรย์โนลด์ ในสมการ (ก.71)

จะได้

$$U(Re) = 1.96 \times u(Re)$$

$$U(Re) = 64.982 \quad (ก.72)$$

ดังนั้น เลขเรย์โนลด์ มีค่าอยู่ในช่วง $Re \pm U(Re) = 4846.040 \pm 64.982$



ภาคผนวก ข.

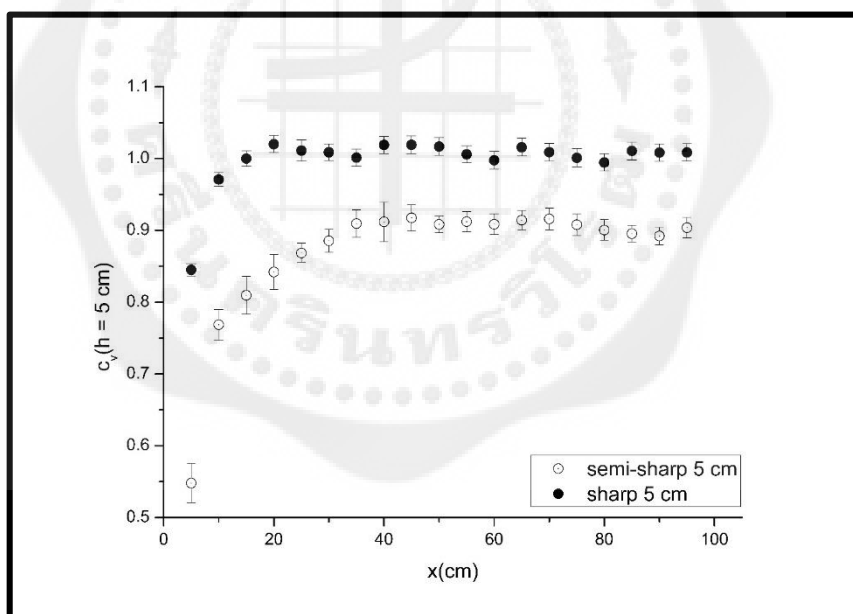
- ข.1 ผลการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการทดลองแก๊งก์น้ำของ
ทอริเชลลี
- ข.2 ผลการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วจากทฤษฎี
- ข.3 ค่า α_2 และ l ของรูเปิดต่างๆ และกราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการ
ทดลองกับสัมประสิทธิ์ความเร็วจากทฤษฎี
- ข.4 ผลการทดลองเพื่อหาค่าเลขเรย์โนลด์

ข.1 ผลการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการทดลองแท่งกั้นน้ำของทอริเชลลี

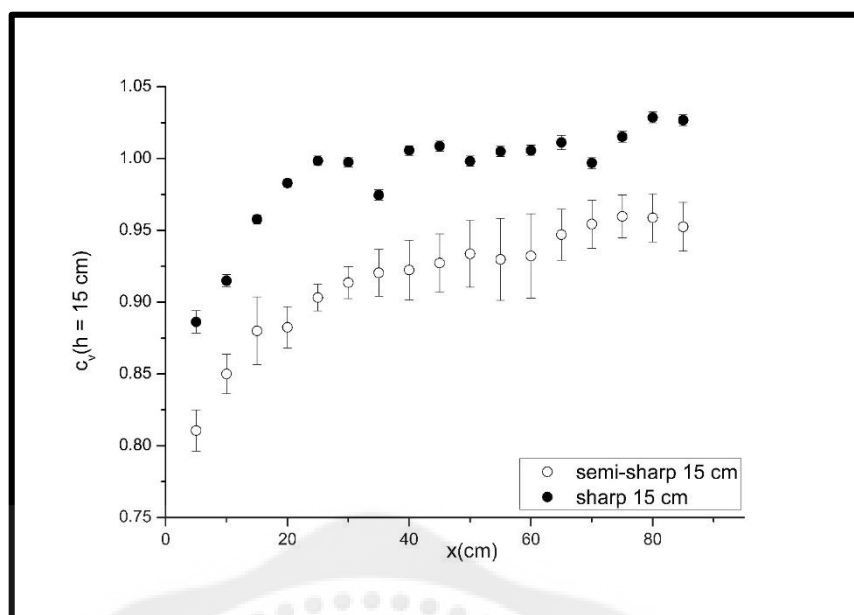
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสัมประสิทธิ์ความเร็ว ในการทดลองแท่งกั้นน้ำของทอริเชลลี โดยแบ่งรูเปิดออกเป็น 2 ประเภท คือ รูเปิดประเภทขอบกึ่งคมและขอบคม โดยผู้วิจัยได้ทำการวัดระยะทางการตกของน้ำ เมื่อระดับน้ำลดลงทุกๆ 5 เซนติเมตร ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการทดลอง สามารถหาได้จากสมการ

$$c_v = \frac{s}{2\sqrt{(H-x)x}} \quad (\text{ข.1})$$

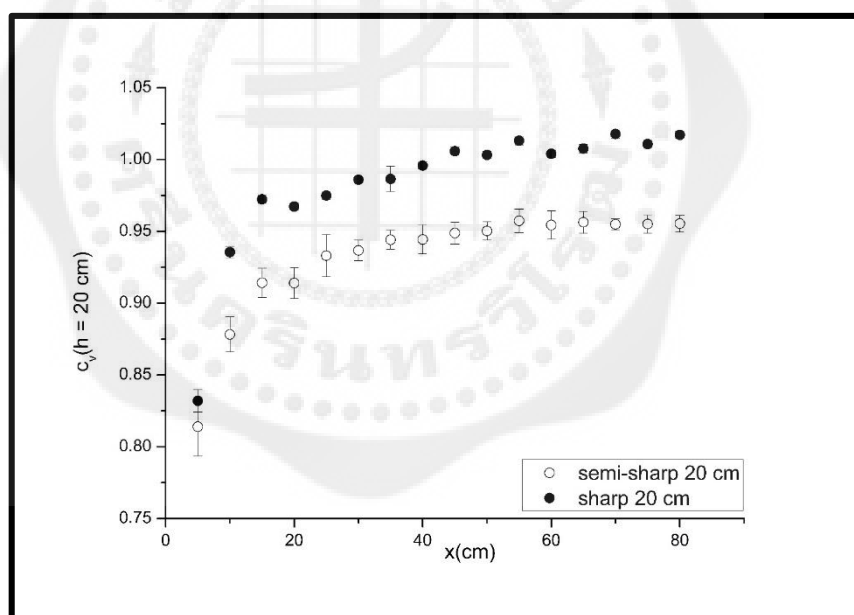
เพื่อศึกษาพฤติกรรมของสัมประสิทธิ์ความเร็ว ที่ระดับน้ำต่างๆ ผู้วิจัยได้พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเร็ว (c_v) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับรูเปิด แท่งความคลาดเคลื่อน (Error bar) ที่แต่ละจุดของผลการทดลองในภาพประกอบ ข.1 แสดงถึงค่าความไม่แน่นอนในการวัด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



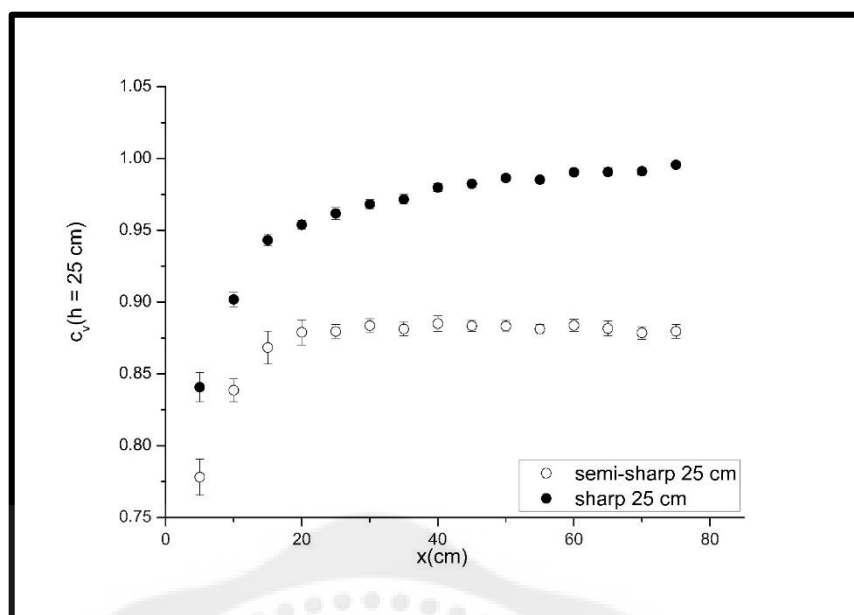
(ก)



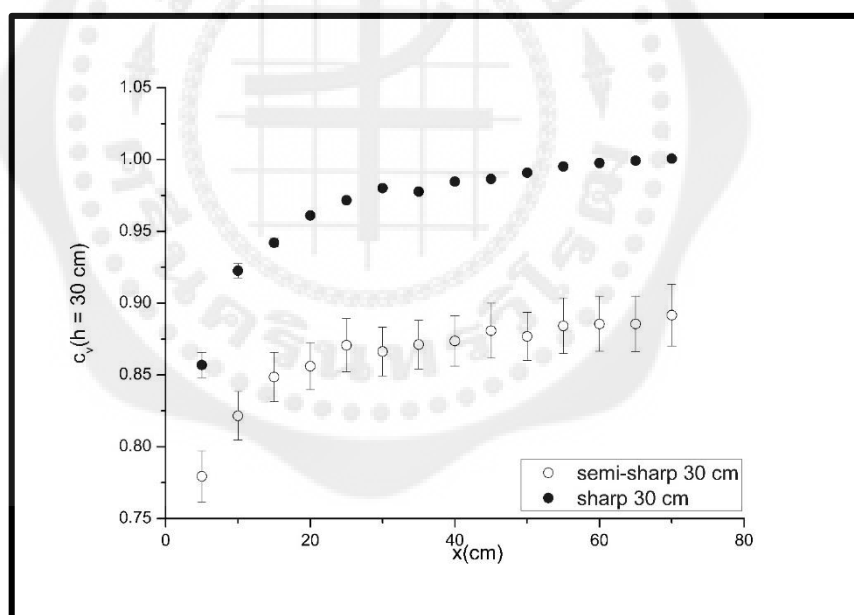
(ข)



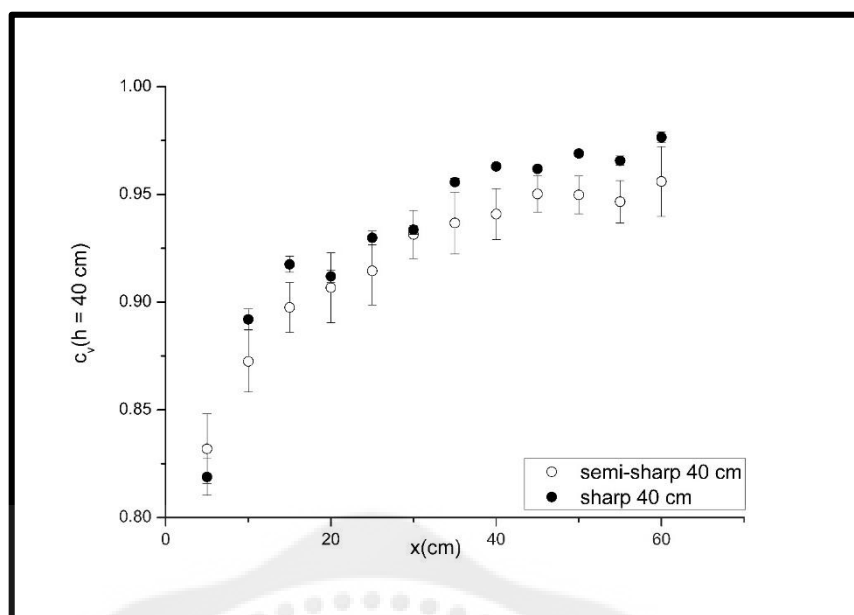
(ค)



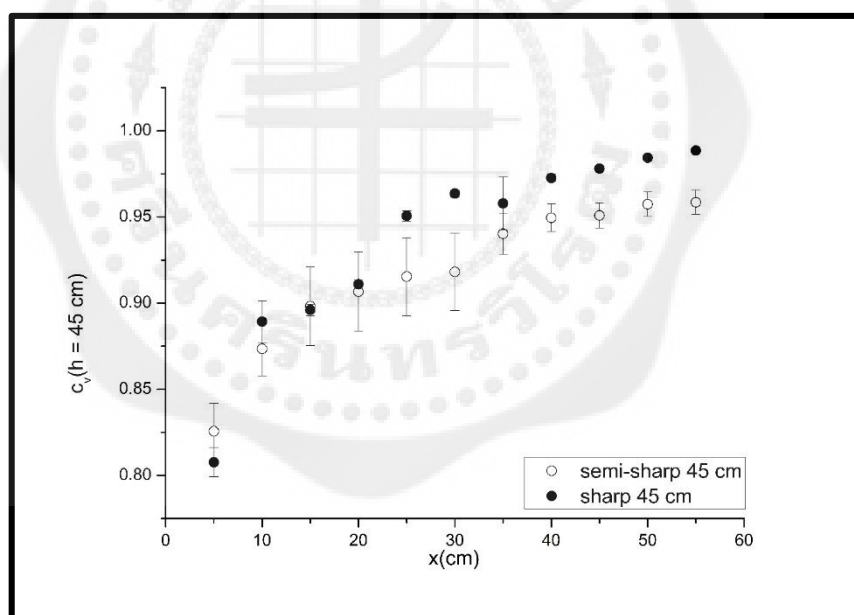
(ง)



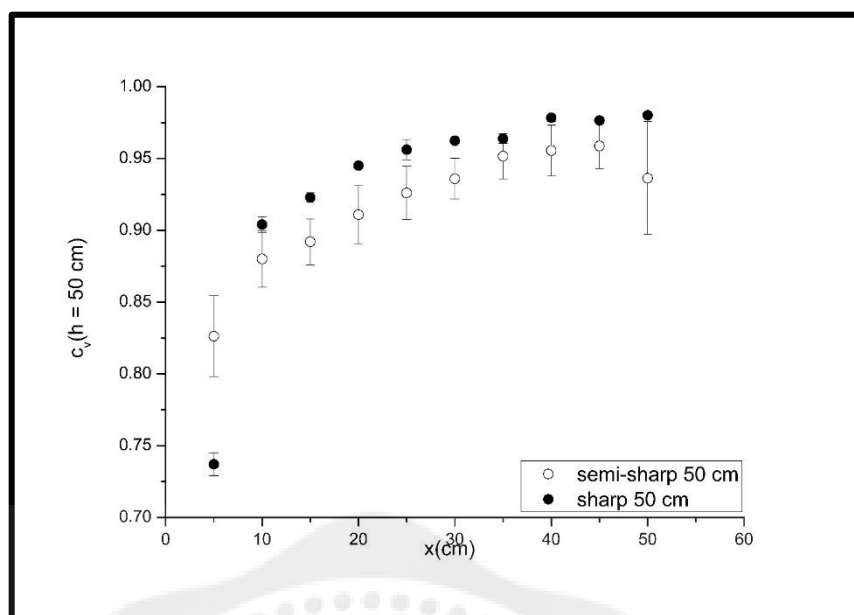
(จ)



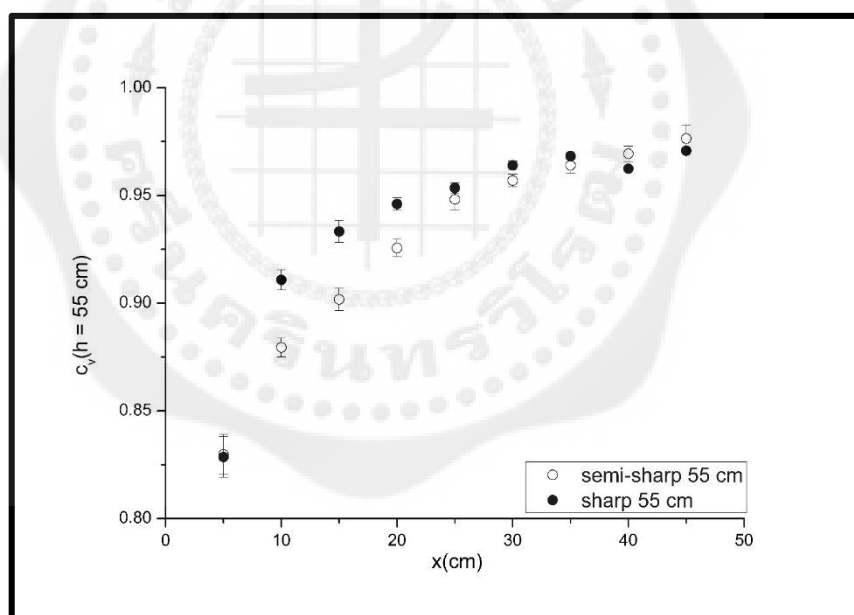
(ก)



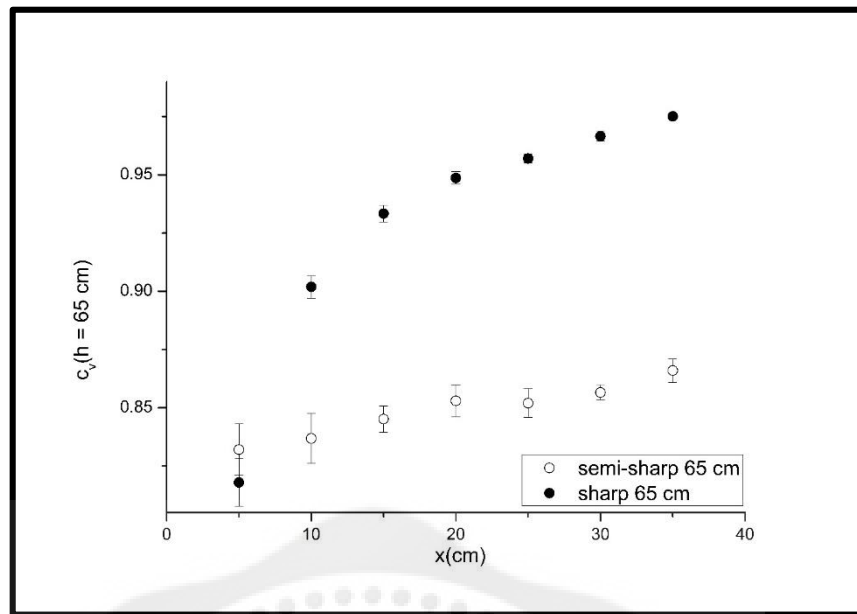
(ข)



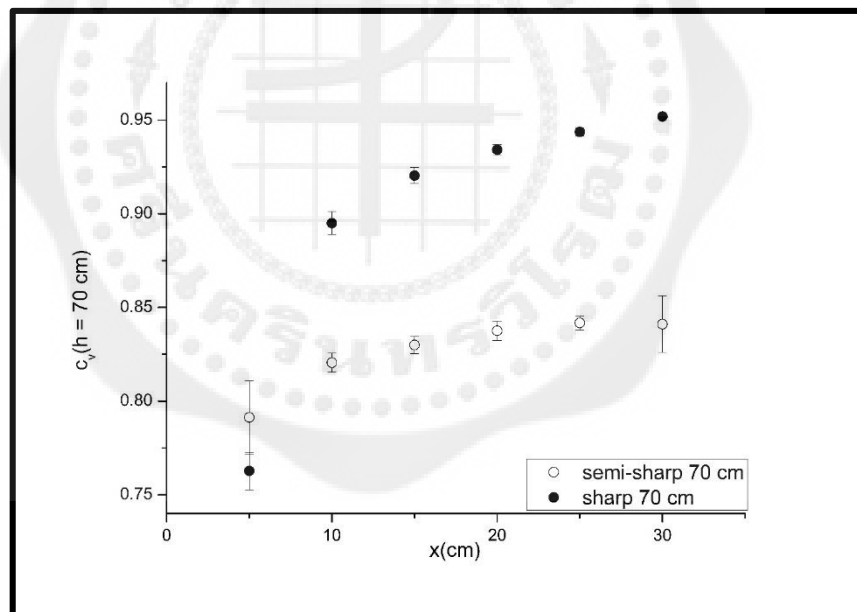
(ก)



(ข)



(ง)



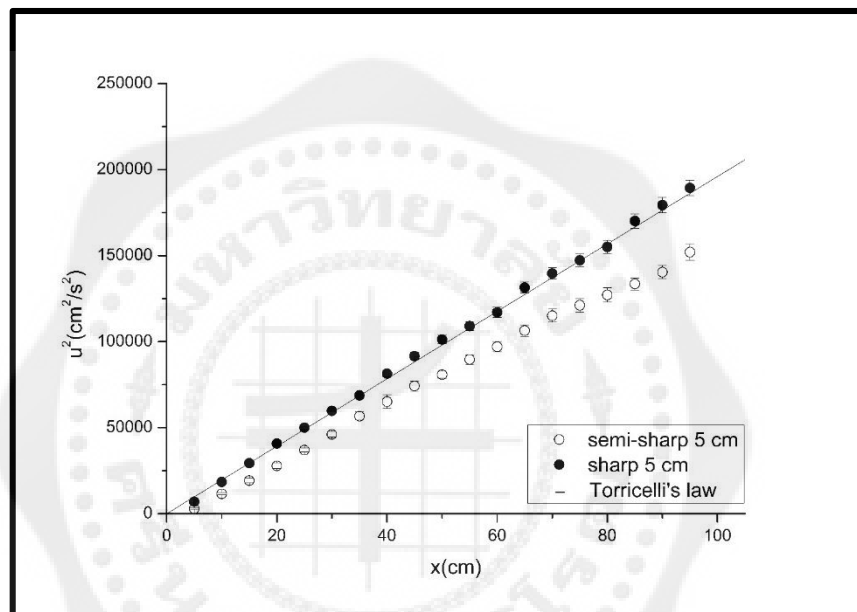
(ญ)

ภาพประกอบ ข.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเร็ว (c_v) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับระดับรูเปิด (x) กรณีรูเปิดขอบกึ่งคม (จุดโปร่ง) และขอบคม (จุดทึบ) ที่ระดับรูเปิดต่างๆ (ก) 5 ซม. (ข) 15 ซม. (ค) 20 ซม. (ง) 25 ซม. (จ) 30 ซม. (ฉ) 40 ซม. (ช) 45 ซม. (ฌ) 50 ซม. (ฉ) 55 ซม. (ญ) 65 ซม. (ฎ) 70 ซม.

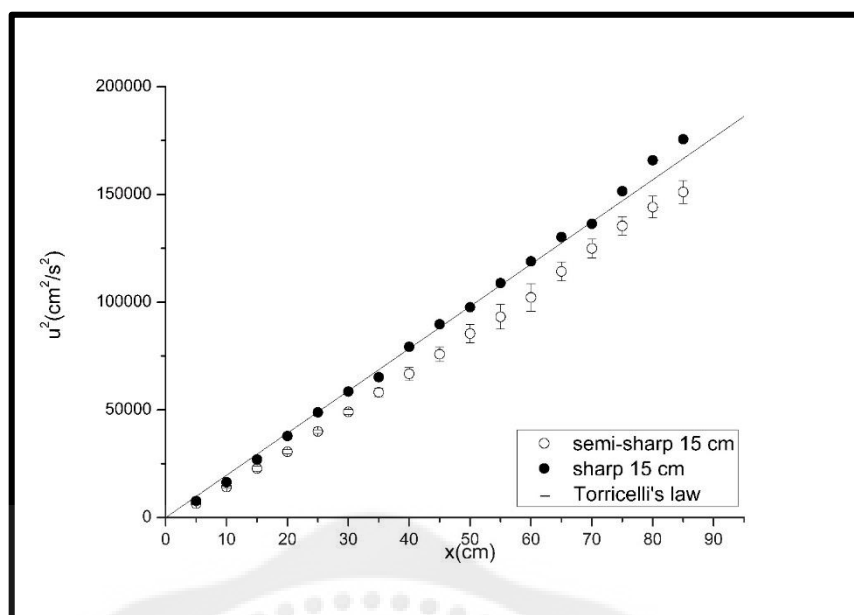
ข.2 ผลการทดลองเพื่อหาสัมประสิทธิ์ความเร็วจากทฤษฎี

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 หากเราต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วจากทฤษฎี เราจำเป็นต้องทราบค่า α_2 และ l ก่อน ซึ่งสามารถหาค่า α_2 และ l ได้จากความชันและจุดตัดแกน x ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วกำลังสอง (u_2^2) กับระยะห่างระหว่างรูเปิดและระดับน้ำ (x) ตามสมการ

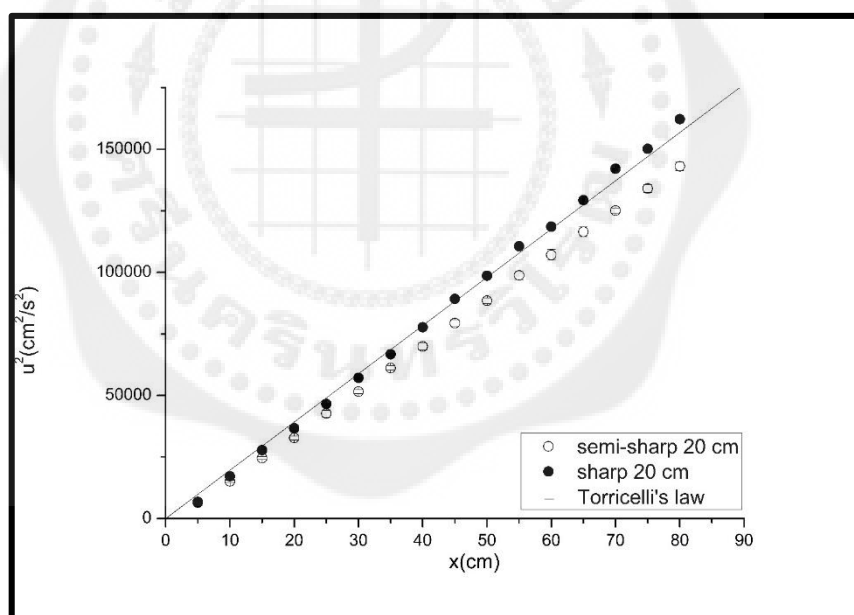
$$u_2^2 = \frac{2g}{\alpha_2}(x-l) \quad (ข.2)$$



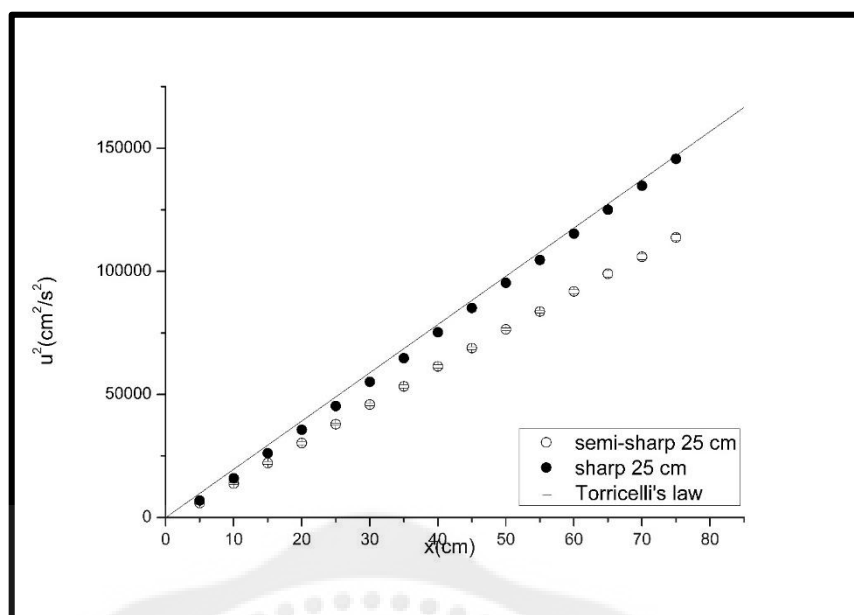
(ก)



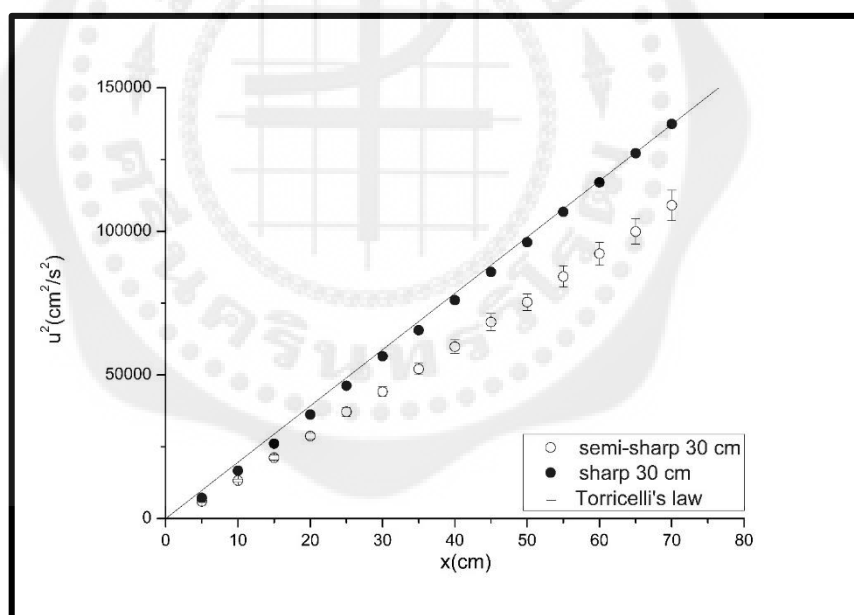
(ข)



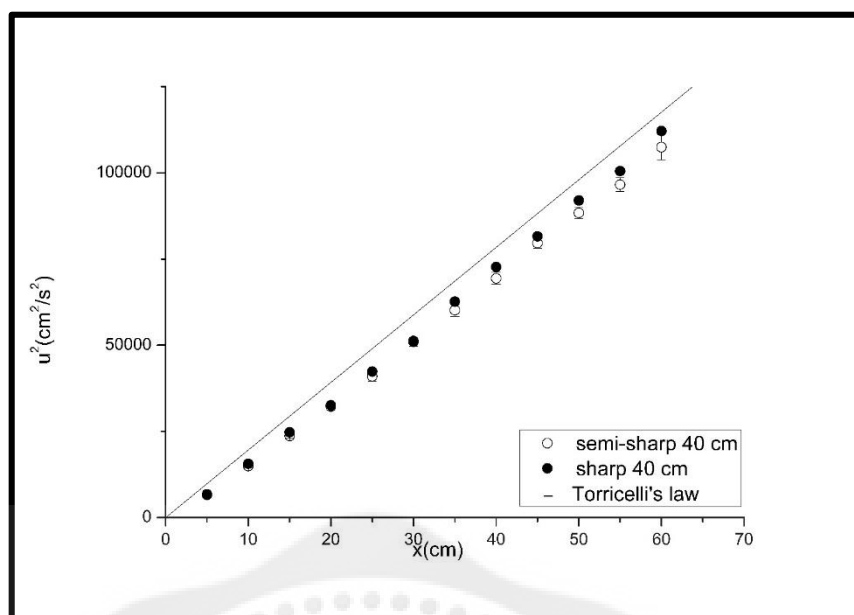
(ค)



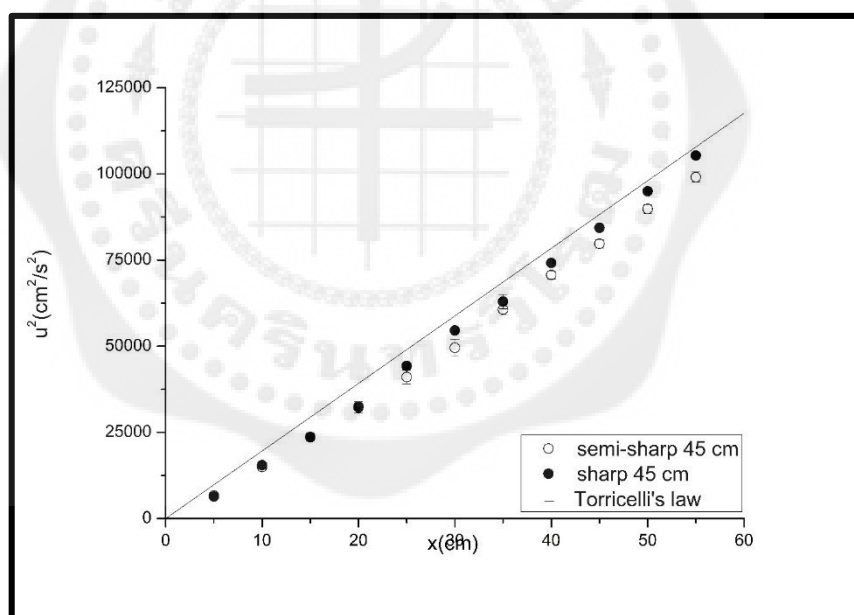
(ง)



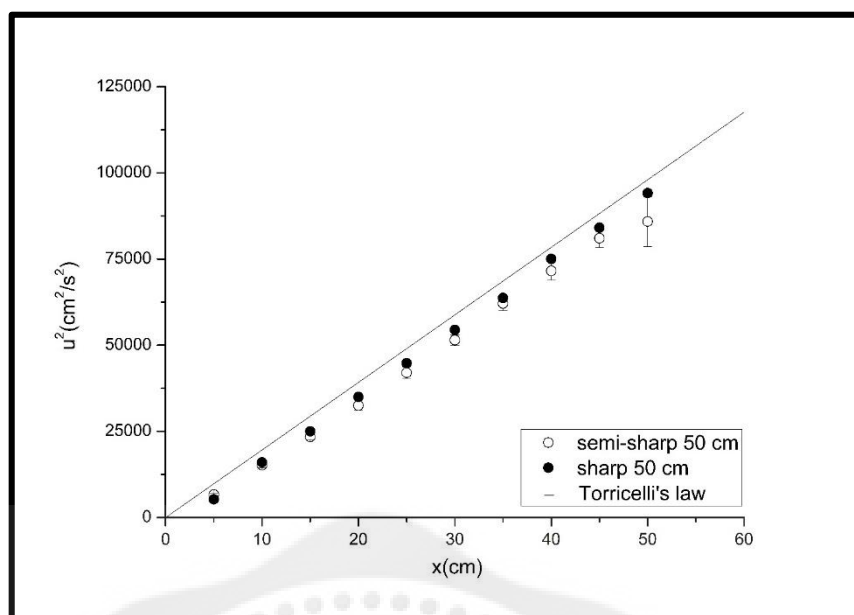
(จ)



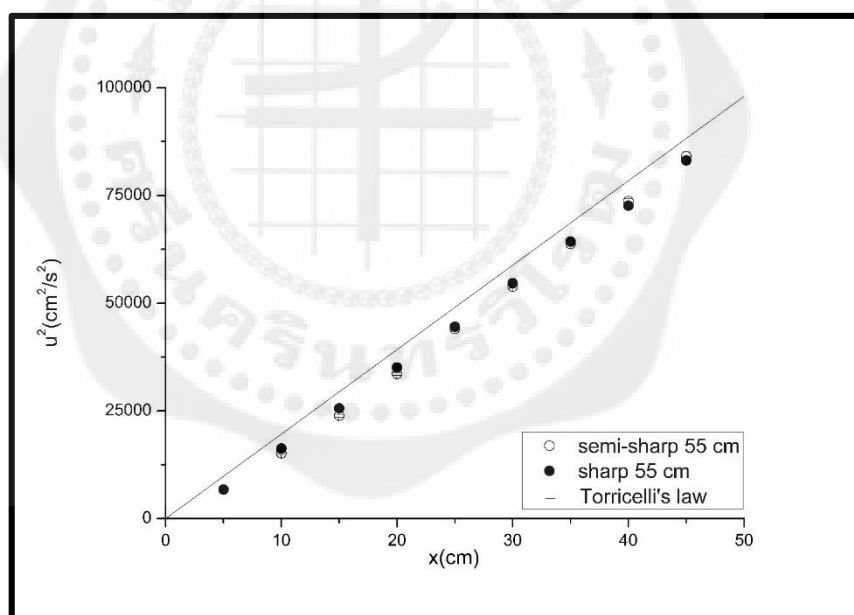
(ก)



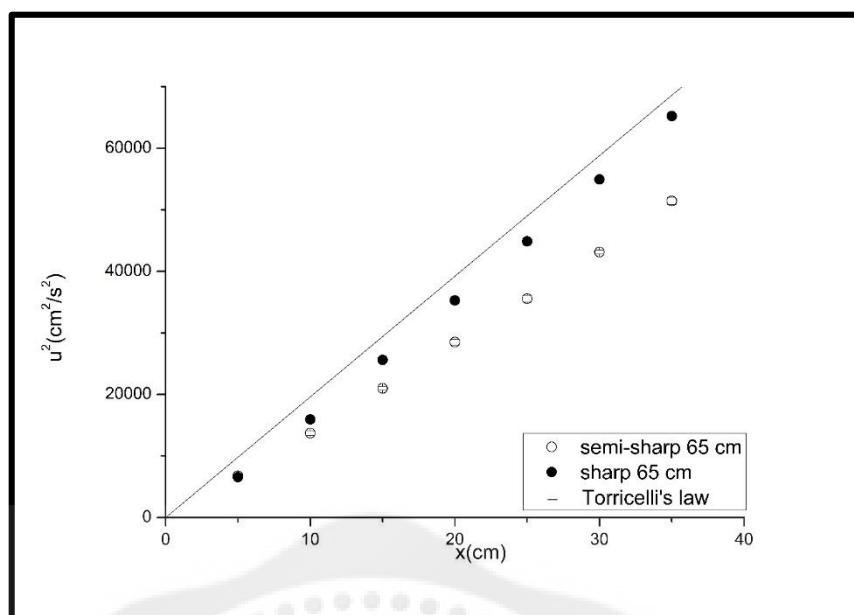
(ข)



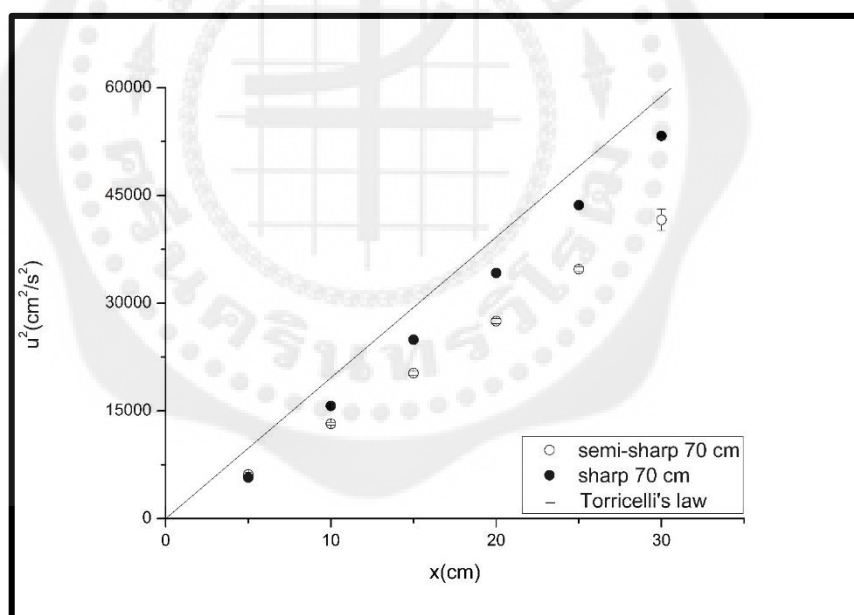
(ก)



(ข)



(ง)



(ญ)

ภาพประกอบ ข.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกำลังสอง (u^2) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับรูเปิด (x) จากทฤษฎีของทอริเซลลี (เส้นทึบ) เทียบกับการทดลองสำหรับรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม (จุดโปร่ง) และขอบคม (จุดกลม) ที่ระดับรูเปิดต่างๆ (ก) 5 ซม. (ข) 15 ซม. (ค) 20 ซม. (ง) 25 ซม. (จ) 30 ซม. (ฉ) 40 ซม. (ช) 45 ซม. (ซ) 50 ซม.

(ณ) 55 ซม. (ญ) 65 ซม. (ฎ) 70 ซม.

ข.3 ค่า α_2 และ l ของรูเปิดต่าง ๆ และกราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ความเร็วจากการทดลองกับสัมประสิทธิ์ความเร็วจากทฤษฎี

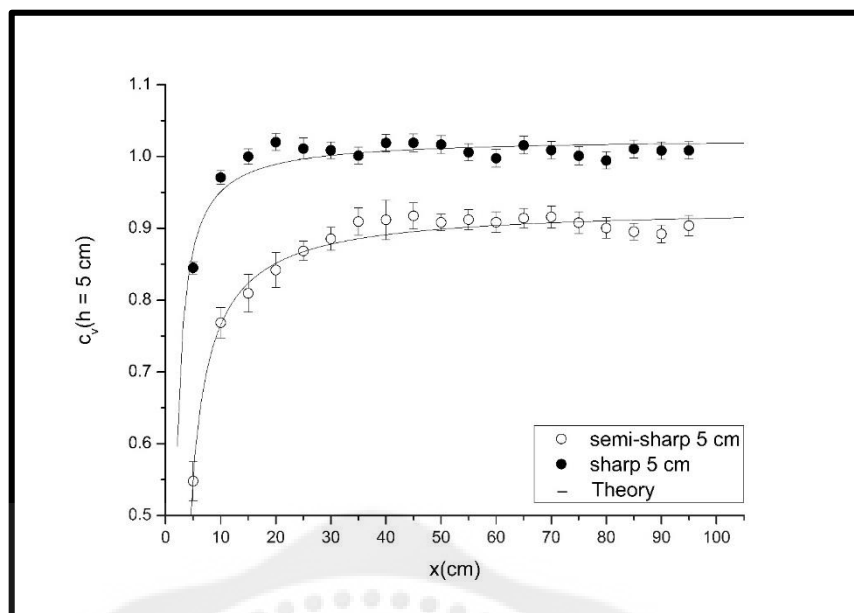
ระดับรูเปิด (h)	ขอบกึ่งคม (semi-sharp)		ขอบคม (sharp)	
	α_2	l (ซม.)	α_2	l (ซม.)
5 ซม.	1.158	3.212	0.950	1.403
10 ซม.	1.275	1.067	0.960	1.489
15 ซม.	1.120	1.554	0.956	1.638
20 ซม.	1.072	1.595	0.956	1.793
25 ซม.	1.257	1.032	0.994	1.781
30 ซม.	1.264	1.248	0.981	1.750
35 ซม.	1.323	1.157	0.982	1.886
40 ซม.	1.091	1.430	1.032	2.005
45 ซม.	1.070	1.512	0.987	2.533
50 ซม.	1.080	1.527	0.996	2.210
55 ซม.	1.027	1.882	1.030	1.483
60 ซม.	1.347	0.701	0.974	2.363
65 ซม.	1.339	0.490	1.005	1.783
70 ซม.	1.372	0.759	1.034	1.915

ตาราง ข.1 แสดง α_2 และ l ของรูเปิดประเภทของกึ่งคมและขอบคม ที่ระดับรูเปิดต่าง ๆ

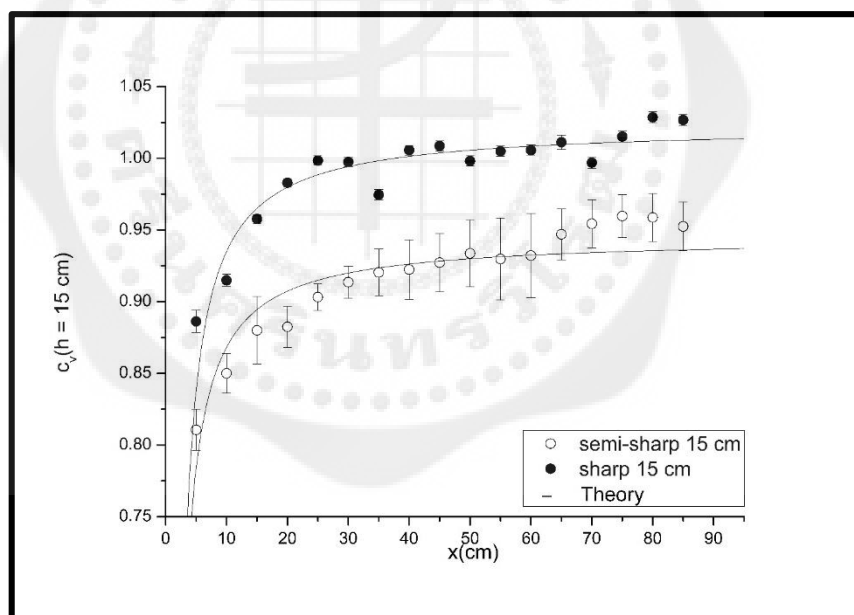
นำค่า α_2 และ l ของแต่ละรูเปิดมาแทนค่าลงในสมการ

$$c_v(x) = \sqrt{\frac{1}{\alpha_2} \left(1 - \frac{l}{x} \right)} \quad (\text{ข.3})$$

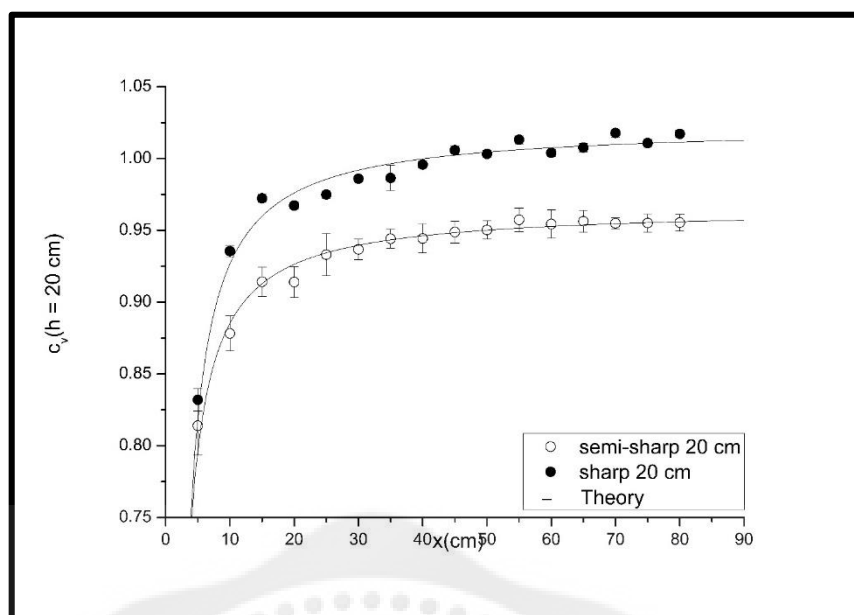
พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเร็ว (c_v) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับรูเปิด (x) ที่ได้จากการทดลองเทียบกับทฤษฎี ที่ระดับรูเปิดต่าง ๆ ดังภาพประกอบ ข.3



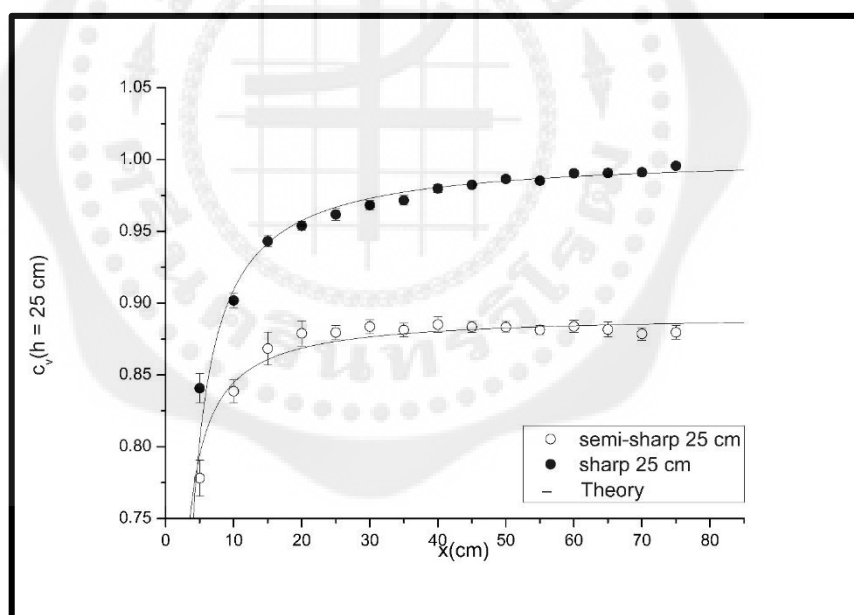
(ก)



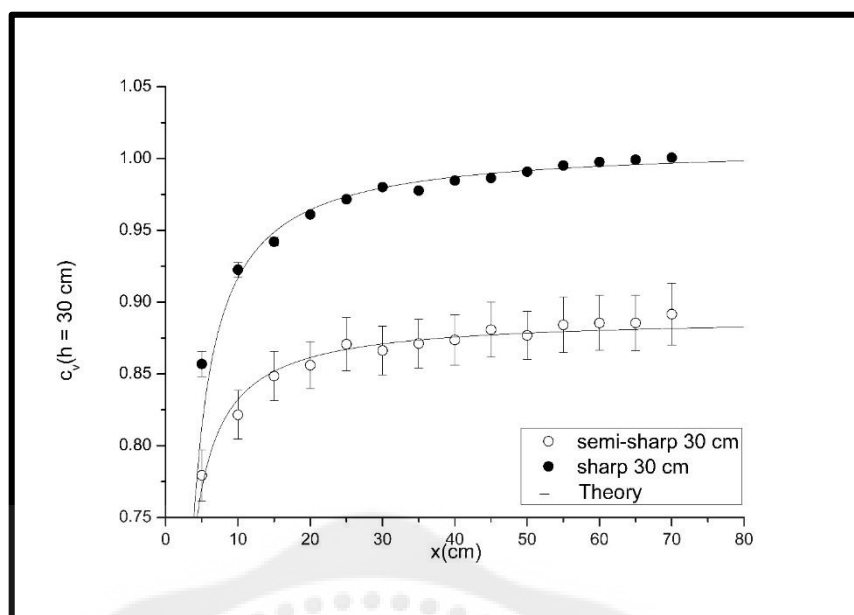
(ข)



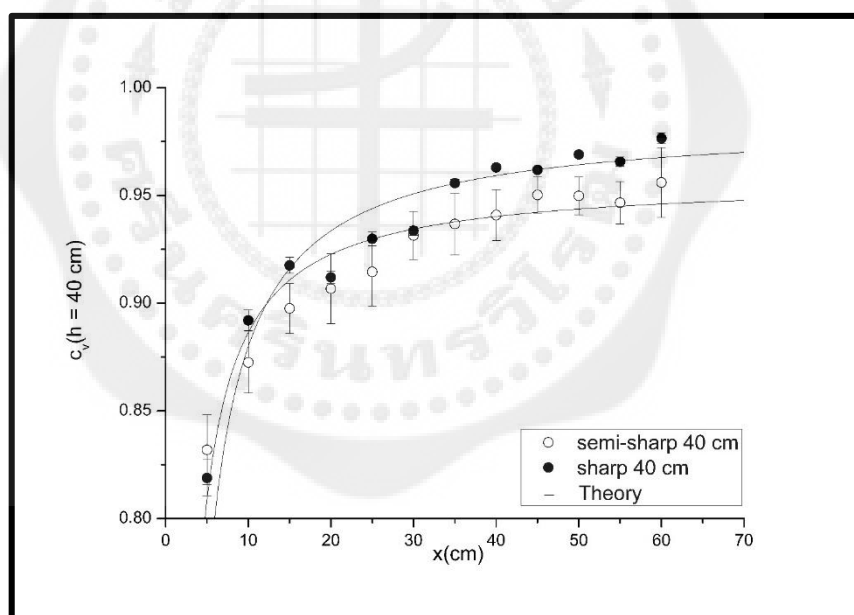
(ก)



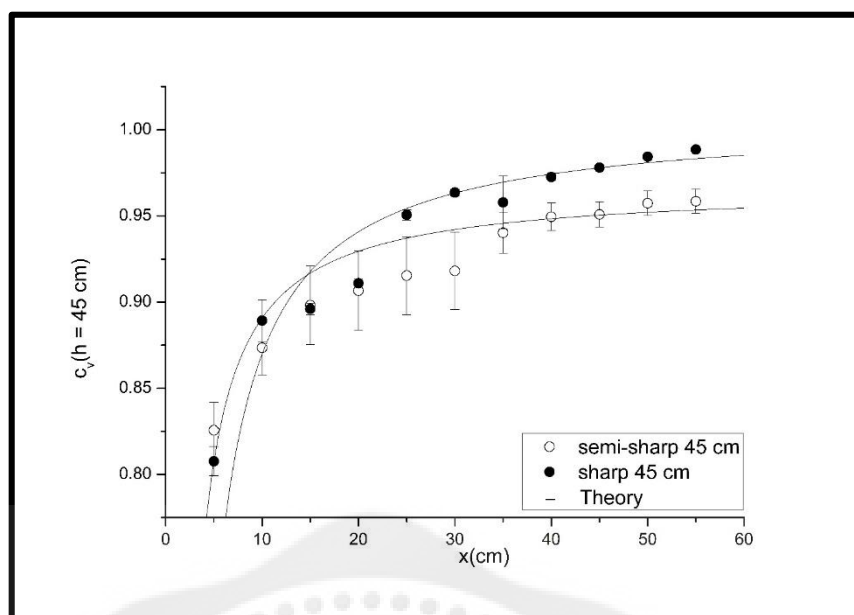
(ง)



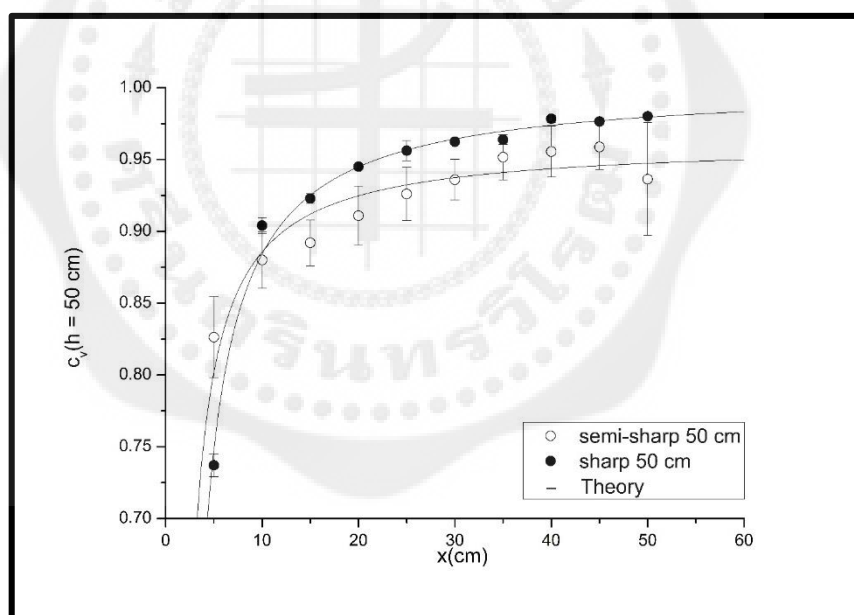
(จ)



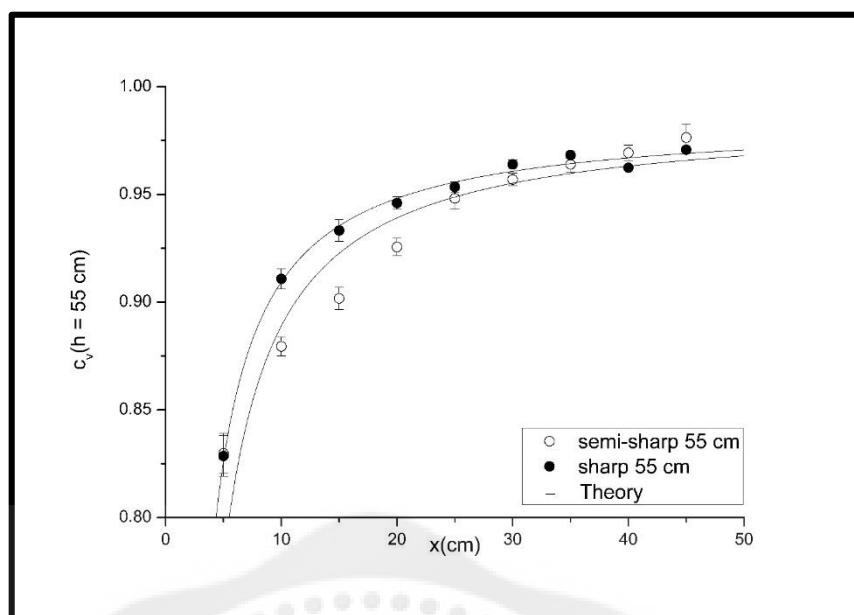
(ฉ)



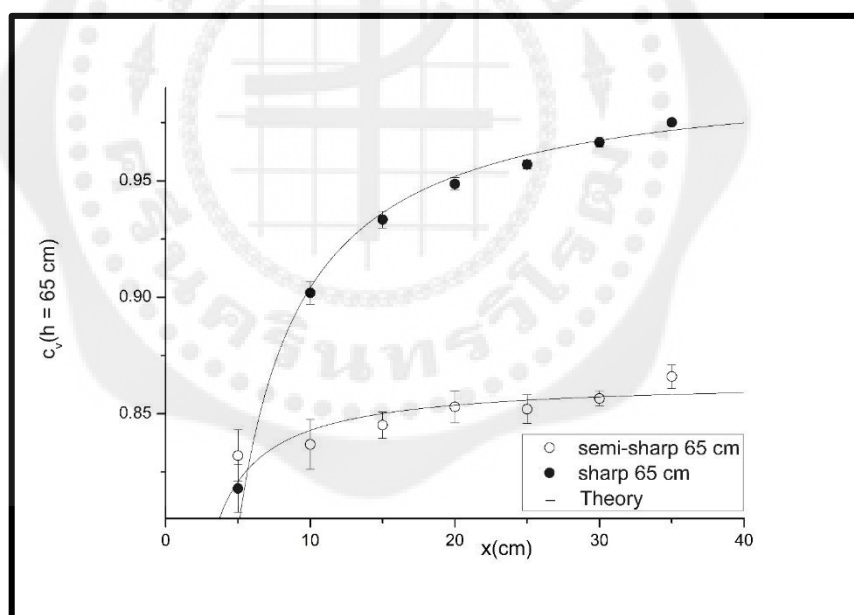
(a)



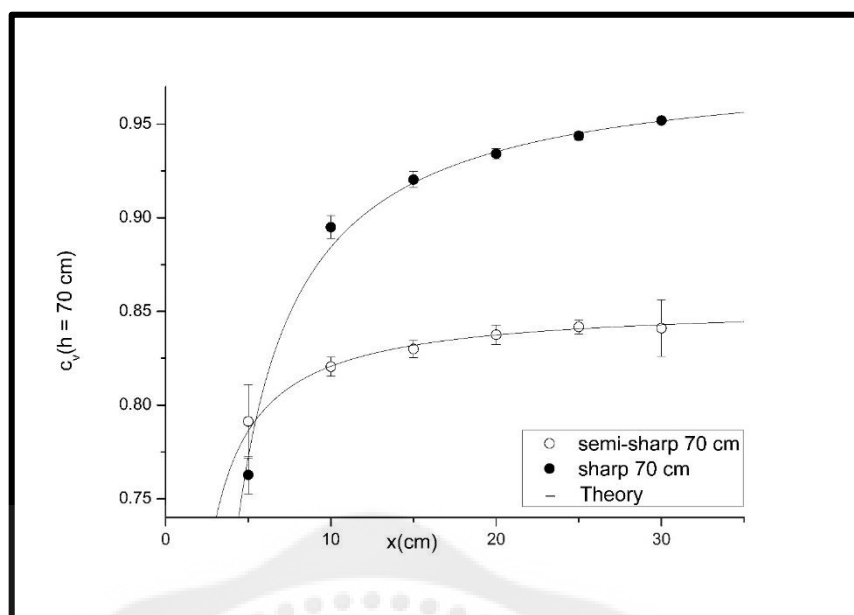
(b)



(ฉ)



(ญ)



(ง)

ภาพประกอบ ข.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเร็ว (c_v) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับระดับรูเปิด (x) กรณีรูเปิดประเภทขอบกึ่งคม (จุดโปร่ง) และขอบคม (จุดทึบ) เทียบกับทฤษฎี (เส้นทึบ) ที่ระดับรูเปิดต่างๆ (ก) 5 ซม. (ข) 15 ซม. (ค) 20 ซม.

(ง) 25 ซม. (จ) 30 ซม. (ฉ) 40 ซม. (ช) 45 ซม. (ซ) 50 ซม. (ฌ) 55 ซม.

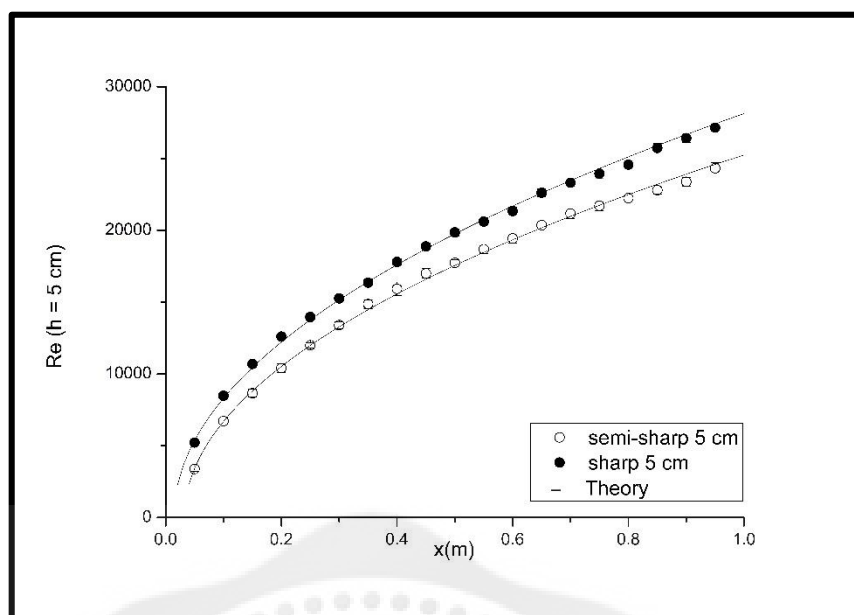
(ญ) 65 ซม. (ฎ) 70 ซม.

ข.4 ผลการทดลองเพื่อหาค่าเลขเรย์โนลด์

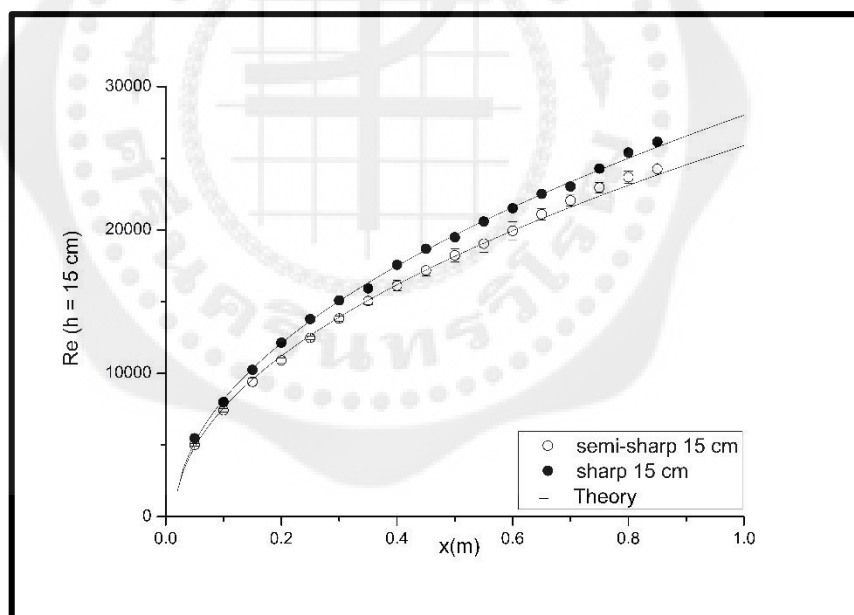
เลขเรย์โนลด์เป็นปริมาณที่แสดงถึงรูปแบบการไหล ว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ ($Re < 2000$) แบบช่วงต่อ ($2000 < Re < 4000$) หรือแบบปั่นป่วน ($Re > 4000$) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.1) ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ เมื่อแทนค่าความเร็วจากสมการ (2.20) จะได้เลขเรย์โนลด์ดังสมการ

$$Re = \frac{\rho c_v v d}{\mu} \quad (ข.4)$$

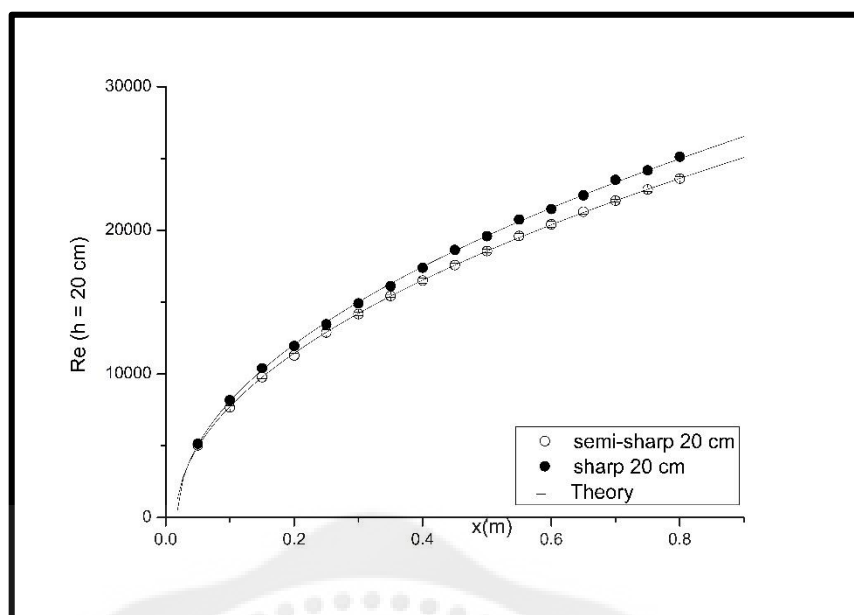
สำหรับงานวิจัยนี้ จะเรียกเลขเรย์โนลด์ที่แทนสัมประสิทธิ์ความเร็วที่ได้จากการทดลองว่า “เลขเรย์โนลด์จากการทดลอง” และในกรณีที่แทนสัมประสิทธิ์ความเร็วจากทฤษฎีสมการ (3.16) จะเรียกเลขเรย์โนลด์ที่ได้ว่า “เลขเรย์โนลด์จากทฤษฎี”



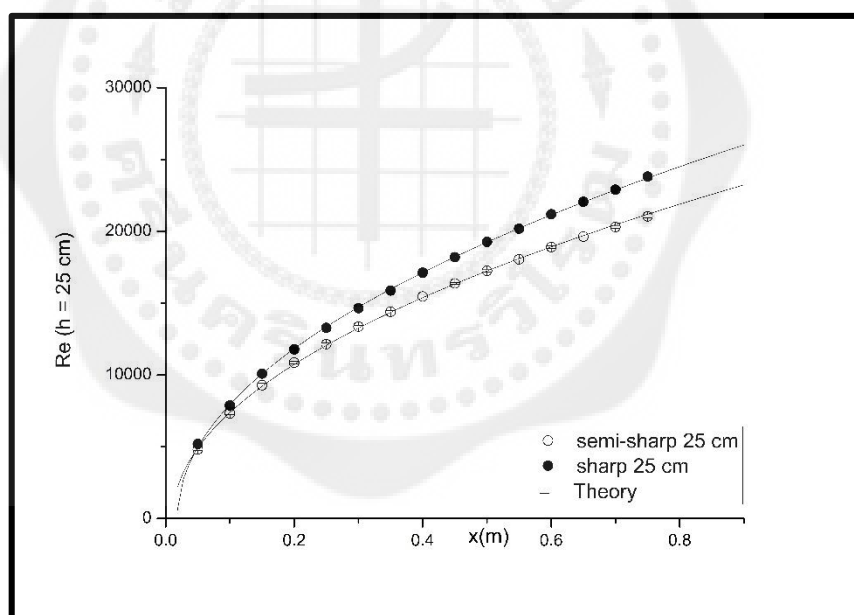
(ก)



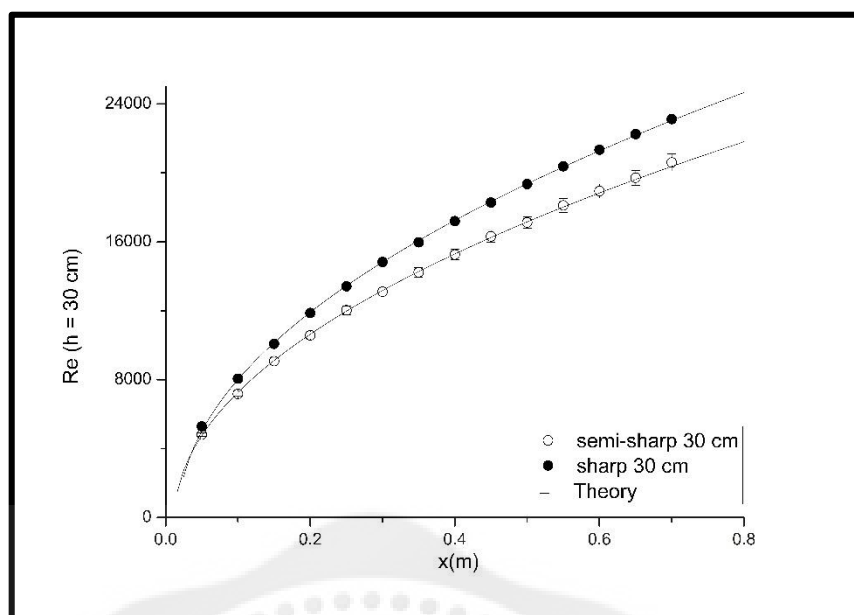
(ข)



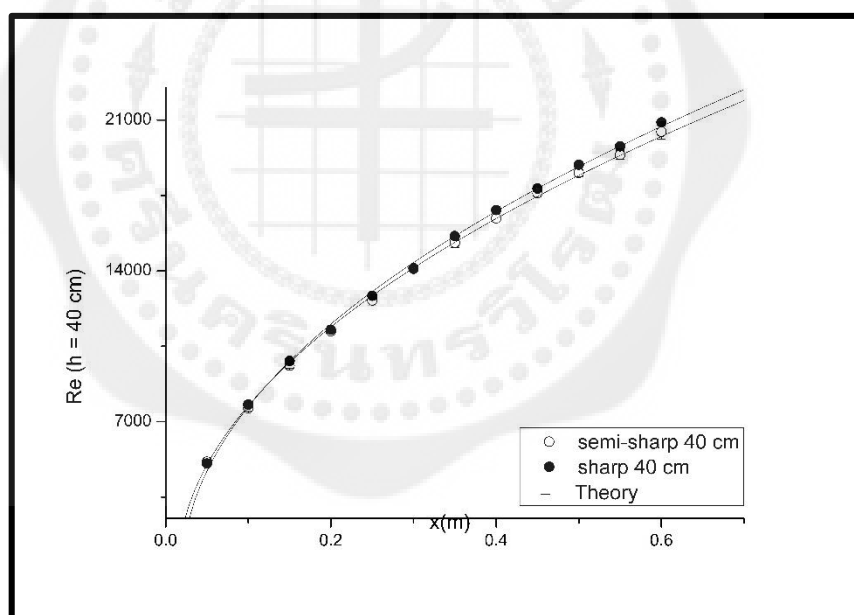
(f)



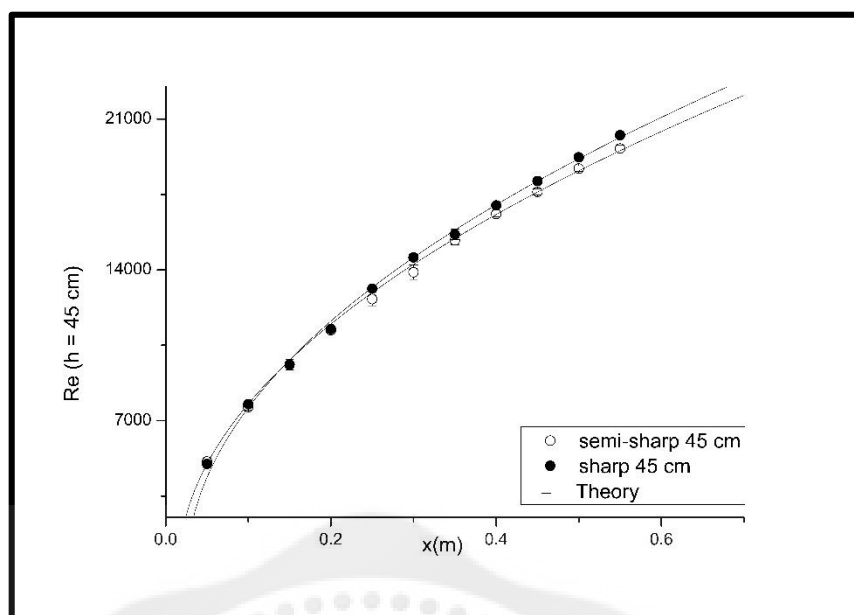
(g)



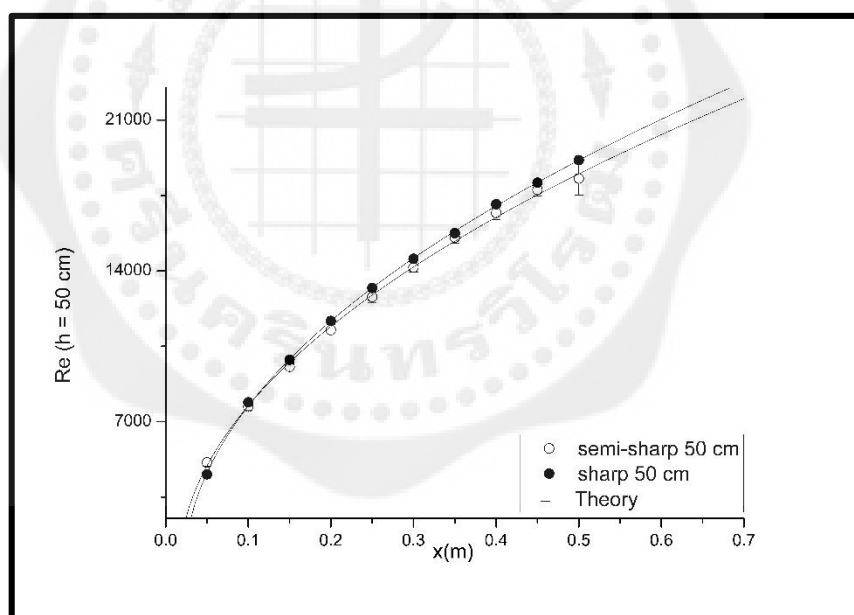
(จ)



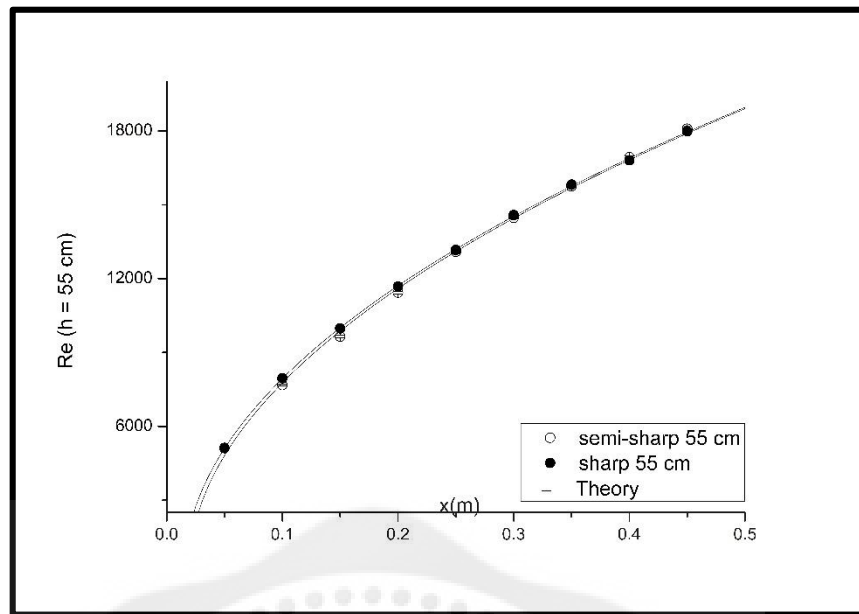
(ฉ)



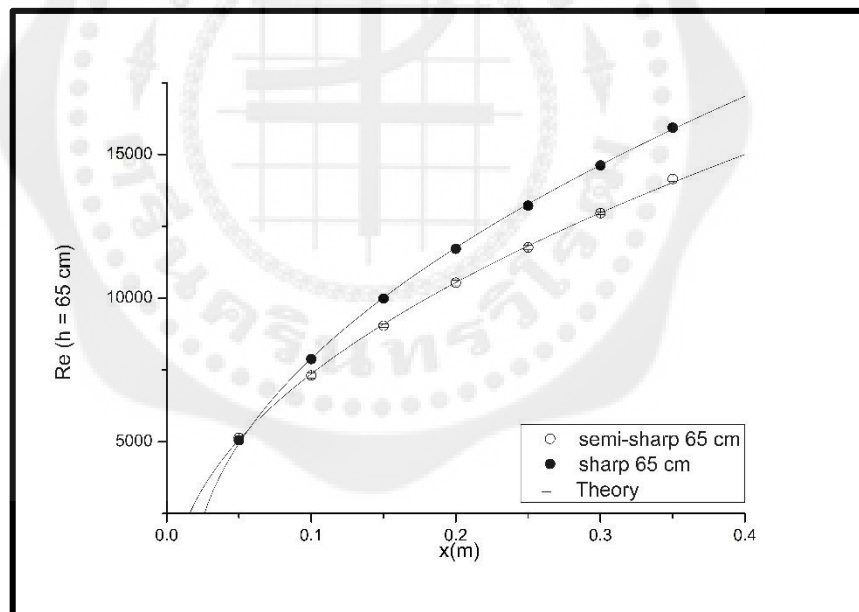
(a)



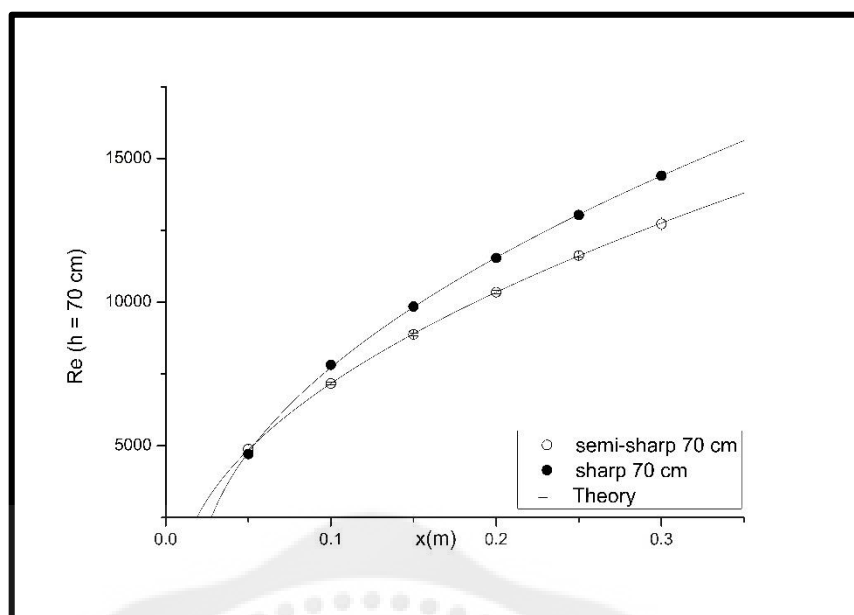
(b)



(D)



(E)



(ฎ)

ภาพประกอบ ข.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) และระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับระดับรูเปิด (x) กรณีรูเปิดประเภทขอบทิ่มคม (จุดโปร่ง) และขอบคม (จุดทึบ) เทียบกับทฤษฎี (เส้นทึบ) ที่ระดับรูเปิดต่างๆ (ก) 5 ซม. (ข) 15 ซม. (ค) 20 ซม.

(ง) 25 ซม. (จ) 30 ซม. (ฉ) 40 ซม. (ช) 45 ซม. (ซ) 50 ซม. (ฌ) 55 ซม.

(ญ) 65 ซม. (ฎ) 70 ซม.

ภาคผนวก ค.

- ค.1 คู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอริเซลล์
- ค.2 แบบประเมินสำหรับผู้เชี่ยวชาญเพื่อประเมินความเหมาะสมขององค์ประกอบต่างๆ
ในคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอริเซลล์

คู่มือการทดลองแท่งก้ำน้ำของทอริเชลลี
ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายและอุดมศึกษา

จัดทำโดย
นางสาวสุทธินี อภิวันท์

คู่มือเล่มนี้เป็นส่วนหนึ่งของปริญญานิพนธ์ตามหลักสูตร

การศึกษามหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

คำนำ

คู่มือการทดลองแท่งก้น้ำของทอริริเซลลี ใช้ประกอบการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ กลุ่มสาระวิทยาศาสตร์ ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายและบทปฏิบัติการระดับอุดมศึกษา ในหน่วยการเรียนรู้เรื่องของไหล:พลศาสตร์ของไหล เพื่อให้ผู้เรียนได้มีความรู้ความเข้าใจ มีทักษะการคิดคำนวณและการคิดวิเคราะห์ โดยคำนึงถึงความสามารถและความแตกต่างระหว่างบุคคลของผู้เรียน

การจัดทำคู่มือการทดลองนี้ผู้จัดทำได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับรูปแบบการจัดการเรียนการสอน พบว่า การเรียนรู้จะเกิดขึ้น เมื่อผู้เรียนได้ลงมือทำการทดลองและสร้างความรู้ที่เป็นของตนเอง จากความรู้ที่มีอยู่เดิมหรือจากความรู้ที่รับเข้ามาใหม่ (ทฤษฎีการเรียนรู้แบบสร้างสรรค์นิยม : Constructivist learning theory) จึงนำไปสู่การปรับเปลี่ยนวิธีเรียน วิธีสอนใหม่ ซึ่งสอดคล้องกับการจัดการเรียนการสอนในศตวรรษที่ 21 คือครูไม่ใช่ผู้จัดการทุกอย่าง ผู้เรียนได้ลงมือปฏิบัติเอง สร้างความรู้ความเข้าใจของตนเองและมีส่วนร่วมในการเรียนมากขึ้น (Active learning) (ผศ.ดร.ไพศาล สุวรรณน้อย. 2559: ออนไลน์) รูปแบบการเรียนรู้ที่เกิดจากแนวคิดนี้ที่น่าสนใจรูปแบบหนึ่ง คือ การจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐาน (Problem-based learning) รูปแบบการสอนแบบนี้นอกจากจะเป็นประโยชน์ต่อนักเรียนอย่างมาก แล้วยังเป็นผลดีต่อการสอนเนื้อหา เนื่องจากการให้ผู้เรียนได้ลงมือปฏิบัติด้วยตนเอง ทำให้ผู้เรียนเห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบย่อย ตลอดจนภาพรวมทั้งหมด ซึ่งมีงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศรองรับ

จุดประสงค์หลักของคู่มือการทดลองแท่งก้น้ำของทอริริเซลลี คือ เพื่อให้ผู้เรียนทำการทดลองด้วยตนเอง มีความรู้ความเข้าใจหลักการทางฟิสิกส์ พร้อมทั้งเป็นแนวทางแก่ผู้สอนในการติดตั้งชุดการทดลองแท่งก้น้ำของทอริริเซลลี เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนในระดับต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม

นอกจากนี้การสร้างคู่มือการทดลองนี้ ได้สอดแทรกกิจกรรมเสริมการเรียนรู้ เพื่อพัฒนาทักษะกระบวนการคิด และเป็นสื่อการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ที่ช่วยแบ่งเบาภาระผู้สอน ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าคู่มือการทดลองแท่งก้น้ำของทอริริเซลลีจะเป็นประโยชน์แก่ผู้เรียน ผู้สอน ตลอดจนวงการการศึกษาต่อไป

นางสาวสุทธิณี อภิวันท์

สารบัญ

คำนำ	หน้า
สารบัญ	96
ผังมโนทัศน์	97
ส่วนที่ 1 คู่มือครู	
ความเป็นมาและความสำคัญ	98
จุดประสงค์	100
ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง	101
คำชี้แจง	101
นิยามศัพท์เฉพาะ	102
สาระการเรียนรู้	103
การทดลองแท็งก์น้ำของทอริริเซลลี	133
ส่วนที่ 2 ระดับมัธยมศึกษา	
ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์	134
ทักษะของคนในศตวรรษที่ 21	141
การจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐาน (Problem based Learning)	143
แนวทางการจัดการเรียนรู้	147
เอกสารประกอบการเรียนพร้อมเฉลยแบบฝึกหัด	163
แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนพร้อมเฉลยแบบทดสอบ	204
ส่วนที่ 3 ระดับอุดมศึกษา	
บทปฏิบัติการฟิสิกส์	218

ผังมโนทัศน์คู่มือประกอบการสอน : การทดลองแท็งก์น้ำของทอริริเซลล์



ภาพประกอบ ค.1 ผังมโนทัศน์แสดงองค์ประกอบคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอริริเซลล์

ความเป็นมาและความสำคัญ

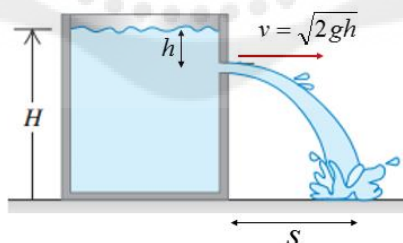
กลศาสตร์ของไหลมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของคนเราในทุกวัน อาทิ การเปิดอ่างล้างชาม น้ำที่ไหลผ่านระบบท่อ ปั๊ม วาล์ว กระบวนการต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตกระดาษ การมีชีวิตอยู่ได้ของคนเราก็เป็นผลมาจากกระบวนการทางกลศาสตร์ของไหล เช่น ระบบหมุนเวียนโลหิต สภาพแวดล้อมก็เป็นผลมาจากกลศาสตร์ของไหลเช่นกัน ได้แก่ ระบบการส่งน้ำประปา การระบายน้ำเสีย การผลิตเครื่องยนต์เจ็ทสำหรับเครื่องบินและยานอวกาศ เหล่านี้ต้องใช้หลักการของกลศาสตร์ของไหลมาร่วมวิเคราะห์ปัญหาทั้งสิ้น กลศาสตร์ของไหลมีวิวัฒนาการโดยอาศัยการค้นพบของนักวิทยาศาสตร์ นักคณิตศาสตร์ และนักฟิสิกส์ (ผศ.มัทธิษฏ์ ธนพิมพ์สาร. 2555: 16-20) ซึ่งหนึ่งในนั้นคือ อีแวนเกลิสตา ทอร์ริเชลลี (Evangelista Torricelli)



ภาพประกอบ ค.2 อีแวนเกลิสตา ทอร์ริเชลลี

ที่มา: (Lorenzo Lippi. 1647: Online)

อีแวนเกลิสตา ทอร์ริเชลลี ชาวอิตาลีผู้มีชีวิตอยู่ในช่วงคริสต์ศักราช 1608-1647 เป็นผู้ประดิษฐ์คิดค้นบารอมิเตอร์ (barometer) อีกทั้งยังค้นพบหลักการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของเหลว ที่ไหลผ่านรูเปิดกับระดับความสูงของผิวของของเหลวเทียบกับระดับรูเปิด (h) ตามสมการ $v = \sqrt{2gh}$

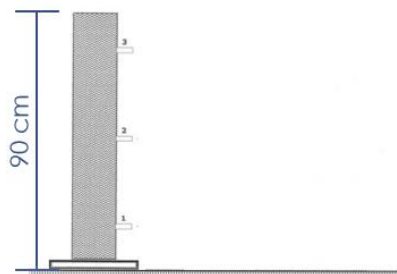


ภาพประกอบ ค.3 ภาพจำลองการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี

ที่มา: (Young; & Freedman. 2000: 400)

การแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับสมการดังกล่าวที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย คือ การหาความเร็วจากระยะทางการตกของน้ำ (s) ที่ไหลออกจากรูเปิด ดังภาพประกอบ 3 ซึ่งแสดงการไหลของน้ำออกจากแท็งก์น้ำที่ระดับความสูงต่าง ๆ การทดลองเช่นนี้ เรียกว่า “การทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี”

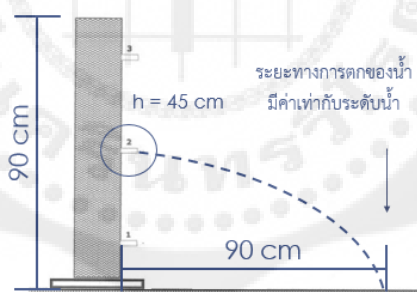
เริ่มแรกผู้จัดทำมีความสนใจศึกษาการหาระยะทางการตกของน้ำที่ไกลที่สุด ซึ่งสัมพันธ์กับระดับน้ำและระดับรูเปิด โดยการตั้งคำถามกับผู้เรียนว่า “ถ้าเราต้องการรดน้ำแปลงผักที่มีความยาว 90 เซนติเมตร ผู้เรียนจะต้องใส่น้ำเท่าไรและเปิดรูไหน จึงจะสามารถรดน้ำแปลงผักได้ทั้งหมด โดยที่ใครใช้ปริมาณน้ำน้อยที่สุดจะเป็นผู้ชนะ” ภาพประกอบ 4 แสดงรูปประกอบคำถาม



ภาพประกอบ ค.4 รูปประกอบคำถาม

ที่มา: (School Science lesson. 2016: Online)

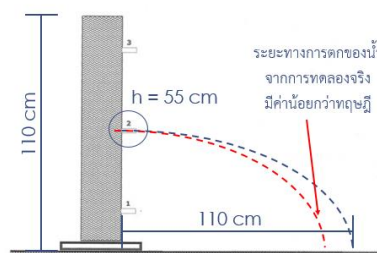
ผู้จัดทำได้ทำการศึกษาค้นคว้าพบว่า ถ้าเราใส่น้ำที่ระดับ 90 เซนติเมตร และเปิดรูตรงกลางคือ 45 เซนติเมตร จะได้ระยะทางการตกของน้ำ (s) เท่ากับ 90 เซนติเมตร หมายความว่า “ไม่ว่าจะใส่น้ำที่ระดับเท่าไรก็ตาม ระยะทางการตกของน้ำที่ไกลที่สุดจะมีค่าเท่ากับระดับน้ำที่ใส่ เมื่อเปิดรูตรงกลาง”



ภาพประกอบ ค.5 แสดงระยะทางการตกของน้ำซึ่งมีค่าเท่ากับระดับน้ำที่ใส่
เมื่อเปิดรูตรงกลาง

ที่มา: (School Science lesson. 2016: Online)

ต่อมาผู้จัดทำได้ออกแบบชุดการทดลองแท็งก์น้ำของทอร์ริเชลลี และทำการทดลองวัดระยะทางการตกของน้ำ โดยใส่น้ำที่ระดับ 110 เซนติเมตร และเปิดรูที่ 55 เซนติเมตร เมื่อวัดระยะทางการตกของน้ำ ได้ระยะทางการตกของน้ำเพียง 107 เซนติเมตรเท่านั้น ซึ่งต่างจากค่าทางทฤษฎีถึง 3 เซนติเมตร



ภาพประกอบ ค.6 แสดงระยะทางการตกของน้ำจากการทดลองจริงซึ่งมีค่าน้อยกว่า
ทฤษฎี

ที่มา: (School Science lesson. 2016: Online)

ภาพประกอบ ค.6 แสดงระยะทางการตกของน้ำจากการทดลองจริงมีค่าน้อยกว่าทฤษฎี และเมื่อลดระดับน้ำลงไปเรื่อย ๆ ระยะทางการตกของน้ำที่ได้จากการทดลองจะต่างจากทฤษฎี ประมาณ 10 เซนติเมตร

เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณความสัมพันธ์ของทอริเชลลี พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าอย่างชัดเจน ผู้จัดทำได้ศึกษาค้นคว้าต่อมาจนพบว่า สาเหตุที่ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่านั้น เกิดจากการสูญเสียพลังงานระหว่างที่ของเหลวไหลผ่านแท็งก์เก็บน้ำและรูเปิด อันเป็นผลมาจากความหนืดของของเหลว พฤติกรรมดังกล่าว สามารถอธิบายและวิเคราะห์ได้โดยอาศัยตัวแปรที่เรียกว่า “สัมประสิทธิ์ความเร็ว (velocity coefficient)”

จุดประสงค์

จุดประสงค์หลักในการสร้างชุดการทดลองแท็งก์น้ำของทอริเชลลี คือเพื่อให้ผู้เรียนได้ทำการทดลองด้วยตนเองและมีความรู้ความเข้าใจหลักการทางฟิสิกส์ พร้อมทั้งเป็นแนวทางให้ผู้สอนสามารถสร้างชุดการทดลองดังกล่าว เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนได้อย่างเหมาะสม

การทดลองชุดนี้มีจุดประสงค์ ดังนี้

1. ให้ผู้เรียนได้ทำการทดลองเรื่องของไหลจากชุดการทดลองแท็งก์น้ำของทอริเชลลีด้วยตนเอง
2. เป็นแนวทางให้ผู้สอนสามารถสร้างชุดการทดลองแท็งก์น้ำของทอริเชลลีได้อย่างเหมาะสม

ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง

1. อธิบายความหมาย ทดลอง วิเคราะห์ และคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันในของเหลว ความหนาแน่น และความลึกของของเหลว
2. อธิบายความหมาย คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันเกจและความดันสัมบูรณ์จากสถานการณ์ที่กำหนดให้ได้
3. อธิบายและวิเคราะห์หลักการทำงานของเครื่องมือวัดความดันได้
4. อธิบายและหาความสัมพันธ์กฎของพาสคัล เพื่อนำไปอธิบายหลักการทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิก
5. ทดลอง อภิปราย และคำนวณหาแรงลอยตัวที่ของเหลวกระทำต่อวัตถุในของเหลว และปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้
6. อธิบายความหมายของแรงตึงผิว ความตึงผิว ปรากฏการณ์การโค้งของของเหลว และปรากฏการณ์การซึมตามรูเล็กได้
7. ทดลองและคำนวณหาความตึงผิวของของเหลว และปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้
8. อธิบายความหมายและคำนวณหาแรงหนืดที่กระทำต่อวัตถุที่เคลื่อนที่ได้
9. วิเคราะห์และเปรียบเทียบของไหลในอุดมคติและของไหลจริง เส้นกระแส หลอดการไหล และหลักการของแบร์นูลลีได้
10. คำนวณความสัมพันธ์ตามสมการต่อเนื่อง และสมการแบร์นูลลีได้

คำชี้แจง

คู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอริเชลลี เป็นนวัตกรรมการเรียนรู้ที่เน้นผลผลิตและวิธีปฏิบัติของผู้สอน ซึ่งแสดงโครงสร้างและขั้นตอนการใช้งาน ดังนี้

1. คู่มือครู
2. เอกสารประกอบการเรียน เรื่อง ของไหล สำหรับนักเรียนมัธยมศึกษาตอนปลาย
3. แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนพร้อมเฉลยแบบทดสอบ
4. คู่มือบทปฏิบัติการ : การทดลองแท็งก์น้ำของทอริเชลลี

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. สัมประสิทธิ์ความเร็ว (velocity coefficient : c_v) คือ อัตราส่วนระหว่างความเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริงที่หน้าตัดของการไหลของลำของไหลต่อความเร็วตามทฤษฎีของของไหลอุดมคติ นั่นคือ

$$\text{สัมประสิทธิ์ความเร็ว} = \frac{\text{ค่าความเร็วที่ได้จากการทดลอง}}{\text{ค่าความเร็วที่ได้ตามทฤษฎีของของไหล}}$$

โดยปกติค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วเป็นค่าไม่มีหน่วย ซึ่งสำหรับรูเปิดประเภทขอบคมจะมีค่าประมาณ 0.95 – 0.99

2. รูเปิดขอบกึ่งคม (semi-sharp edge orifice) คือ รูเปิดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับความยาวของท่อ ในการทดลองนี้ผู้จัดทำได้ทำการเจาะรูท่อที่มีความยาว 6 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร สำหรับการทดลองแก๊งก์น้ำของทอริเชลลี รูเปิดประเภทนี้สามารถแสดงพฤติกรรมการไหลคล้ายกับการไหลผ่านรูเปิดทั้งประเภทไหลเหลี่ยม (square shoulder) และขอบเหลี่ยม (square edge) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับน้ำและระดับของรูเปิด
3. รูเปิดขอบคม (sharp edge orifice) คือ รูเปิด (ในทางปฏิบัติ) ที่มีมุมกวาดออกไปโดยรอบ ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ทำการเจาะรูโดยกวาดมุมออกไป 45 องศา
4. การทดลองแก๊งก์น้ำของทอริเชลลี (Torricelli's tank experiment) คือ การทดลองที่ผู้จัดทำได้สร้างขึ้น เพื่อใช้ทดลองในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็ว

สาระการเรียนรู้ เรื่อง ของไหล (สำหรับผู้สอน)

ของไหล เป็นหนึ่งในหน่วยการเรียนรู้ของสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ ในรายวิชาฟิสิกส์เพิ่มเติม ซึ่งแบ่งออกเป็น 9 หัวข้อย่อยดังนี้

1. ของไหล
2. ความหนาแน่น
3. ความดันในของไหล
4. กฎของพาสคัล
5. แรงลอยตัวและหลักของอาร์คิมิดีส
6. ความตึงผิว
7. ความหนืด
8. พลศาสตร์ของไหล
9. ความอลวน

ภาพประกอบ ค.7 แผนภาพแสดงเนื้อหาหน่วยการเรียนรู้เรื่องของไหล

1. ของไหล (Fluid)

สสารในสภาพปกติที่อุณหภูมิหนึ่งมี 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส สสารที่เป็นของแข็งมีรูปร่างและปริมาตรคงตัว ถ้าถูกแรงไม่มากอัด ส่วนของเหลวจะมีปริมาตรคงตัวและมีรูปทรงตามภาชนะที่บรรจุ ดังภาพประกอบ ค.8 และปริมาตรจะลดลงเล็กน้อยเมื่อถูกแรงอัด ส่วนแก๊สมีรูปร่างและปริมาตรไม่คงตัว ปริมาตรของแก๊สขึ้นอยู่กับปริมาตรภาชนะที่บรรจุ แก๊สมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมากกว่าของเหลวมาก แม้อุณหภูมิจะเปลี่ยนเพียงเล็กน้อยก็ตาม เนื่องจากของเหลวและแก๊สมีรูปร่างไม่แน่นอน อีกทั้งสามารถไหลจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งได้ จึงอาจเรียกของเหลวและแก๊สว่า ของไหล (fluid)



ภาพประกอบ ค.8 แสดงรูปร่างที่ไม่แน่นอนของของเหลวซึ่งเปลี่ยนแปลงตามภาชนะบรรจุ
ที่มา: (Natkamol Chand .2558 :Online)

2. ความหนาแน่น (density)

สมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของวัสดุคือ ความหนาแน่น ซึ่งเรานิยามว่าเป็นมวลต่อปริมาตรหนึ่งหน่วย วัสดุเนื้อเดียวเช่น น้ำแข็งหรือเหล็กมีความหนาแน่นเดียวตลอดทั้งก้อน เราใช้พยัญชนะกรีก ρ ("rho") แทนความหนาแน่น ถ้าวัสดุเนื้อเดียวมวล m มีปริมาตร V ความหนาแน่นของวัสดุนั้น สามารถหาได้จากสมการ

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{ค.1})$$

โดยที่	ρ	คือ	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
	m	คือ	มวลของสาร (กิโลกรัม)
	V	คือ	ปริมาตรของสาร (ลูกบาศก์เมตร)

ความหนาแน่นของวัสดุบางประเภทมีค่าต่างกันจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง สำหรับวัสดุเหล่านี้เป็นความหนาแน่นเฉลี่ย โดยทั่วไปความหนาแน่นนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อม เช่น อุณหภูมิและความดัน

หน่วยของความหนาแน่นในระบบ SI คือ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร (kg / m^3) ซึ่งหน่วยของความหนาแน่นในระบบ cgs คือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (g / cm^3) ซึ่งใช้กันแพร่หลายโดยที่

$$1 \text{ g} / \text{cm}^3 = 1,000 \text{ kg} / \text{m}^3$$

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (relative density) หรือ ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)

คืออัตราส่วนความหนาแน่นของวัสดุต่อความหนาแน่น 1,000 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ของ น้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นสัมพัทธ์เป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วย

วัสดุ	ความหนาแน่น (kg / m ³)	วัสดุ	ความหนาแน่น (kg / m ³)
อากาศ	1.20	เหล็ก,	7.8×10^3
เอทานอล	0.81×10^3	ทองเหลือง	8.6×10^3
เบนซีน	0.9×10^3	ทองแดง	8.9×10^3
น้ำแข็ง	0.92×10^3	เงิน	10.5×10^3
น้ำ	1.00×10^3	ตะกั่ว	11.3×10^3
น้ำทะเล	1.03×10^3	ปรอท	13.6×10^3
เลือด	1.03×10^3	ทอง	19.3×10^3
กลีเซอริน	1.26×10^3	แพลทินัม	21.4×10^3
คอนกรีต	2.0×10^3	ดาวเคราะห์ขาว	1.00×10^{10}
อะลูมิเนียม	2.7×10^3	ดาวนิวตรอน	1.00×10^{18}

ตาราง ค.1 ความหนาแน่นของสารสามัญบางชนิด

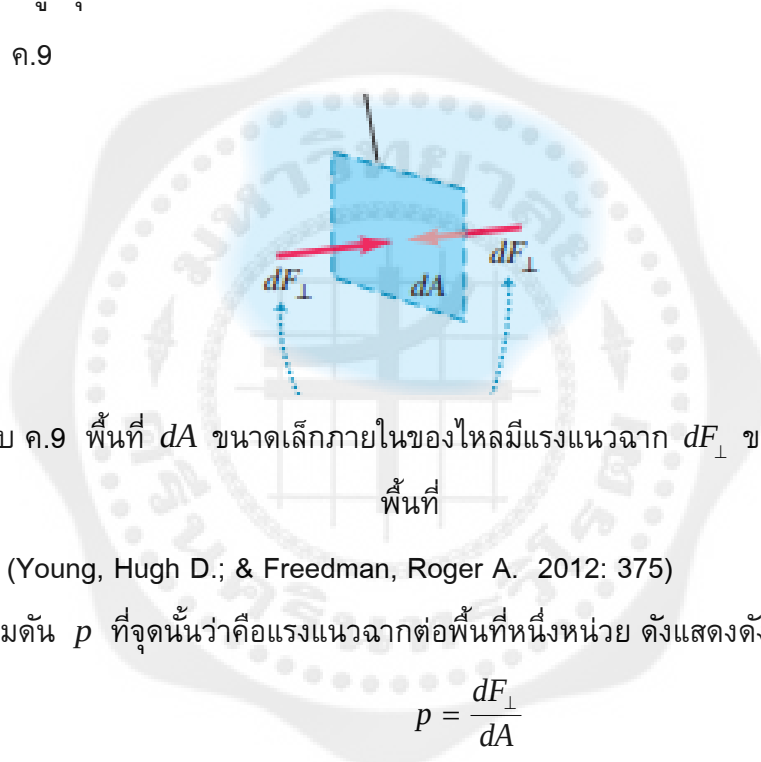
ที่มา : (ปิยพงษ์ สิริคัง. 2547: 428)

ตาราง ค.1 แสดงความหนาแน่นของสารสามัญที่อุณหภูมิปกติ พบว่า สารสามัญแต่ละชนิดมีค่าความหนาแน่นไม่เท่ากัน ซึ่งสารสามัญที่หนาแน่นที่สุดบนโลก คือ โลหะออสเมียม (Osmium) คือธาตุที่มีเลขอะตอม 76 สัญลักษณ์ธาตุคือ Os ซึ่งเป็นธาตุโลหะทรานซิชัน มีความหนาแน่นเท่ากับ 22,500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3. ความดันในของไหล

เมื่อของไหล (ของเหลวหรือแก๊ส) อยู่หนึ่ง ของไหลออกแรงตั้งฉากกับพื้นที่ผิวสัมผัสกับของไหล เช่น ผนังภาชนะหรือวัตถุที่จมอยู่ในของไหล ตัวอย่างเช่น แรงที่กดขาเรา เมื่อเราห้อยขาในสระว่ายน้ำ แม้ว่าของไหลทั้งก่อนจะดูว่าอยู่หนึ่ง แต่โมเลกุลที่ประกอบเป็นของไหลเคลื่อนที่ไปมา แรงที่ของไหลกระทำเกิดจากการชนของโมเลกุลของไหลกับสิ่งแวดล้อม

ถ้าเราคิดว่ามีผิวสมมุติภายในของไหล ของไหลบนสองฝั่งของผิวออกแรงขนาดเท่ากันแต่ทิศตรงข้าม (มิเช่นนั้นผิวจะมีความเร่งและของไหลจะไม่คงอยู่หนึ่ง) พิจารณาผิวเล็ก ๆ พื้นที่ dA ซึ่งมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดหนึ่งในของไหล แรงแนวฉากที่ของไหลทำแต่ละด้านมีขนาด $dF_{\perp}$ ดังภาพประกอบ ค.9



ภาพประกอบ ค.9 พื้นที่ dA ขนาดเล็กภายในของไหลมีแรงแนวฉาก $dF_{\perp}$ ขนาดเท่ากันทำต่อพื้นที่

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 375)

เรานิยามความดัน p ที่จุดนั้นว่าคือแรงแนวฉากต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย ดังแสดงดังสมการ

$$p = \frac{dF_{\perp}}{dA} \quad (\text{ค.2})$$

ถ้าความดันมีค่าเท่ากันที่ทุกจุดบนผิวระนาบจำกัดพื้นที่ A เราจะได้ว่า

$$p = \frac{F_{\perp}}{A} \quad (\text{ค.3})$$

โดยที่ $F_{\perp}$ คือแรงแนวฉากสุทธิบนผิวด้านหนึ่ง หน่วยในระบบ SI ของความดันคือ **พาสคัล (Pa)**

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

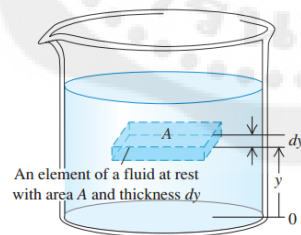
ความดันบรรยากาศ (p_a) สำหรับบรรยากาศของโลก จะประกอบไปด้วยโมเลกุลของแก๊สจำนวนมาก โมเลกุลของแก๊สจะมีมวลน้อยมาก โดยโมเลกุลเหล่านี้จะเคลื่อนที่อย่างอิสระวิ่งชนผนังภาชนะ ทำให้เกิดเป็นแรงดันเนื่องจากการชนขึ้น ส่งผลให้เกิดเป็นความดันเนื่องจากบรรยากาศของโลก

ดังนั้น ในระดับความสูงที่ต่างกันไม่มากนัก “ความดันบรรยากาศจะมีค่าคงที่ โดยที่ระดับน้ำทะเลจะมีค่าความดันประมาณ 1.01×10^5 เรียกว่า เป็นค่าความดัน 1 บรรยากาศ (atm)”

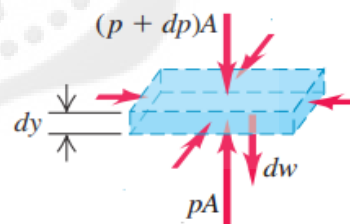
ข้อควรระวัง : ในกลศาสตร์ของไหล “ความดัน” และ “แรง” มีความหมายต่างกัน ความดันของไหลกระทำตั้งฉากกับผิวใด ๆ ในของไหลไม่ว่าจะวางตัวอย่างไร ดังนั้นความดันเป็นปริมาณสเกลาร์ ในทางตรงข้าม แรงเป็นเวกเตอร์ซึ่งมีทิศทางที่แน่นอน และความดันเป็นขนาดของแรงต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย

ถ้าเราไม่คำนึงถึงน้ำหนักของไหล ค่าความดันในของไหลมีค่าเท่ากันตลอดปริมาตรของไหล เราใช้การประมาณในการพิจารณาเรื่องความเค้นและความเครียดเชิงปริมาตร แต่บางกรณีเราจำเป็นต้องคำนึงถึงน้ำหนักของของไหลด้วย ยกตัวอย่างเช่น ความดันบรรยากาศที่ระดับสูงมีขนาดเล็กกว่าที่ระดับน้ำทะเล นี่เป็นเหตุผลว่าทำไมเราต้องเพิ่มความดันให้ห้องเครื่องบินเมื่อบินที่ระดับ 35,000 ฟุต

เราสามารถหาความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างความดัน (p) ที่จุดใด ๆ ในของไหลสถิตกับระดับความสูง y ของจุดนั้นได้ เราสมมติว่าความหนาแน่น (ρ) ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (g) มีค่าเดียวตลอด ถ้าของไหลอยู่ในสมดุล ทุกชิ้นปริมาตรจะอยู่ในสมดุล พิจารณาชิ้นของไหลบางสูง dy



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ ค.10 (ก) ของไหลบางสูง dy (ข) แรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อพื้นที่ของไหลที่อยู่ในสมดุล

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 376)

ดังภาพประกอบ ค.10 ผิวด้านล่างและผิวด้านบนต่างมีพื้นที่ A และผิวทั้งสองอยู่ที่ความสูง y และ $y + dy$ เหนือระดับอ้างอิงที่ $y = 0$ ชิ้นของไหลมีปริมาตร $dV = A dy$ มีมวล $dm = \rho dV = \rho A dy$ และน้ำหนักคือ $dw = dm g = \rho g A dy$

แรงอื่นที่ทำต่อชิ้นของไหลนี้มีอะไรบ้าง ให้ความดันที่ผิวล่างเป็น p องค์ประกอบแกน y ของแรงที่ขึ้นสู่ที่บนผิวนี้คือ pA ความดันที่ผิวบนคือ $p + dp$ องค์ประกอบแกน y ของแรง (ทิศลง) บนผิวนี้คือ $-(p + dp)A$ ชิ้นของไหลอยู่ในสมดุล ดังนั้นองค์ประกอบแกน y ของแรงซึ่งรวมน้ำหนักและแรงที่ผิวล่างกับผิวบนต้องเป็นศูนย์

$$\Sigma F_y = 0 \quad \text{ดังนั้น} \quad pA - (p + dp)A - \rho g A dy = 0$$

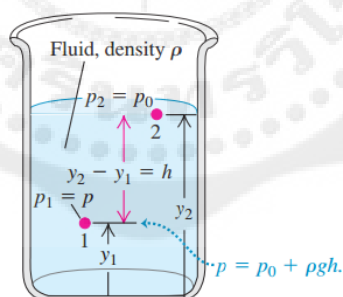
เมื่อเราหารพื้นที่ A ตลอดและจัดสมการใหม่ เราได้ว่า

$$\frac{dp}{dy} = -\rho g \quad (\text{ค.4})$$

สมการ (ค.4) แสดงว่าเมื่อ y เพิ่มขึ้น p จะลดลง ถ้า p_1 และ p_2 เป็นความดันที่มีความสูง y_1 และ y_2 ตามลำดับ ถ้าความดัน p และค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก g คงตัว เราจะได้ว่า

$$p_1 - p_2 = -\rho g (y_2 - y_1) \quad (\text{ค.5})$$

เรานิยมเขียนสมการ (ค.5) ในรูปของความลึกจากผิวของของไหลเพื่อความสะดวกในการคำนวณ



ภาพประกอบ ค.11 ความดันที่ความลึก h ในของไหลมีขนาดมากกว่า

ความดัน p_0 ที่ผิวอยู่เท่ากับ ρgh

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 377)

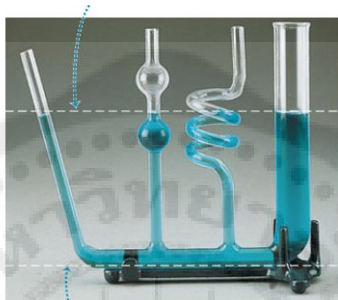
จากภาพประกอบ ค.11 เลือกจุด 1 ให้เป็นจุดใด ๆ ในของไหลและให้ p แทนความดันที่จุดนี้ ให้จุด 2 เป็นจุดที่ผิวของไหลที่มีความดันเท่ากับ p_0 (ตัวห้อยศูนย์สำหรับความลึกศูนย์) ความลึกของจุด 1 จากผิวคือ $h = y_2 - y_1$ และสมการ (ค.5) จะเป็น

$$p_0 - p = -\rho g (y_2 - y_1) = -\rho gh$$

จัดรูปสมการ (ค.5) จะได้ว่า

$$p = p_0 + \rho gh \quad (\text{ค.6})$$

ความดัน p ที่ความลึก h มีค่ามากกว่าความดัน p_0 ที่ผิวอยู่ ρgh จากสมการ (ค.6) ได้ว่า ความดันมีค่าเดียวกันที่จุดสองจุดใด ๆ ซึ่งอยู่ระดับเดียวกันในของไหล รูปร่างของภาชนะไม่สำคัญ ดังภาพประกอบ ค.12



ภาพประกอบ ค.12 ความดันในของไหลมีค่าเท่ากันที่ระดับเดียวกัน
รูปร่างของภาชนะไม่มีผลต่อความดัน

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 377)

แรงดันและความดันของของเหลวใด ๆ จะมีทิศได้ทุกทิศทาง และตั้งฉากกับผิวสัมผัส ถ้าเรานำของเหลวไปใส่ภาชนะ แรงดันและความดันของของเหลวที่กระทำต่อผนังภาชนะ จะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ แรงดันและความดันที่กดกันภาชนะและด้านข้างภาชนะ

3.1 แรงดันและความดันของเหลวที่กระทำต่อพื้นที่กันภาชนะ

3.1.1 กรณีที่ภาชนะบรรจุของเหลวเป็นภาชนะปิด

ในของเหลว โมเลกุลของของเหลวจะเคลื่อนที่ได้น้อย แรงดันที่กระทำต่อพื้นที่ของของเหลวเกิดจากน้ำหนักของของเหลวที่กดทับบนพื้นที่ นั้นคือ

$$F = mg$$

โดยจะพบว่าของเหลวที่มีความหนาแน่นเป็น ρ ณ จุดที่ลึกจากผิวของเหลว h จะเกิดความดันเนื่องจากของเหลว (ซึ่งกดทับอยู่ด้านบน) ตามสมการ (ค.7)

$$P_w = \rho gh \quad (\text{ค.7})$$

เมื่อ	P_w	คือ	ความดันที่กักกันภาชนะ (นิวตัน/ตารางเมตร)
	g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตร/วินาทีกำลังสอง)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
	h	คือ	ความลึกเมื่อวัดจากผิวของของเหลวถึงก้นภาชนะ (เมตร)

นั่นคือ “ความดันในของเหลวที่อยู่หนึ่ง ณ จุดหนึ่งจะขึ้นกับความหนาแน่นของของเหลว และความลึกของของเหลวนั่นเอง”

3.1.2 กรณีที่ภาชนะบรรจุของเหลวเป็นภาชนะเปิด

ของเหลวที่บรรจุอยู่ในภาชนะเปิดนั้น ความดันที่กระทำต่อพื้นที่ก้นภาชนะจะมี 2 อย่าง ได้แก่ ความดันบรรยากาศ (P_a) และความดันเกจ (P_w)

ค่าความดันในของเหลว ตามความสัมพันธ์ $P_w = \rho gh$ เป็นความดัน ณ จุดลึกจากผิวของเหลวเป็นระยะ h และเป็นความดันอันเนื่องมาจากน้ำหนักของของเหลว แต่เนื่องจากโลกของเราอยู่ภายใต้บรรยากาศของโลก ซึ่งมีความกดดันอยู่ (แม้เราจะเคยชินจนรู้สึกเหมือนไม่มีอะไรอยู่ก็ตาม) ดังนั้นที่ผิวหน้าของของเหลว อากาศก็จะกดอยู่ด้วยความดันบรรยากาศ นั่นคือ “ความดันที่แท้จริง ณ จุดลึกจากผิวของเหลว จะประกอบด้วยความดันเนื่องจากตัวของเหลวรวมกับความดันบรรยากาศที่ผิวหน้าของของเหลว เรียกว่า ความดันสัมบูรณ์ (absolute pressure)” เขียนได้เป็น

$$\text{ความดันสัมบูรณ์ } P = P_w + P_a \text{ หรือ } P = \rho gh + P_a$$

อย่างไรก็ตามในการวัดความดันโดยปกติ เครื่องวัดจะอยู่ภายใต้ความดันบรรยากาศเช่นกัน ก่อนทำการวัดเครื่องวัดจะมีสเกลซีที่ศูนย์ (ทั้ง ๆ ที่ความจริงควรจะมีค่าความดันบรรยากาศ) และเมื่อนำเครื่องวัดไปวัดค่าความดันใด ๆ ค่าที่เครื่องวัดอ่านได้จะเป็นค่าความดันที่สูงขึ้นไปกว่าความดันบรรยากาศ เพราะขณะเครื่องวัดยังไม่อ่านจะชี้เลขศูนย์ นั่นคือ ค่าความดันบรรยากาศอยู่ “ค่าความดันที่อ่านได้จากเครื่องวัดโดยตรง เรียกว่า ความดันเกจ (gauge

pressure, P_g)” ซึ่งจะเป็นค่าที่ยังไม่รวมกับค่าความดันบรรยากาศ ดังนั้นเมื่อใช้เครื่องวัดความดันได้เป็นความดันเกจแล้ว ค่าความดันที่แท้จริงหรือความดันสัมบูรณ์คือ

ความดันสัมบูรณ์ = ความดันเกจ + ความดันบรรยากาศ

$$P = P_g + P_a \quad (\text{ค.8})$$

3.2 แรงดันและความดันของเหลวที่กระทำต่อพื้นที่ด้านข้างภาชนะ

การหาความดันของของเหลวที่กระทำต่อพื้นที่ด้านข้าง สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของความดัน ณ จุดบนสุดและจุดล่างสุดของพื้นที่นั้น นั่นคือ

$$P_{\text{ข้าง}} = \frac{P_{\text{บนสุด}} + P_{\text{ล่างสุด}}}{2} \quad (\text{ค.9})$$

เมื่อ $P_{\text{ข้าง}}$ คือ ความดันที่ดันพื้นที่ด้านข้าง (นิวตัน/ตารางเมตร)
 $P_{\text{บนสุด}}$ คือ ความดัน ณ จุดบนสุดของพื้นที่ (นิวตัน/ตารางเมตร)
 $P_{\text{ล่างสุด}}$ คือ ความดัน ณ จุดล่างสุดของพื้นที่ (นิวตัน/ตารางเมตร)

นอกจากนี้ ความดันของเหลวที่กระทำต่อพื้นที่ด้านข้าง หาได้จากสมการ

$$P_{\text{เกจ}} = \rho gh \quad (\text{ค.10})$$

เมื่อ h คือ ความลึกที่วัดจากผิวของของเหลวถึงจุดกึ่งกลางพื้นที่ด้านข้าง (เมตร)

การหาความดันที่กระทำต่อพื้นที่ด้านข้าง ไม่จำเป็นต้องคิดความดันบรรยากาศ p_a เพราะความดันบรรยากาศจะมีทั้งภายในและภายนอกภาชนะ ทำให้เกิดการหักล้างกันหมดไป

3.3 เครื่องวัดความดัน

3.3.1 แมนอมิเตอร์แบบท่อปลายเปิด (manometer)

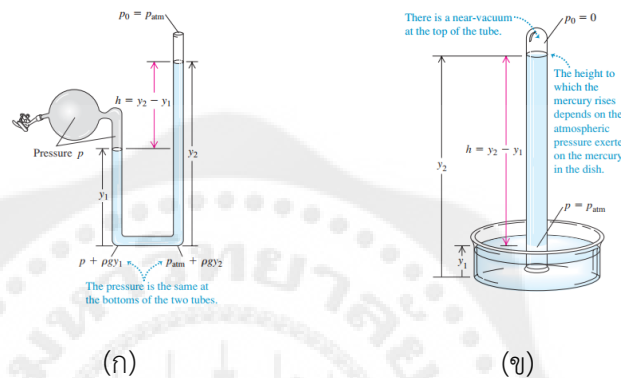
เป็นเครื่องมือวัดความดันที่ง่ายที่สุดชนิดหนึ่ง ประกอบด้วย หลอดแก้วรูปตัวยูบรรจุของเหลวความหนาแน่น ρ ซึ่งมักจะเป็นปรอทหรือน้ำ ปลายหนึ่งของท่อต่อกับภาชนะที่ต้องการวัดความดัน p และอีกปลายข้างหนึ่งเปิดสู่บรรยากาศที่ความดัน $p_0 = p_a$ ความดันที่ด้านล่าง

ของท่อเนื่องจากของไหลในด้านซ้ายมือคือ $p + \rho g y_1$ และความดันที่ด้านล่างเนื่องจากของไหลในด้านขวามือคือ $p_a + \rho g y_2$ ความดันทั้งสองเป็นความดันที่จุดเดียวกันต้องเท่ากัน

$$p + \rho g y_1 = p_a + \rho g y_2$$

$$p - p_a = \rho g (y_2 - y_1) = \rho g h \quad (\text{ค.11})$$

สมการ (ค.11) p คือความดันสัมบูรณ์ และผลต่างของความดันสัมบูรณ์กับความดันบรรยากาศ $p - p_a$ คือความดันเกจ ดังนั้นความดันเกจแปรผันตรงกับผลต่างความสูง $(y_2 - y_1)$



ภาพประกอบ ค.13 เกจวัดความดัน (ก) แมนอมิเตอร์ และ (ข) บารอมิเตอร์ปรอท
ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 378)

3.3.2 บารอมิเตอร์ปรอท (mercury barometer) เป็นเครื่องมือสำหรับวัดความดันบรรยากาศโดยตรง ประกอบด้วยหลอดแก้วปลายปิดบรรจุปรอทจนเต็มคว่ำในภาชนะที่มีปรอท ภาพประกอบ ค.13(ข) โดยไม่ให้อากาศเข้าไปในหลอดที่สมดุล ช่องว่างเหนือลำปรอทมีแต่ไอปรอทเท่านั้น ความดันไอปรอทมีขนาดน้อยมาก ดังนั้นความดัน p_0 ที่ด้านบนของลำปรอทถือว่าเป็นศูนย์ จากสมการ (ค.6)

$$p_a = p = 0 + \rho g (y_2 - y_1) = \rho g h \quad (\text{ค.12})$$

ดังนั้น บารอมิเตอร์ปรอทอ่านค่าความดันบรรยากาศ P_a โดยตรงจากความสูงของลำปรอท

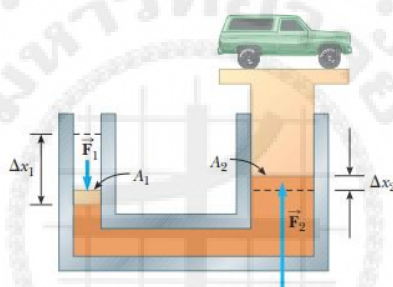
ความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล $P_a = 1.01 \times 10^5$ นิวตัน/ตารางเมตร ดังนั้น ถ้าในหลอดบรรจุปรอทที่มีความหนาแน่น $\rho = 13.6 \times 10^3$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ก็จะได้ว่าความสูงของลำปรอทในหลอดแก้ว เมื่อความดันข้างนอก คือ 1 บรรยากาศ คือ

$$h = \frac{1.01 \times 10^5}{13.6 \times 10^3 \times 9.8} = 0.76 \text{ เมตร}$$

จึงสามารถกล่าวได้ว่า ความดัน 1 บรรยากาศ มีค่าเท่ากับ ความสูง 760 มิลลิเมตรของปรอทนั่นเอง ถ้าความดันบรรยากาศเปลี่ยนไป ก็จะทำให้ความสูงของของเหลวในหลอดเปลี่ยนไปด้วย

4. กฎของพาสคัลและเครื่องไฮดรอลิก

พาสคัล นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสได้ศึกษาสมบัติเกี่ยวกับความดันในของเหลว แล้วตั้งกฎใน ค.ศ. 1653 เรียกว่า กฎของพาสคัล ซึ่งกล่าวว่า “เมื่อเพิ่มความดัน ณ ตำแหน่งใด ๆ ให้กับของเหลวที่อยู่หนึ่งในภาชนะปิด ความดันที่เพิ่มขึ้นจะถูกถ่ายทอดไปยังทุก ๆ จุดในของเหลวนั้น” สรุปคือ เมื่อความดันในของเหลวเพิ่มขึ้น ณ จุดใดก็ตาม ทุก ๆ จุดในของเหลว (ของเหลวหนึ่งในภาชนะปิด) จะมีความดันเพิ่มขึ้นเท่า ๆ กัน



ภาพประกอบ ค.14 หลักการทำงานของเครื่องยกไฮดรอลิก ใช้กฎของพาสคัล

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 379)

กระบอกสูบ 2 กระบอกที่มีขนาดต่างกัน มีพื้นที่หน้าตัด A_1 และ A_2 ตามลำดับ ต่อเชื่อมเข้าด้วยกัน และบรรจุของเหลวอยู่ภายใน เมื่อออกแรงกด F_1 ดันลูกสูบด้านที่มีพื้นที่หน้าตัด A_1 จะทำให้เกิดความดันในของเหลวเพิ่มขึ้น เป็น $P_1 = \frac{F_1}{A_1}$

ความดันที่เพิ่มขึ้นนี้ จะถูกถ่ายทอดไปยังทุก ๆ จุดในของเหลว ทำให้ที่ปลายลูกสูบอีกข้างหนึ่งที่มีพื้นที่หน้าตัด A_2 ส่งผลให้เกิดเป็นแรงดันที่ F_2 ซึ่งมีค่าเป็น

$$F_2 = P_2 A_2 = \left(\frac{F_1}{A_1} \right) A_2 \quad (\text{ค.13})$$

นั่นคือ ที่กระบอกสูบนี จะเกิดแรงที่จะยกวัตถุที่หนัก F_2 ได้นั่นเอง เขียนได้ว่า

ความดันที่เพิ่มในกระบอกสูบด้านซ้าย = ความดันที่เพิ่มในกระบอกสูบด้านขวา

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

จากสมการ (ค.13) สรุปได้ว่า ถ้าเราออกแรงกด F_1 น้อย จะสามารถยกวัตถุหนัก F_2 ได้มาก ทำให้เกิดการผ่อนแรงมากขึ้น เครื่องผ่อนแรงที่อาศัยกฎของพาสคัลนี้ เรียกว่า “เครื่องอัดไฮดรอลิก เครื่องมือนี้เป็นเครื่องมือที่ใช้ยกวัตถุที่มีน้ำหนักมาก” เช่น แม่แรงยกรถ เป็นต้น เครื่องอัดไฮดรอลิกโดยทั่วไปจะมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ลูกสูบใหญ่ และลูกสูบเล็ก ซึ่งมีท่อเชื่อมต่อถึงกัน ภายในนั้นจะบรรจุของเหลวไว้ดังแสดงในภาพประกอบ 14 เมื่อจะยกวัตถุต้องนำลูกสูบใหญ่เป็นตัวยกวัตถุนั้น แล้วออกแรงกดที่ลูกสูบเล็กแล้วจะสามารถยกวัตถุหนักได้ โดยใช้แรงที่น้อยกว่า

การคำนวณเกี่ยวกับเครื่องอัดไฮดรอลิกนั้นจะอาศัยกฎของพาสคัล กล่าวคือ “ความดันที่ลูกสูบใหญ่จะมีค่าเท่ากับความดันที่ลูกสูบเล็ก” เพราะอยู่ในของเหลวเดียวกัน นั่นคือ

$$\frac{\text{แรงดันลูกสูบใหญ่}}{\text{พื้นที่หน้าตัดลูกสูบใหญ่}} = \frac{\text{แรงดันลูกสูบเล็ก}}{\text{พื้นที่หน้าตัดลูกสูบเล็ก}}$$

$$\frac{F_2}{A_2} = \frac{F_1}{A_1}$$

(ค.14)

โดยที่ F_2 คือน้ำหนักที่ยกได้
 F_1 คือแรงที่ใช้กด
 A_2 คือพื้นที่หน้าตัดลูกสูบใหญ่
 A_1 คือพื้นที่หน้าตัดลูกสูบเล็ก

สำหรับการได้เปรียบเชิงกลและประสิทธิภาพเชิงกลของเครื่องอัดไฮดรอลิก หาได้จาก

$$\text{การได้เปรียบเชิงกลทางปฏิบัติ (M.A.ปฏิบัติ)} = \frac{F_2}{F_1} \quad (\text{ค.15})$$

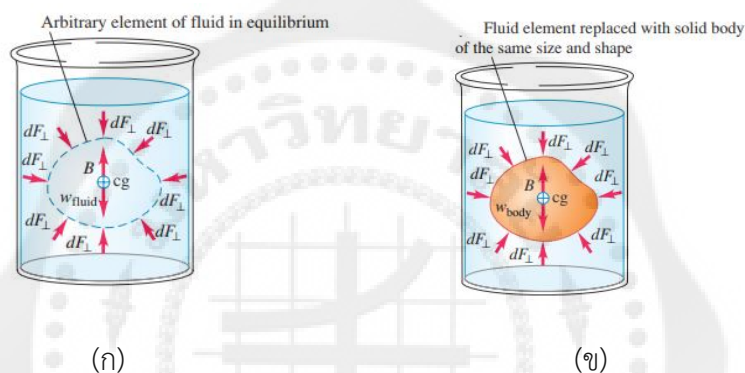
$$\text{การได้เปรียบเชิงกลทางทฤษฎี (M.A.ทฤษฎี)} = \frac{A_2}{A_1} \quad (\text{ค.16})$$

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกล (Eff)} = \frac{M.A. \text{ปฏิบัติ}}{M.A. \text{ทฤษฎี}} \times 100\% = \frac{F_2/F_1}{A_2/A_1} \times 100\% \quad (\text{ค.17})$$

5. การลอยตัว

การลอยตัวเป็นปรากฏการณ์ที่เราคุ้นเคยกัน วัตถุซึ่งจมอยู่ในน้ำดูเหมือนว่าหนักน้อยกว่าเมื่ออยู่ในอากาศ เมื่อวัตถุมีความหนาแน่นน้อยกว่าของไหล วัตถุจะลอย โดยปกติร่างกายมนุษย์จะลอยน้ำ และลูกโป่งบรรจุฮีเลียมจะลอยในอากาศ

หลักของอาร์คิเมดีสกล่าวว่า “เมื่อวัตถุจมในของไหลทั้งก้อนหรือบางส่วน ของไหลจะออกแรงดันขึ้นต่อวัตถุเท่ากับน้ำหนักของไหลซึ่งถูกแทนที่” ในการพิสูจน์หลักการนี้ เราพิจารณาสวนของไหลใด ๆ ที่อยู่นิ่ง ในภาพประกอบ ค.15 (ก) แก้วโคร่งไม่สม่ำเสมอ คือ ผิวล้อมรอบของไหลส่วนนี้ ลูกศรแทนแรงที่ของไหลภายนอกกระทำต่อผิวขอบเขต



ภาพประกอบ ค.15 (ก) ชิ้นของไหลอยู่ในสมดุลภายใต้น้ำหนักของตัวเองและแรงลอยตัวจากของไหลรอบ(ข) ชิ้นของไหลถูกแทนที่ด้วยวัตถุ B ซึ่งมีรูปร่างอย่างเดียวกันทุกประการ แรงลอยตัวมีค่าเดียวกันและเท่ากับน้ำหนักของของไหลที่วัตถุ B แทนที่

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 380)

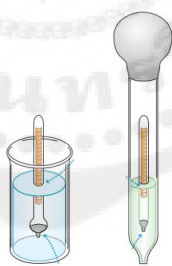
ของไหลทั้งหมดอยู่ในสมดุล ผลบวกขององค์ประกอบตามแกน y ของแรงซึ่งทำต่อของไหลส่วนนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นผลบวกขององค์ประกอบตามแกน y ของแรงซึ่งทำที่ผิวต้องเป็นแรงที่คั่นขนาดเท่ากับน้ำหนัก mg ของของไหลภายในผิว นอกจากนั้นผลบวกของทอร์กซึ่งกระทำต่อของไหลส่วนนี้ต้องเป็นศูนย์ด้วย ดังนั้นแนวแรงองค์ประกอบแกน y ของแรงซึ่งทำต่อผิวต้องผ่านจุดศูนย์ถ่วงของไหลนี้

เมื่อเราเอาของไหลภายในผิวออกและแทนด้วยวัตถุ B ซึ่งมีรูปร่างเดียวกัน ภาพประกอบ ค.15 (ข) ความดันที่ทุกจุดเท่าเดิม ดังนั้นแรงที่คั่นสุทธิที่ของไหลที่ทำต่อวัตถุมีค่าเท่าเดิมด้วย

ขนาดเท่าน้ำหนัก mg ของของไหลซึ่งถูกแทนที่ด้วยวัตถุ เราเรียกแรงนี้ว่า แรงลอยตัว แนวแรงนี้ผ่านจุดศูนย์ถ่วงของของไหลซึ่งถูกแทนที่ ซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นจุดศูนย์ถ่วงของวัตถุ

เมื่อลูกโป่งลอยสมดุลในอากาศ น้ำหนักลูกโป่ง (รวมแก๊สภายใน) ต้องมีขนาดเท่าน้ำหนักอากาศซึ่งถูกแทนที่ด้วยลูกโป่ง เมื่อเรื่อดำน้ำซึ่งดำอยู่ในทะเลอยู่ในสภาพสมดุล น้ำหนักทั้งหมดของเรือต้องเท่ากับน้ำหนักของน้ำซึ่งเรือแทนที่ วัตถุซึ่งมีความหนาแน่นเฉลี่ยน้อยกว่าของเหลวลอยอยู่บนของเหลวโดยจมบางส่วนได้ ยิ่งของเหลวมีความหนาแน่นมาก วัตถุจะยิ่งจมน้อย เมื่อคุณว่ายน้ำในทะเล ร่างกายของคุณจะลอยพำนน้ำมากกว่าในน้ำจืด

อีกตัวอย่างคือ ไฮโดรมิเตอร์ซึ่งใช้วัดความหนาแน่นของของเหลว ภาพประกอบ ค.16(ก) หลอดซึ่งมีขีดแบ่งสเกลจมลงในของเหลว จนกระทั่งน้ำหนักของเหลว ซึ่งถูกแทนที่หนักเท่ากับน้ำหนักของไฮโดรมิเตอร์เอง ไฮโดรมิเตอร์ลอยสูงกว่าในของเหลวที่มีความหนาแน่นสูงเป็นตำแหน่งเสถียรและเราอ่านค่าความหนาแน่นได้โดยตรงจากสเกลในก้านส่วนบน ภาพประกอบ ค.16(ข) แสดงไฮโดรมิเตอร์ชนิดที่ใช้ทั่วไปสำหรับวัดความหนาแน่นของกรดแบตเตอรี่หรือน้ำยากันแข็งตัว ด้านล่างของท่อใหญ่จมอยู่ในของเหลว กระเปาะถูกบีบเพื่อไล่อากาศออกแล้วปล่อย รูปร่างไฮโดรมิเตอร์นี้เหมือนกับที่หยอดยาขนาดยักษ์ ของเหลวลอยขึ้นไปในท่ออันนอกและไฮโดรมิเตอร์ลอยอยู่ในตัวอย่างของไหลนี้



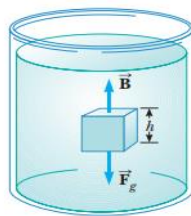
(ก) (ข)

ภาพประกอบ ค.16 (ก) แสดงไฮโดรมิเตอร์แบบง่าย (ข) การใช้ไฮโดรมิเตอร์เป็น
ตัวทดสอบกรดแบตเตอรี่หรือน้ำยากันแข็งตัว

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 381)

เมื่อวัตถุก้อนหนึ่งมีปริมาตร V อยู่ในของเหลวที่มีความหนาแน่น ρ โดยผิวบนของวัตถุอยู่ลึกจากผิวของของเหลว h ของเหลวจะออกแรงดันวัตถุนี้ในทุกทิศ และตั้งฉากกับผิววัตถุเสมอ

แต่ในแนวข้างด้านซ้าย-ขวา และด้านหน้า-หลัง แรงดันจากของเหลวที่กระทำต่อวัตถุจะเท่ากันจึงหักล้างกันหมดไป แต่ในแนวตั้งด้านบน-ล่าง ซึ่งมีระดับความลึกไม่เท่ากัน เพราะวัตถุมีความหนา



ภาพประกอบ ค.17 วัตถุในของเหลวก้อนหนึ่งมีปริมาตร V ในของเหลวความหนาแน่น

$$\rho$$

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 382)

แรงดันลงจากด้านบนนั้นจะน้อยกว่าแรงดันขึ้นจากด้านล่างเสมอ ส่งผลให้เกิดแรงที่ของเหลวจะกระทำต่อวัตถุที่อยู่ในของเหลว มีทิศขึ้นในแนวตั้งเสมอ เราเรียกแรงที่ของเหลวจะกระทำต่อวัตถุนี้ว่า แรงลอยตัว (Buoyancy: B) สามารถหาได้จาก

$$B = \rho g V \quad (\text{ค.18})$$

เมื่อ	B	คือ	แรงลอยตัว (นิวตัน)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
	g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตร/วินาทีกำลังสอง)
	V	คือ	ปริมาตรของวัตถุที่จมอยู่ในตัวของเหลว (ลูกบาศก์เมตร)

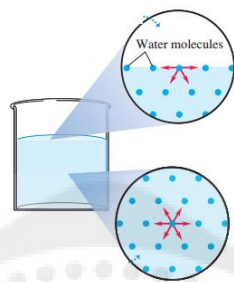
หมายเหตุ ถ้าวัตถุจมน้อยกว่า V ในที่นี้จะหมายถึง เฉพาะปริมาตรของวัตถุส่วนที่จมอยู่ในของเหลวเท่านั้น

6. ความตึงผิว

6.1 แรงตึงผิว

การศึกษาสมบัติของของเหลว นอกจากสมบัติเกี่ยวกับความดัน ซึ่งเป็นสมบัติที่เกิดในตัว ของของเหลว ทำให้ของเหลวมีความพยายามที่จะแผ่กระจายตัวออกไป ของเหลวนั้นยังมีความสมบัติอีกชนิดหนึ่ง เป็นสมบัติที่เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของของเหลว โดยเป็นความพยายามที่จะยืดผิวของของเหลวไว้ กล่าวคือ เราพบว่าที่ผิวของของเหลว จะมีแรงยึดเหนี่ยวซึ่งพยายามยืดผิว

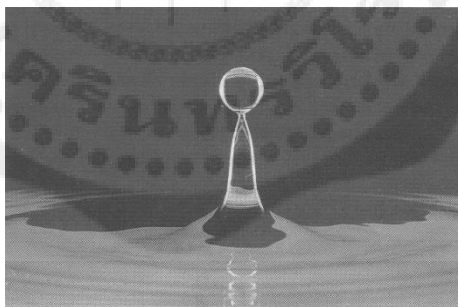
ของของเหลวไว้ไม่ให้ขาด แรงยึดเหนี่ยวนี้เรียกว่า **แรงตึงผิว** เราเรียกสมบัติที่ของเหลวพยายามยึดผิวของเหลวไว้ด้วยกันนี้ว่า **ความตึงผิว** (surface tension) คือ ผิวของเหลวทำตัวเหมือนกับเป็นแผ่นเยื่อภายใต้แรงตึง โมเลกุลของเหลวออกแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน แรงสุทธิต่อโมเลกุลซึ่งอยู่ภายในปริมาตรของเหลวเป็นศูนย์ แต่โมเลกุลที่ผิวถูกดึงดูดเข้าหากันของเหลว ดังภาพประกอบ ค.18



ภาพประกอบ ค.18 โมเลกุลของของเหลวถูกดึงดูดด้วยโมเลกุลของเหลวรอบ ๆ โมเลกุลที่ถูกดึงดูดเข้าหากันของเหลวซึ่งแนวโน้มที่จะลดพื้นที่ผิวของของเหลว

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 382)

ดังนั้นของเหลวพยายามทำตัวให้มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดเหมือนกับที่แผ่นเยื่อซึ่งถูกยืดพยายามทำ หยดฝนซึ่งตกอย่างเสรีเป็นรูปทรงกลม เพราะว่าทรงกลมมีพื้นที่ผิวน้อยกว่ารูปร่างอื่นที่มีปริมาตรเดียวกัน ดังภาพประกอบ ค.19 เป็นตัวอย่างที่สวยงามของการก่อรูปของหยดทรงกลม



ภาพประกอบ ค.19 การกระจายของหยดน้ำทำให้เกิดลำที่เรียกว่า Rayleigh jet

ที่มา : (ปิยพงษ์ สิริคอง. 2547: 435)

แรงตึงผิวของของเหลวนั้นจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของของเหลวเท่านั้น และแรงนี้จะมีทิศทางขนานกับผิวของเหลว และตั้งฉากกับแนวเส้นขอบที่ผิวของเหลวสัมผัสเสมอ เราอธิบายการเกิดขึ้นของแรงตึงผิวว่า เกิดขึ้นจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล คือระหว่างโมเลกุลของสารจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกัน

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลนี้จะแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน เรียกว่า แรงเชื่อมแน่น (cohesive force) และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลต่างชนิดกัน เรียกว่า แรงยึดติด (adhesive force)



ภาพประกอบ ค.20 แมลงเกาะอยู่บนผิวน้ำ

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 382)

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลนี้ ทำให้เกิดเป็นสมบัติในการรักษาผิวน้ำของของเหลวไว้ไม่ให้ขาด ตัวอย่างเช่น ภาพประกอบ ค.20 แมลงเกาะอยู่บนผิวน้ำได้ เพราะส่วนของขาสัมผัสผิวน้ำ เกิดแรงดึงผิวในแนวขนานกับผิวน้ำของของเหลวนั่นเอง ทำให้เคลื่อนไหวยบนผิวน้ำได้ และเมื่อวัตถุสัมผัสผิวของเหลว ก็จะทำให้เกิดแรงดึงระหว่างผิวของของเหลวกับวัตถุที่สัมผัส สำหรับของเหลวชนิดหนึ่งๆ ค่าอัตราส่วนของแรงดึงผิว F ต่อความยาวของแนวผิวของเหลวที่ขาด (ความยาวผิวของเหลวที่สัมผัสเส้นขอบวัตถุ) l จะมีค่าคงตัวและเรียกอัตราส่วนนี้ว่า ค่าความตึงผิว (surface tension; γ) ของเหลว สามารถหาได้จากสมการ (ค.19)

$$\gamma = \frac{F}{l} \text{ หน่วย } N / m \quad (\text{ค.19})$$

ข้อควรระวัง ความยาวที่ผิวของเหลวสัมผัสวัตถุ l ในกรณีของวงแหวนหรือห่วงวงกลม ความยาวผิวของของเหลวที่สัมผัสจะต้องมีทั้งด้านในและด้านนอก

ความตึงผิวเป็นแรงต่อความยาวหนึ่งหน่วย มีหน่วยเป็นนิวตัน/เมตร (N/m) ในระบบ SI และ ดายน์/เซนติเมตร (dyn/cm) เป็นหน่วยที่ใช้ทั่วไปมากกว่า

$$1 \text{ dyn} / cm = 10^{-3} N / m = 1 \text{ mN} / m$$

ค่าความตึงผิว (γ) ของของเหลวจะเป็นค่าเฉพาะของของเหลวแต่ละชนิด และจะมีค่าเปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิของของเหลวนั้นเปลี่ยนไป โดยที่เมื่ออุณหภูมิของของเหลวนั้นสูงขึ้น ค่าความตึงผิวของของเหลวนั้นจะลดลง

ของไหลซึ่งสัมผัสกับอากาศ	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความตึงผิว (dyn/cm หรือ mN/m)
เบนซีน	20	28.9
คาร์บอนเตตระคลอไรด์	20	26.8
เอทานอล	20	22.3
กลีเซอริน	20	63.1
ปรอท	20	465.0
น้ำมันมะกอก	20	32.0
น้ำสบู่	20	25.0
น้ำ	0	75.6
น้ำ	20	72.8
น้ำ	60	66.2
น้ำ	100	58.9
ออกซิเจน	-193	15.7
ฮีลอน	-247	5.15
ฮีเลียม	-269	0.12

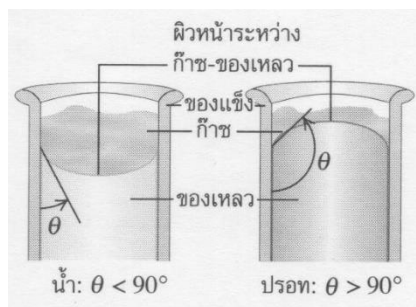
ตาราง ค.2 ค่าความตึงผิวของของไหลซึ่งสัมผัสกับอากาศจากการทดลอง

ที่มา : (ปิยพงษ์ สิริคอง. 2547: 436)

ตาราง ค.2 แสดงค่าความตึงผิวของของไหลชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง ค่าต่ำสุดของ γ เกิดในแก๊สเฉื่อยฮีลอนและฮีเลียมที่กลั่นตัวเป็นของเหลวที่แรงดึงดูดระหว่างอะตอมอ่อนมาก (ธาตุเหล่านี้ไม่ก่อรูปเป็นสารประกอบด้วยเหตุผลเดียวกันนี้)

ความตึงผิวของของเหลวชนิดหนึ่ง ๆ จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โมเลกุลของของเหลวเคลื่อนที่เร็วขึ้นอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลมีผลต่อการเคลื่อนที่น้อยลงและความตึงผิวลดลง

6.2 ปรากฏการณ์หลอดรูเล็ก



ภาพประกอบ ค.21 แรงตึงผิวต่อของเหลวในหลอดรูเล็ก

(ก) ของเหลวขึ้นสูงถ้ามุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา

(ข) ของเหลวถูกกดลงถ้ามุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา

ที่มา : (ปิยพงษ์ สิริคอง. 2547: 437)

เมื่อรอยต่อระหว่างผิวก๊าซ – ของเหลวเจอกับผิวของแข็ง เช่นผนังภาชนะ ภาพประกอบ ค.21 รอยต่อระหว่างก๊าซ – ของเหลวมักโค้งขึ้นหรือลงใกล้ผิวของแข็ง เราเรียกมุม θ ที่รอยต่อพบกับผิวของแข็งว่า มุมสัมผัส โดยผิวหน้าสัมผัสของของเหลวทำมุม θ กับผนังของหลอดตามความสัมพันธ์

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g R} \quad (\text{ค.20})$$

ซึ่งแสดงว่า “ความสูงของของเหลวในหลอดจะแปรผกผันกับรัศมีของหลอดแก้วคือหลอดแก้วยิ่งเล็ก ระดับของของเหลวในหลอดจะยิ่งสูง”

เมื่อโมเลกุลของเหลวดึงดูดกันน้อยกว่าที่ดึงดูดของแข็ง เช่นกรณีน้ำกับแก้ว ของเหลวจะทำให้ของแข็งเปียก หรือ ยึดติดกับผนังของแข็ง รอยต่อระหว่างแก๊สกับของเหลวโค้งขึ้นและ θ มีค่าน้อยกว่า 90 องศา ของเหลวจะไม่เปียกผิวถ้าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเหลว มีขนาดเล็กกว่า อย่างเช่นปรอทกับแก้ว รอยต่อระหว่างแก๊สกับของเหลวโค้งลงและ θ โตกว่า 90 องศา

ความตึงผิวทำให้ของเหลวขึ้นไปในหลอดแคบหรือทำให้ถูกกดลง ภาพประกอบ ค.21 เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การซึมตามรูเล็ก เมื่อมุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา ภาพประกอบ ค.21(ก) แรงตึงผิวทั้งหมดตามแนวสัมผัสกับผนังหลอดกระทำในทิศขึ้น ของเหลวไหลขึ้นจนกระทั่งถึงระดับความสูงสมดุล y ที่แรงตึงผิวสุทธิหักล้างกันพอดีกับน้ำหนักของเหลวที่เพิ่มเข้ามาในหลอด

เราเรียกผิวของเหลวโค้งนี้ว่า meniscus สำหรับของเหลวที่ไม่เปียกผิว เช่น โปรท ภาพประกอบ ค.21 (ข) มุมสัมผัสมีขนาดโตกว่า 90 องศา meniscus โค้งลงและผิวอยู่ต่ำ ลงไปเพราะถูกดึงดูดด้วยแรงตึงผิว

ปรากฏการณ์หลอดรูเล็กทำให้กระต่ายจับดูดกลืนน้ำ ทำให้ซี่ผึ้งหลอมละลายไหลขึ้นไปตามไส้เทียนไข และมีผลต่อปรากฏการณ์ในชีวิตประจำวันอย่างอื่นอีกหลายอย่าง เช่น เลือดถูกขับผ่านหลอดเลือดแดงและหลอดเลือดดำในร่างกาย แต่ปรากฏการณ์หลอดรูเล็กมีความสำคัญต่อการไหลผ่านหลอดเลือดที่เล็กที่สุดคือหลอดเลือดฝอย

ความดันลบปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความตึงผิว ปกติความเค้นในของเหลวเป็นความเค้นอัด แต่ในบางสถานการณ์ของเหลวสามารถรับความเค้นดึงได้ พิจารณาท่อทรงกระบอกซึ่งมีปลายเปิดด้านหนึ่งและมีลูกสูบเปียกให้เต็มท่อ โมเลกุลของเหลวเกาะติดกับทุกผิว ถ้าผิวสะอาดมากและของเหลวบริสุทธิ์ เมื่อเราดึงลูกสูบเราจะสังเกตเห็นความเค้นดึงและปริมาตรเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เรากำลังยืดของเหลว แรงยึดติดทำให้ของเหลวนั้นไม่หลุดจากภาชนะ

7. ความหนืด

สมบัติอีกชนิดหนึ่งของของเหลวเกิดจากการที่วัตถุเคลื่อนที่ผ่านในตัวกลางของของเหลวของเหลวจะออกแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุนั้น (คล้ายๆ กับกรณีเคลื่อนวัตถุผ่านผิวสัมผัส ผิวสัมผัสจะออกแรงต้านการเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งเรียกว่า แรงเสียดทาน) สมบัติของของเหลวในการต้านการเคลื่อนที่ผ่านในตัวกลางของเหลว เรียกว่า “ความหนืด” (viscosity) และเรียกแรงที่ของเหลวกระทำต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในของเหลวนั้นว่า แรงหนืด (viscous force)

ความหนืดคือความเสียดทานภายในของไหล แรงหนืดต้านการเคลื่อนที่ของส่วนหนึ่งของของไหลเทียบกับอีกส่วนหนึ่ง ความหนืดทำให้เราต้องใช้ความพยายามในน้ำนิ่ง แต่ก็ก็เป็นเหตุผลว่าทำไมการพายจึงมีผลด้วย ปรากฏการณ์ความหนืดเป็นสิ่งสำคัญในการไหลของของไหลในท่อ การไหลของเลือด การหล่อลื่นส่วนเครื่องยนต์ ฯลฯ

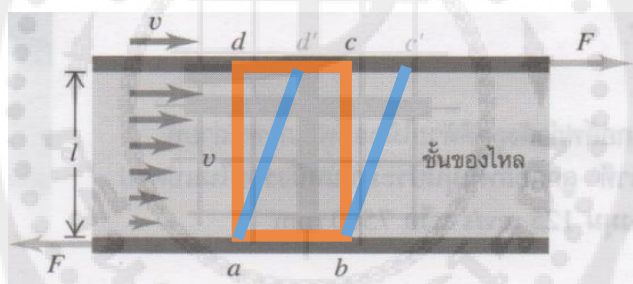


ภาพประกอบ ค.22 หินละลายเป็นตัวอย่างของของไหลหนืด

ความหนืดจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 389)

ตัวอย่างที่ง่ายที่สุดของการไหลแบบหนืดคือ การเคลื่อนที่ของของไหลระหว่างแผ่นขนานสองแผ่น ดังภาพประกอบ ค.23 แผ่นล่างอยู่กับที่และแผ่นบนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว $\vec{v}$ ของไหลที่สัมผัสกับผิวแต่ละผิวมีความเร็วเท่ากับผิวสัมผัสนั้น อัตราเร็วการไหลของชั้นระหว่างกลางเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอจากผิวหนึ่งไปยังอีกผิวหนึ่งตามที่แสดงให้เห็นด้วยลูกศร ดังนั้นชั้นของไหลไหลอย่างเรียบไปบนอีกชั้นหนึ่ง การไหลเป็นแบบลามินาร์



ภาพประกอบ ค.23 การไหลแบบลามินาร์ของของไหลหนืด แผ่นบนและแผ่นล่างของของไหล

ต่างมีพื้นที่ A ความหนืดคืออัตราส่วนของความเค้นเฉือนต่อความเครียดเฉือน

ที่มา : (ปิยพงษ์ สิริคอง. 2547: 446)

ส่วนของไหลที่เวลา $t=0$ มีรูปร่าง $abcd$ เมื่อเวลาผ่านไป $t=1$ ของไหลมีรูปร่าง $abc'd'$ ที่อีกครู่หนึ่งต่อมาและมีรูปร่างบิดเบือนมากขึ้นๆ ขณะที่มีการเคลื่อนที่อยู่นั้นคือของไหลอยู่ในสถานะที่ความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เราออกแรง F คงตัวต่อแผ่นบนไปทางขวาเพื่อคงการเคลื่อนที่ต่อไปและออกแรงขนาดเท่ากันต่อแผ่นล่างไปทางซ้ายเพื่อจับให้อยู่กับที่ ถ้า A เป็นพื้นที่ผิวของแต่ละแผ่น ดังนั้นความเค้นเฉือนที่กระทำต่อของไหล คือ F/A

เรานิยามความเครียดเฉือนเป็นอัตราส่วนการกระจัด dd' ต่อความยาว l ในของแข็ง
ความเครียดเฉือนแปรตรงกับความเค้นเฉือน แต่ในของไหลความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและไม่มีขอบเขตตามที่มีความเค้นทำอยู่ ความเค้นไม่ได้ขึ้นกับความเครียดเฉือนแต่

ขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเฉือน เราเรียกอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดว่า อัตราความเครียดด้วย ค่านี้เท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ dd' หารด้วย l หรืออัตราเร็ว v ของผิวที่เคลื่อนที่ นั่นคือ

อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉือน=อัตราความเครียด

เรานิยาม ความหนืด (η) ของไหลว่าเป็นอัตราส่วนของความเค้นเฉือนต่ออัตราความเครียด

$$\eta = \frac{\text{ความเค้นเฉือน}}{\text{อัตราความเครียด}} = \frac{F/A}{v/l} \quad (\text{ค.21})$$

จัดรูปสมการ (ค.21) ใหม่ จะได้

$$F = \eta A \frac{v}{l} \quad (\text{ค.22})$$

ของไหลที่มีความหนืดต่ำกว่าจะไหลได้ง่ายกว่า เช่น น้ำเปล่าไหลได้ง่ายกว่าหรือน้ำมันเครื่อง ความหนืดของของไหลทุกชนิดมีค่าแปรตามอุณหภูมิอย่างมาก โดยเพิ่มขึ้นสำหรับแก๊สและลดลงสำหรับของเหลวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เป้าหมายสำคัญในการออกแบบน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์คือ การลดการแปรตามอุณหภูมิของความหนืดให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

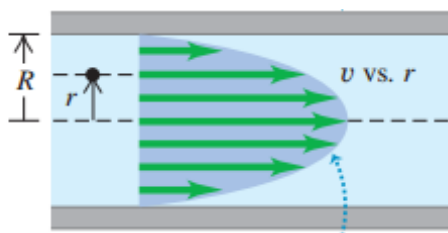
จากสมการ (ค.21) หน่วยของความหนืดคือหน่วยของแรงคูณระยะทางหารด้วยหน่วยของพื้นที่คูณอัตราเร็ว หน่วยในระบบ SI คือ

$$1 \text{ N} \cdot \text{m} / [\text{m}^2 \cdot (\text{m} / \text{s})] = 1 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2 = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

หน่วยที่ใช้กันสามัญเพียงหน่วยเดียวคือ cgs: $1 \text{ dyn} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$ หรือ **poise** ตามชื่อ นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส Jean Louis Marie Poiseuille (หน่วย centipoise และ micropoise ก็ใช้กันด้วย)

$$1 \text{ poise} = 1 \text{ dyn} \cdot \text{s} / \text{cm}^2 = 10^{-1} \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

เราเรียกของไหลที่มีความหนืด η ไม่ขึ้นกับอัตราเร็ว v ว่าของไหลนิวโตเนียน จากสมการ (ค.22) สำหรับของไหลแบบนี้แรง F แปรตรงกับอัตราเร็ว ของไหลแบบแวนดอยหรือที่มีอนุภาคกระจายอยู่มันมีพฤติกรรมความหนืดไม่เป็นแบบนิวโตเนียน เลือดมีเม็ดเลือดลอยอยู่ในของเหลว เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น เม็ดเลือดจะเปลี่ยนรูปตามทิศทางให้ช่วยในการไหลซึ่งทำให้ความหนืด η ลดลง ของไหลที่หล่อลื่นข้อต่อมนุษย์มีพฤติกรรมคล้ายกัน



ภาพประกอบ ค.24 ภาพลักษณะความเร็วสำหรับของไหลในท่อทรงกระบอก

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 389)

ภาพประกอบ ค.24 แสดงลักษณะอัตราการไหลสำหรับการไหลแบบราบเรียบของของไหลหนืดในท่อทรงกระบอกยาว อัตราเร็วมีค่าสูงสุดที่แกนและเป็นศูนย์ที่ผนังท่อ ลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายกับการไหลกันเป็นชั้น ๆ ของท่อซึ่งมีแกนร่วมกันโดยที่ท่อกลางเคลื่อนที่เร็วที่สุดและท่อนอกสุดอยู่นิ่ง เราใช้สมการ (ค.21) กับชั้นของไหลทรงกระบอกหาสมการอธิบายอัตราเร็วที่ระยะต่าง ๆ ได้ อัตราเร็วการไหล v ที่ระยะ r จากแกนท่อซึ่งมีรัศมี R คือ

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4\eta L} (R^2 - r^2) \quad (\text{ค.23})$$

p_1 และ p_2 คือความดันที่ปลายทั้งสองข้างของท่อยาว L อัตราเร็วที่จุดใด ๆ แปรตรงกับ ความลาดชันความดัน $(p_1 - p_2)/L$ หรือ dp/dx (การไหลมีทิศไปในทางที่ความดันลดลงเสมอ) เพื่อที่จะหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรผ่านท่อ เราพิจารณาวงแหวนซึ่งมีรัศมีภายใน r รัศมีภายนอก $r + dr$ และพื้นที่ตัดขวาง $dA = 2\pi r dr$ อัตราการไหลเชิงปริมาตรผ่านชั้นส่วนนี้คือ $v dA$ เราหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรทั้งหมดได้โดยการอินทิเกรตจาก $r = 0$ ถึง $r = R$ ผลที่ได้คือ

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi}{8} \left(\frac{R^4}{\eta} \right) \left(\frac{p_1 - p_2}{L} \right) \quad (\text{ค.24})$$

เราเรียกสมการ (ค.24) ว่า **สมการของ Poiseuille** ตาม Poiseuille ผู้คิดค้นสมการนี้ได้เป็นคนแรก มีความสำคัญต่อการออกแบบระบบท่อน้ำและเข็มฉีดยา ขนาดของเข็มมีความสำคัญต่ออัตราการไหลจากเข็มมากกว่าความดันมาก การเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางเข็มเป็น 2 เท่ามีผลเท่ากับการเพิ่มแรงถึง 16 เท่า ในทำนองเดียวกันการควบคุมการไหลในหลอดเลือดสามารถทำได้เป็นช่วงกว้างโดยการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงเล็กน้อย เป็นกลไกควบคุมทางอุณหภูมิจากในสัตว์เลือดอุ่น การแคบลงของหลอดเลือดเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้ความดันโลหิตเพิ่มสูงขึ้นได้ ซึ่งส่งผลให้กล้ามเนื้อหัวใจทำงานหนักขึ้น

7.1 กฎของสโตกส์ (Sir George Stokes)

ในกรณีที่วัตถุที่เคลื่อนในของเหลว เป็นรูปทรงกลม มีรัศมี R เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v แรงหนืดที่ของเหลวจะต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุรูปทรงกลมนั้นจะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$F = 6\pi\eta Rv \quad (\text{ค.25})$$

เมื่อ η คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของของเหลวชนิดนั้น

นอกจากนี้ ความหนืดของของเหลวจะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิของของเหลวนั้นสูงขึ้น

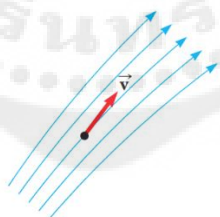
8 พลศาสตร์ของไหล

8.1 คุณสมบัติของไหลอุดมคติมี ดังนี้

- 1) เป็นการไหลโดยไม่หมุน คือ การไหลที่ไม่มีการไหลวนรอบจุดใด ๆ ในของไหล
- 2) เป็นการไหลที่ไม่มีแรงต้านเนื่องจากความหนืด คือ ไม่มีแรงต้านใด ๆ ภายในเนื้อของไหลมากระทำต่ออนุภาคของไหล
- 3) ไม่สามารถอัดได้ คือ ในทุก ๆ ส่วนของของไหลมีความหนาแน่นคงตัว

8.2 การไหลของของไหลอุดมคติ

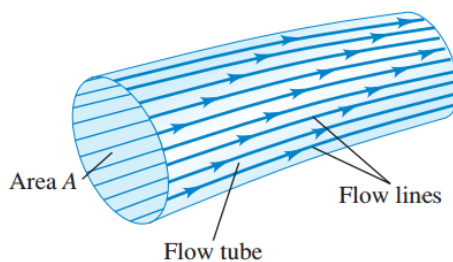
ในของไหลที่ไหลอย่างสม่ำเสมออนุภาคหนึ่ง ๆ ของของไหลจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางเดินเส้นหนึ่งเรียกว่า เส้นกระแส (streamline) โดยความเร็วของอนุภาคนั้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ มีทิศในแนวเส้นสัมผัส ณ ตำแหน่ง ภาพประกอบ ค.25 และเส้นกระแสของอนุภาคแต่ละเส้นจะไม่ตัดกัน ถ้าเส้นกระแสจำนวนหนึ่งอยู่เรียงกันเป็นมัด ภาพประกอบ ค.26 เรียกมัดของเส้นกระแสนี้ว่า หลอดของของไหล (tube of flow) หลอดการไหลนี้จึงเสมือนท่อที่มีของไหลไหลเข้าทางปลายข้างหนึ่งและไหลออกปลายอีกข้างหนึ่ง



ภาพประกอบ ค.25 แสดงภาพจำลองเส้นกระแสของอนุภาคในของไหล

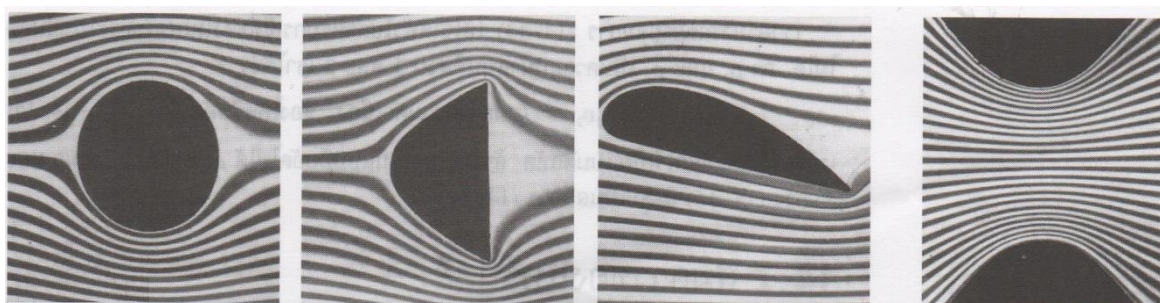
และความเร็วของอนุภาคที่มีทิศในแนวเส้นสัมผัสกับเส้น

ที่มา: (serway; & Jewett. 2008: 400)



ภาพประกอบ ค.26 ท่อการไหลล้อมรอบด้วยเส้นการไหล ในการไหลแบบสมำเสมอของไหลไม่
สามารถข้ามผนังของท่อการไหลได้

ที่มา: (Young; & Freedman. 2000: 400)

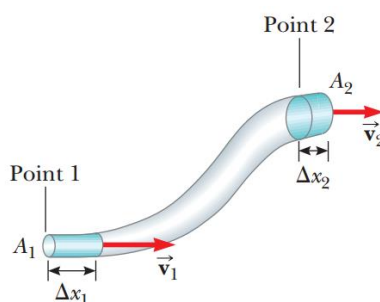


ภาพประกอบ ค.27 การไหลแบบราบเรียบรอบสิ่งกีดขวางรูปร่างต่าง ๆ
ที่มา: (Young; & Freedman. 2000: 400)

ภาพประกอบ ค.27 แสดงรูปแบบการไหลแบบราบเรียบรอบสิ่งกีดขวางและในช่องพื้นที่
ตัดขวางมีขนาดไม่คงที่ ภาพเหล่านี้ได้จากการฉีดสีย้อมในน้ำซึ่งกำลังไหลระหว่างแผ่นแก้วซึ่งวาง
ชิดติดกัน รูปแบบเหล่านี้เป็นตัวอย่างของการไหลแบบราบเรียบที่ชั้นของการไหลติดกันเลื่อนผ่าน
กันอย่างราบเรียบ และเป็นการไหลอย่างสมำเสมอ เมื่ออัตราการไหลสูงพอสมควรหรือเมื่อผิวขอบ
ทำให้ความเร็วเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน การไหลอาจกลายเป็นแบบปั่นป่วนได้ ที่เรียกว่า การ
ไหลแบบปั่นป่วน ในการไหลแบบนี้รูปแบบการไหลไม่คงตัวแต่เปลี่ยนไปอย่างต่อเนื่อง

8.3 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

สมการความต่อเนื่องเป็นสมการที่นิยมใช้ในศึกษาการไหลของของไหลภายในท่อ การ
ไหลของของไหลในท่อที่มีขนาดไม่สมำเสมอไหลจากจุดที่ 1 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A_1 ไปยังจุดที่ 2
พื้นที่หน้าตัด A_2 ดังภาพประกอบ ค.28



ภาพประกอบ ค.28 แสดงการไหลในท่อที่มีขนาดไม่สมำเสมอ

ที่มา: (Serway; & Jewett. 2008: 400)

จากภาพประกอบ ค.28 แสดงการไหลในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ เมื่อของไหลอุดมคติไหลอย่างสม่ำเสมอผ่านหลอดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน ปริมาตรที่ไหลผ่านพื้นที่ตัดขวาง A_1 ในเวลา Δt จะเท่ากับปริมาตรการไหลที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A_2 ในเวลา Δt ที่เท่ากัน มวลของของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่ A_1 คือ $\Delta m_1 = \rho A_1 v_1 \Delta t$ มวลของของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่ A_2 คือ $\Delta m_2 = \rho A_2 v_2 \Delta t$ ดังนั้น มวลที่ไหลผ่านแต่ละส่วนมีค่าเท่ากัน จะได้

$$\Delta m_1 = \Delta m_2 \quad (\text{ค.26})$$

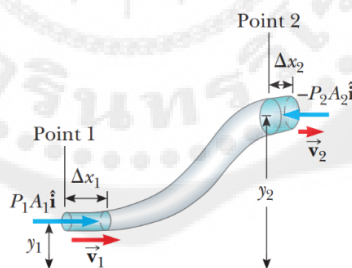
$$\rho A_1 v_1 \Delta t = \rho A_2 v_2 \Delta t \quad (\text{ค.27})$$

หรือ $A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (\text{ค.28})$

สมการ (ค.28) เรียกว่า สมการความต่อเนื่อง (continuity equation) สรุปได้ว่า ผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดกับอัตราเร็วของของไหลอุดมคติ ไม่ว่าจะอยู่ที่ตำแหน่งใดในท่อจะมีค่าคงตัว

8.4 สมการของแบร์นูลลี (Bernoulli's equation)

พิจารณาหลอดการไหลที่มีระดับต่างกัน โดยบริเวณแรกให้มีพื้นที่หน้าตัด A_1 อยู่สูงจากระดับอ้างอิง y_1 และมีความดันในของไหล P_1 ส่วนบริเวณที่ 2 มีพื้นที่หน้าตัด A_2 อยู่สูงจากระดับอ้างอิง y_2 และมีความดันในของไหล P_2 ภาพประกอบ 29 แสดงการพิจารณาของไหลที่ไหลผ่านท่อ



ภาพประกอบ ค.29 แสดงการพิจารณาของไหลที่ไหลผ่านท่อ

ที่มา: (serway; & Jewett. 2005: 402)

พิจารณาท่อบริเวณที่ 1 งานที่กระทำโดยแรง F_1 สามารถหาได้จากสมการ (ค.29)

$$W_1 = F_1 \Delta x_1 = P_1 (A_1 \Delta x_1) = P_1 V \quad (\text{ค.29})$$

พลังงานศักย์บริเวณที่ 1 คือ

$$E_{P_1} = mgy_1 \quad (\text{ค.30})$$

พลังงานจลน์บริเวณที่ 1 คือ

$$E_{K_1} = \frac{1}{2} m v_1^2 \quad (\text{ค.31})$$

พิจารณาท่อที่บริเวณที่ 2 งานที่กระทำโดยแรง F_2 (ทิศตรงข้าม) สามารถหาได้จากสมการ (ค.32)

$$W_2 = -F_2 \Delta x_2 = -P_2 (A_2 \Delta x_2) = -P_2 V \quad (\text{ค.32})$$

พลังงานศักย์บริเวณที่ 2 คือ

$$E_{P_2} = mgy_2 \quad (\text{ค.33})$$

พลังงานจลน์บริเวณที่ 2 คือ

$$E_{k_2} = \frac{1}{2} mv_2^2 \quad (\text{ค.34})$$

งานที่เกิดขึ้นจากแรงนั้น มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ จากการเคลื่อนที่ของน้ำจากบริเวณที่ 1 ไปยังบริเวณที่ 2 สามารถอธิบายได้ดังสมการ (ค.35)

$$(P_1 - P_2)V = \left(\frac{1}{2} mv_2^2 - \frac{1}{2} mv_1^2 \right) + (mgy_2 - mgy_1) \quad (\text{ค.35})$$

จาก $V = \frac{m}{\rho}$ แทนค่าในสมการ (ค.35) จะได้

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho gy_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho gy_2 \quad (\text{ค.36})$$

นั่นคือ $P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gy = \text{ค่าคงตัว}$

เมื่อนำความหนาแน่น (ρ) ซึ่งเป็นค่าคงที่มาหารตลอดสมการ (ค.36) จะได้

$$\frac{1}{2} v_1^2 + \frac{P_1}{\rho} + gy_1 = \frac{1}{2} v_2^2 + \frac{P_2}{\rho} + gy_2 \quad (\text{ค.37})$$

หมายเหตุ: การห้อย 1 และ 2 หมายถึงจุดที่แตกต่างกันในการไหล ซึ่งจุดที่ 1 เป็นต้นน้ำของจุดที่ 2

เมื่อ v คือ ความเร็วของของไหล (เมตร/วินาที)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตร/วินาทีกำลังสอง)

P คือ ความดัน (นิวตัน/ตารางเมตร)

y คือ ความสูงของระดับน้ำในแต่ละจุด เมื่อเทียบกับระดับอ้างอิง (เมตร)

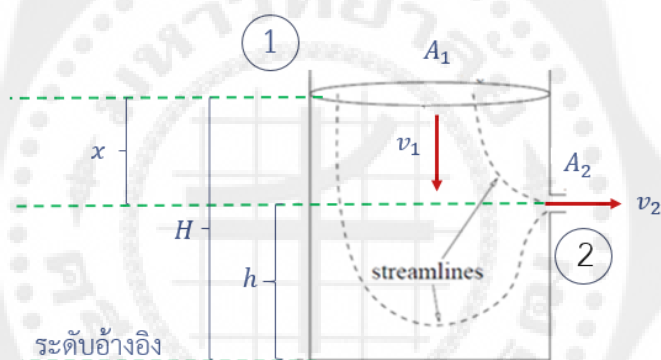
สมการ (ค.37) เรียกว่า สมการของแบร์นูลลี ซึ่งกล่าวว่าผลรวมของความดัน พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และพลังงานศักย์โน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ ภายในท่อที่ของไหลผ่านมีค่าคงตัว สมการนี้มีบทบาทมากในการแก้ปัญหาทางกลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น ซึ่งชื่อของสมการตั้งให้เป็นเกียรติยศแก่ แดเนียล แบร์นูลลี (Daniel Bernoulli) นักฟิสิกส์ชาวสวิส ผู้สร้างสมการแบร์นูลลีเป็นคนแรก



ภาพประกอบ ค.30 Daniel Bernoulli

ที่มา : (Groningen. 1700: Online)

8.5 การหาอัตราเร็วของของเหลวที่พุ่งออกจากรูขนาดเล็ก



ภาพประกอบ ค.31 การพิจารณาความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดในการทดลองแท่งกั้นน้ำของทอริเชลลี

จากภาพประกอบ ค.31 แสดงการพิจารณาความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดในการทดลองแท่งกั้นน้ำของทอริเชลลี กำหนดบริเวณที่ 1 คือผิวหน้าในแท่งกั้นน้ำ และบริเวณที่ 2 คือรูเปิด

กำหนดให้	A_1	คือ	พื้นที่หน้าตัดของแท่งกั้นน้ำ (ตารางเมตร)
	A_2	คือ	พื้นที่หน้าตัดของรูเปิด (ตารางเมตร)
	v_1	คือ	ความเร็วของน้ำในแท่งกั้นน้ำทอริเชลลี (เมตร/วินาที)
	v_2	คือ	ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิด (เมตร/วินาที)
	H	คือ	ความสูงของระดับน้ำเทียบกับพื้น (เมตร)
	h	คือ	ความสูงของระดับรูเปิดเทียบกับพื้น (เมตร)
	x	คือ	ระยะห่างระหว่างระดับน้ำถึงรูเปิด (เมตร)

จากสมการ (ค.37) สมการของแบร์นูลลี เมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในภาพประกอบ ค.31 จะได้

$$\frac{1}{2}v_1^2 + \frac{P_1}{\rho} + gH = \frac{1}{2}v_2^2 + \frac{P_2}{\rho} + gh \quad (\text{ค.38})$$

จากสมการ (ค.28) สมการความต่อเนื่อง เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่เพื่อหาค่า v_1 จะได้

$$v_1 = \left(\frac{A_2 v_2}{A_1} \right) \quad (\text{ค.39})$$

แทนค่า v_1 จากสมการ (ค.39) ในสมการ (ค.38) จะได้

$$\frac{1}{2} \left(\frac{A_2 v_2}{A_1} \right)^2 + \frac{P_1}{\rho} + gH = \frac{1}{2}v_2^2 + \frac{P_2}{\rho} + gh \quad (\text{ค.40})$$

ค่าความดัน ณ จุดที่ 1 และจุดที่ 2 คือความดันบรรยากาศ ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (ค.40) ใหม่ได้ดังสมการ (ค.41)

$$\frac{1}{2} \left(\frac{A_2 v_2}{A_1} \right)^2 + gH = \frac{1}{2}v_2^2 + gh \quad (\text{ค.41})$$

จากสมการ (ค.41) จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$gH - gh = \frac{1}{2}v_2^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{A_2 v_2}{A_1} \right)^2 \quad (\text{ค.42})$$

ดึงตัวร่วมทั้งสองข้างของสมการ (ค.42)

$$g(H - h) = \frac{1}{2}v_2^2 \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \quad (\text{ค.43})$$

จะเห็นว่าในการทดลองแท่งก้นน้ำของทอริเชลลี พื้นที่หน้าบริเวณที่ 1 (A_1) มีค่ามากกว่า พื้นที่หน้าบริเวณที่ 2 (A_2) มาก ๆ ส่งผลให้กำลังสองของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ 2 และพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ 1 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์

ดังนั้นจึงเขียนสมการ (ค.43) ได้ใหม่เป็น

$$g(H - h) = \frac{1}{2}v_2^2 \quad (\text{ค.44})$$

จัดรูปสมการ (ค.44) เพื่อหาความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิด จะได้ดังสมการ (ค.45)

$$v_2 = \sqrt{2g(H - h)} \quad (\text{ค.45})$$

สมการ (ค.45) เรียกว่า “สมการของทอริเชลลี”

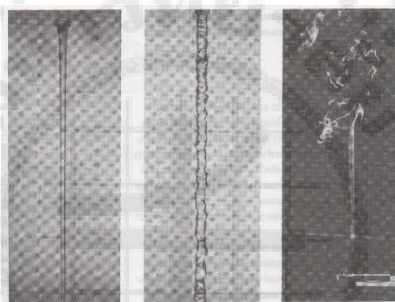


ภาพประกอบ ค.32 อีแวนเกลิสตา ทอริริเชลลี

ที่มา : (Lorenzo Lippi .1647 :Online)

9. ความอลวน

เมื่ออัตราเร็วของไหลเกินค่าวิกฤติค่าหนึ่ง การไหลจะไม่เป็นแบบราบเรียบอีกต่อไป รูปแบบการไหลจะเป็นแบบไม่สม่ำเสมอและซับซ้อนอย่างสุดๆ ที่เปลี่ยนตามเวลาอย่างต่อเนื่อง เราเรียกการไหลไม่สม่ำเสมอและยุ่งเหยิงนี้ว่า ความอลวน



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบ ค.33 (ก) การไหลแบบลามินาร์ของน้ำ

(ข) การไหลแบบอลวนของน้ำ

(ค) การไหลของควันตอนแรกเป็นแบบลามินาร์ แล้ว

ต่อมาเป็นแบบอลวน

ที่มา : (ปิยพงษ์ สิริคอง. 2547: 444)

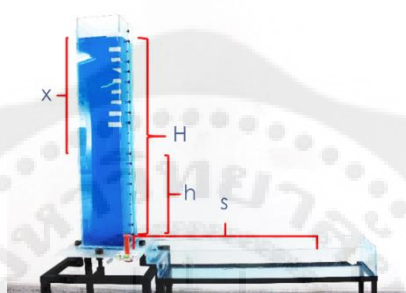
ภาพประกอบ ค.33 แสดงความแตกต่างระหว่างการไหลแบบลามินาร์และการไหลแบบอลวน ซึ่งกระแสน้ำและควันที่ลอยขึ้น ทำให้สมการของแบร์นูลลีใช้ไม่ได้กับการไหลแบบอลวน เพราะเป็นการไหลไม่คงตัว

การเปลี่ยนการไหลจากลามินาร์เป็นแบบอลวนมักเป็นแบบฉับพลัน รูปแบบการไหลซึ่งเสถียรที่อัตราเร็วต่ำกลายเป็นแบบไม่เสถียรอย่างฉับพลันเมื่ออัตราเร็วถึงค่าวิกฤติ นี่อาจเกิดจากความขรุขระภายในผนังท่อ ความแปรปรวนของความหนาแน่นของไหล และปัจจัยอื่นอีกมากที่อัตราไหลต่ำการรบกวนนี้ถูกทำให้เสื่อมลง รูปแบบการไหลเป็นแบบเสถียรและมีแนวโน้มคงลักษณะแบบลามินาร์ทั้งหมด การไหลของเลือดในหลอดเลือดคนโดยปกติเป็นแบบลามินาร์ แต่

การรบกวนเล็กน้อย เช่น พยาธิหัวใจ สามารถทำให้การไหลเป็นแบบอลวนได้ การไหลแบบอลวนมีเสียงดัง ดังนั้น การฟังการไหลของเลือดด้วยเครื่องฟังของแพทย์จึงเป็นเครื่องมือวินิจฉัยโรคที่สำคัญ

การทดลองแท่งก้น้ำของทอริเชลลี

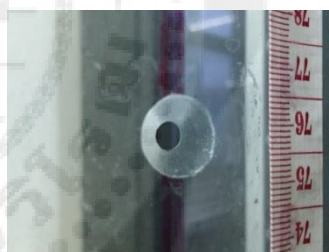
ในการทดลองแท่งก้น้ำของทอริเชลลี ผู้ทำการวิจัยได้แบ่งการทดลองแท่งก้น้ำของทอริเชลลีออกเป็น 2 ตอน ตามประเภทของรูเปิด คือรูเปิดประเภทขอบกึ่งคมและขอบคม



ภาพประกอบ ค.34 การทดลองแท่งก้น้ำของทอริเชลลี



(ก)



(ข)

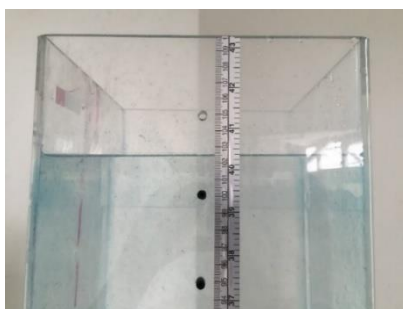
ภาพประกอบ ค.35 ชนิดของรูเปิด (ก) ขอบกึ่งคมและ (ข) ขอบคม โดยการทดลองทั้ง 2 ตอนมีการขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ใช้ที่วัดระดับน้ำตั้งชุดทดลองให้อยู่ในแนวตั้ง ก่อนที่จะเติมน้ำในแท่งก้น้ำ



ภาพประกอบ ค.36 แสดงการใช้ระดับน้ำตั้งชุดทดลองให้อยู่ในแนวตั้ง

2. ใส่ น้ำในแท่งก้น้ำของชุดทดลองให้เกินระยะ 100 เซนติเมตร รอให้ระดับน้ำนิ่ง



ภาพประกอบ ค.37 แสดงระดับน้ำนิ่งที่ระยะเกิน 100 เซนติเมตร

3. เปิดจุกที่ต้องการปล่อยน้ำ



ภาพประกอบ ค.38 แสดงการเปิดรูที่ระดับรูเปิด 5 เซนติเมตร

4. วัดระยะทางการตกของน้ำ เมื่อระดับน้ำถึงระยะต่าง ๆ ทุก 5 เซนติเมตร



ภาพประกอบ ค.39 แสดงการวัดระยะตกของน้ำ

5. บันทึกผลในตารางผลบันทึกการทดลอง ซึ่งแต่ละรูเปิดที่ทำการปล่อยน้ำ ทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง

ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ (science process skills)

ทักษะกระบวนการ หมายถึง ความสามารถและความชำนาญในการคิด เพื่อค้นหาความรู้ และการแก้ไขปัญหา โดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เป็นทักษะที่สำคัญที่แสดงถึงการมีกระบวนการคิด อย่างมีเหตุมีผลตามกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ทำให้ผู้เรียน และผู้ปฏิบัติเกิดความเข้าใจในเนื้อหาทางวิทยาศาสตร์ สามารถเรียนรู้ และพัฒนาตนเองไปสู่กระบวนการคิดที่ซับซ้อน (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2555: ออนไลน์)

ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ เป็นทักษะแสวงหาความรู้ และแนวทางสำหรับการแก้ไขปัญหา เป็นแนวทางที่พัฒนาขึ้นตามหลักสูตร Science A Process Approach (SAPA) ของสมาคมอเมริกันเพื่อความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ (The American association for the advancement of science) ประกอบไปด้วยทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ 13 ทักษะ แบ่งเป็น 2 ระดับ คือ

1. ระดับทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ขั้นพื้นฐาน 8 ทักษะ เป็นทักษะเพื่อการแสวงหาความรู้ทั่วไป ประกอบไปด้วย

ทักษะที่ 1 การสังเกต (observing) หมายถึง การใช้ประสาทสัมผัสของร่างกายอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง ได้แก่ หู ตา จมูก ลิ้น กายสัมผัส เข้าสัมผัสกับวัตถุหรือเหตุการณ์ เพื่อให้ทราบ และรับรู้ข้อมูล รายละเอียดของสิ่งเหล่านั้น โดยปราศจากความคิดเห็นส่วนตัว ข้อมูลเหล่านี้จะประกอบด้วย ข้อมูลเชิงคุณภาพ เชิงปริมาณ และรายละเอียดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการสังเกต

พฤติกรรมที่แสดงการเกิดทักษะการสังเกต เช่น

- 1) สามารถแสดงหรือบรรยายคุณลักษณะของวัตถุได้ จากการใช้ประสาทสัมผัสอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง
- 2) สามารถบรรยายคุณสมบัติเชิงปริมาณและคุณภาพของวัตถุได้
- 3) สามารถบรรยายพฤติการณ์การเปลี่ยนแปลงของวัตถุได้

ทักษะที่ 2 การวัด (measurement) หมายถึง การใช้เครื่องมือสำหรับการวัดข้อมูลในเชิงปริมาณของสิ่งต่าง ๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลเป็นตัวเลขในหน่วยการวัดที่ถูกต้อง แม่นยำได้ ทั้งนี้ การใช้เครื่องมือจำเป็นต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสิ่งที่ต้องการวัด รวมถึงเข้าใจวิธีการวัด และแสดงขั้นตอนการวัดได้อย่างถูกต้อง

พฤติกรรมที่แสดงการเกิดทักษะการวัด เช่น

- 1) สามารถเลือกใช้เครื่องมือได้เหมาะสมกับสิ่งที่วัดได้
- 2) สามารถบอกเหตุผลในการเลือกเครื่องมือวัดได้
- 3) สามารถบอกวิธีการ ขั้นตอน และวิธีใช้เครื่องมือได้อย่างถูกต้อง
- 4) สามารถทำการวัด รวมถึงระบุหน่วยของตัวเลขได้อย่างถูกต้อง

ทักษะที่ 3 การคำนวณ (using numbers) หมายถึง การนับจำนวนของวัตถุ และการนำตัวเลขที่ได้จากนับ และตัวเลขจากการวัดมาคำนวณด้วยสูตรคณิตศาสตร์ เช่น การบวก การลบ การคูณ การหาร เป็นต้น โดยการเกิดทักษะการคำนวณจะแสดงออกจากการนับที่ถูกต้อง ส่วนการคำนวณจะแสดงออกจากการเลือกสูตรวิทยาศาสตร์ การแสดงวิธีคำนวณ และการคำนวณที่ถูกต้อง แม่นยำ

พฤติกรรมที่แสดงการเกิดทักษะการคำนวณ เช่น

- 1) สามารถนับจำนวนของวัตถุได้ถูกต้อง
- 2) สามารถบอกวิธีคำนวณ แสดงวิธีคำนวณ และคิดคำนวณได้ถูกต้อง

ทักษะที่ 4 การจำแนกประเภท (classifying) หมายถึง การเรียงลำดับ และการแบ่งกลุ่มวัตถุหรือรายละเอียดข้อมูลด้วยเกณฑ์ความแตกต่างหรือความสัมพันธ์ใด ๆ อย่างใดอย่างหนึ่ง

พฤติกรรมที่แสดงการเกิดทักษะการจำแนกประเภท เช่น

- 1) สามารถเรียงลำดับ และแบ่งกลุ่มของวัตถุ โดยใช้เกณฑ์ใดได้อย่างถูกต้อง
- 2) สามารถอธิบายเกณฑ์ในเรียงลำดับหรือแบ่งกลุ่มได้

ทักษะที่ 5 การหาความสัมพันธ์ระหว่างสเปซกับสเปส และสเปซกับเวลา (using space/Time relationships) สเปซของวัตถุ หมายถึง ที่ว่างที่วัตถุนั้นครองอยู่ ซึ่งอาจมีรูปร่างเหมือนกันหรือแตกต่างกับวัตถุนั้น โดยทั่วไปแบ่งเป็น 3 มิติ คือ ความกว้าง ความยาว และความสูง ความสัมพันธ์ระหว่างสเปซกับสเปสของวัตถุ ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่าง 3 มิติ กับ 2 มิติ ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่อยู่ของวัตถุหนึ่งกับวัตถุหนึ่ง ความสัมพันธ์ระหว่างสเปซของวัตถุกับเวลา ได้แก่ ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวัตถุกับช่วงเวลา หรือ ความสัมพันธ์ของสเปซของวัตถุที่เปลี่ยนไปกับช่วงเวลา

พฤติกรรมที่แสดงการเกิดทักษะการหาความสัมพันธ์ระหว่างสเปซกับสเปสและสเปซกับเวลา เช่น

1. สามารถอธิบายลักษณะของวัตถุ 2 มิติ และวัตถุ 3 มิติ ได้
2. สามารถวาดรูป 2 มิติ จากวัตถุหรือรูป 3 มิติ ที่กำหนดให้ได้
- 3) สามารถอธิบายรูปทรงทางเรขาคณิตของวัตถุได้
- 4) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุ 2 มิติ กับ 3 มิติได้ เช่น ตำแหน่งหรือทิศของวัตถุ และตำแหน่งหรือทิศของวัตถุต่ออีกวัตถุ
- 5) สามารถบอกความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวัตถุกับเวลาได้
- 6) สามารถบอกความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาด ปริมาณของวัตถุกับเวลาได้

ทักษะที่ 6 การจัดกระทำ และสื่อความหมายข้อมูล (Communication) หมายถึง การนำข้อมูลที่ได้จากการสังเกต และการวัด มาจัดกระทำให้มีความหมาย โดยการหาความถี่ การเรียงลำดับ การจัดกลุ่ม การคำนวณค่า เพื่อให้ผู้อื่นเข้าใจความหมายได้ดีขึ้น ผ่านการเสนอในรูปแบบของตาราง แผนภูมิ วงจร เขียนหรือบรรยาย เป็นต้น

พฤติกรรมที่แสดงการเกิดทักษะการจัดกระทำและสื่อความหมายข้อมูล เช่น

- 1) สามารถเลือกรูปแบบ และอธิบายการเลือกรูปแบบในการเสนอข้อมูลที่เหมาะสมได้

- 2) สามารถออกแบบ และประยุกต์การเสนอข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่เข้าใจได้ง่าย
- 3) สามารถเปลี่ยนแปลง ปรับปรุงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่เข้าใจได้ง่าย
- 4) สามารถบรรยายลักษณะของวัตถุด้วยข้อความที่เหมาะสม กระชับ และสื่อความหมายให้ผู้อื่นเข้าใจได้ง่าย

ทักษะที่ 7 การลงความเห็นจากข้อมูล (inferring) หมายถึง การเพิ่มความคิดเห็นของตนต่อข้อมูลที่ได้จากการสังเกตอย่างมีเหตุผลจากพื้นฐานความรู้หรือประสบการณ์ที่มี

พฤติกรรมที่แสดงการเกิดทักษะการลงความเห็นข้อมูล เช่น

- 1) สามารถอธิบายหรือสรุปจากประเด็นของการเพิ่มความคิดเห็นของตนต่อข้อมูลที่ได้มา

ทักษะที่ 8 การพยากรณ์ (predicting) หมายถึง การทำนายหรือการคาดคะเนคำตอบโดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการสังเกตหรือการทำซ้ำ ผ่านกระบวนการแปรความหมายของข้อมูลจากสัมพันธ์ภายใต้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์

พฤติกรรมที่แสดงการเกิดทักษะการพยากรณ์ เช่น

- 1) สามารถทำนายผลที่อาจจะเกิดขึ้นจากข้อมูลบนพื้นฐานหลักการ กฎ หรือทฤษฎีที่มีอยู่ทั้งภายในขอบเขตของข้อมูล และภายนอกขอบเขตของข้อมูลในเชิงปริมาณได้
- 2) ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ขั้นบูรณาการ 5 ทักษะ เป็นทักษะกระบวนการขั้นสูงที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เพื่อแสวงหาความรู้ โดยใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ขั้นพื้นฐาน ประกอบด้วย

ทักษะที่ 9 การตั้งสมมติฐาน (formulating hypotheses) หมายถึง การตั้งคำถามหรือคิดคำตอบล่วงหน้าก่อนการทดลองเพื่ออธิบายหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ว่ามีความสัมพันธ์อย่างไร โดยสมมติฐานสร้างขึ้นจะอาศัยการสังเกต ความรู้ และประสบการณ์ภายใต้หลักการ กฎ หรือทฤษฎีที่สามารถอธิบายคำตอบได้

พฤติกรรมที่แสดงการเกิดทักษะการตั้งสมมติฐาน เช่น

- 1) สามารถตั้งคำถามหรือคิดหาคำตอบล่วงหน้าก่อนการทดลองได้
- 2) สามารถตั้งคำถามหรือคิดหาคำตอบล่วงหน้าจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ได้

ทักษะที่ 10 การกำหนดนิยามเชิงปฏิบัติการ (defining operationally) หมายถึง การกำหนด และอธิบายความหมาย และขอบเขตของคำต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาหรือการทดลองเพื่อให้เกิดความเข้าใจตรงกัน

พฤติกรรมที่แสดงการเกิดทักษะการกำหนดนิยามเชิงปฏิบัติการ เช่น

1) สามารถอธิบายความหมาย และระบุขอบเขตของคำหรือตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การศึกษา และการทดลองได้

ทักษะที่ 11 การกำหนด และควบคุมตัวแปร (identifying and controlling variables) หมายถึง การบ่งชี้ และกำหนดลักษณะตัวแปรใด ๆ ให้เป็นเป็นตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น และ ตัวแปรใด ๆ ให้เป็นตัวแปรตาม และตัวแปรใด ๆ ให้เป็นตัวแปรควบคุม

ตัวแปรต้น คือ สิ่งที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดผลหรือสิ่งที่ต้องการทดลองเพื่อให้ทราบว่าเป็น สาเหตุของผลที่เกิดขึ้นหรือไม่

ตัวแปรตาม คือ ผลที่เกิดจากการกระทำของตัวแปรต้นในการทดลอง

ตัวแปรควบคุม คือ ปัจจัยอื่น ๆ นอกเหนือจากตัวแปรต้นที่อาจมีผลต่อการทดลองที่ต้อง ควบคุมให้เหมือนกันหรือคงที่ขณะการทดลอง

พฤติกรรมที่แสดงการเกิดทักษะการกำหนดและการควบคุมตัวแปร เช่น

1. สามารถกำหนด และอธิบายตัวแปรต้น ตัวแปรตาม และตัวแปรควบคุมในการทดลอง ได้

ทักษะที่ 12 การทดลอง (Experimenting) หมายถึง กระบวนการปฏิบัติ และทำซ้ำใน ขั้นตอนเพื่อหาคำตอบจากสมมติฐาน แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. การออกแบบการทดลอง หมายถึง การวางแผนการทดลองก่อนการทดลองจริง ๆ เพื่อ กำหนดวิธีการ และขั้นตอนการทดลองที่สามารถดำเนินการได้จริง รวมถึงวิธีการแก้ไขปัญหา อุปสรรคที่อาจเกิดขึ้นขณะทำการทดลองเพื่อให้การทดลองสามารถดำเนินการให้สำเร็จลุล่วง ด้วยดี

2. การปฏิบัติการทดลอง หมายถึง การปฏิบัติการทดลองจริง

3. การบันทึกผลการทดลอง หมายถึง การจดบันทึกข้อมูลที่ได้จากการทดลองซึ่งอาจเป็น ผลจากการสังเกต การวัดและอื่น ๆ

พฤติกรรมที่แสดงการเกิดทักษะการทดลอง เช่น

- 1) สามารถออกแบบการทดลอง และกำหนดวิธี ขั้นตอนการทดลองได้ถูกต้อง และ เหมาะสมได้
- 2) สามารถระบุ และเลือกใช้อุปกรณ์ในการทดลองอย่างเหมาะสม
- 3) สามารถปฏิบัติการทดลองตามขั้นตอนได้อย่างถูกต้อง
- 4) สามารถบันทึกผลการทดลองได้อย่างถูกต้อง

ทักษะที่ 13 การตีความหมายข้อมูล และการลงข้อสรุป (interpreting data and conclusion) หมายถึง การแปลความหมายหรือการบรรยายลักษณะและสมบัติของข้อมูลที่มีอยู่

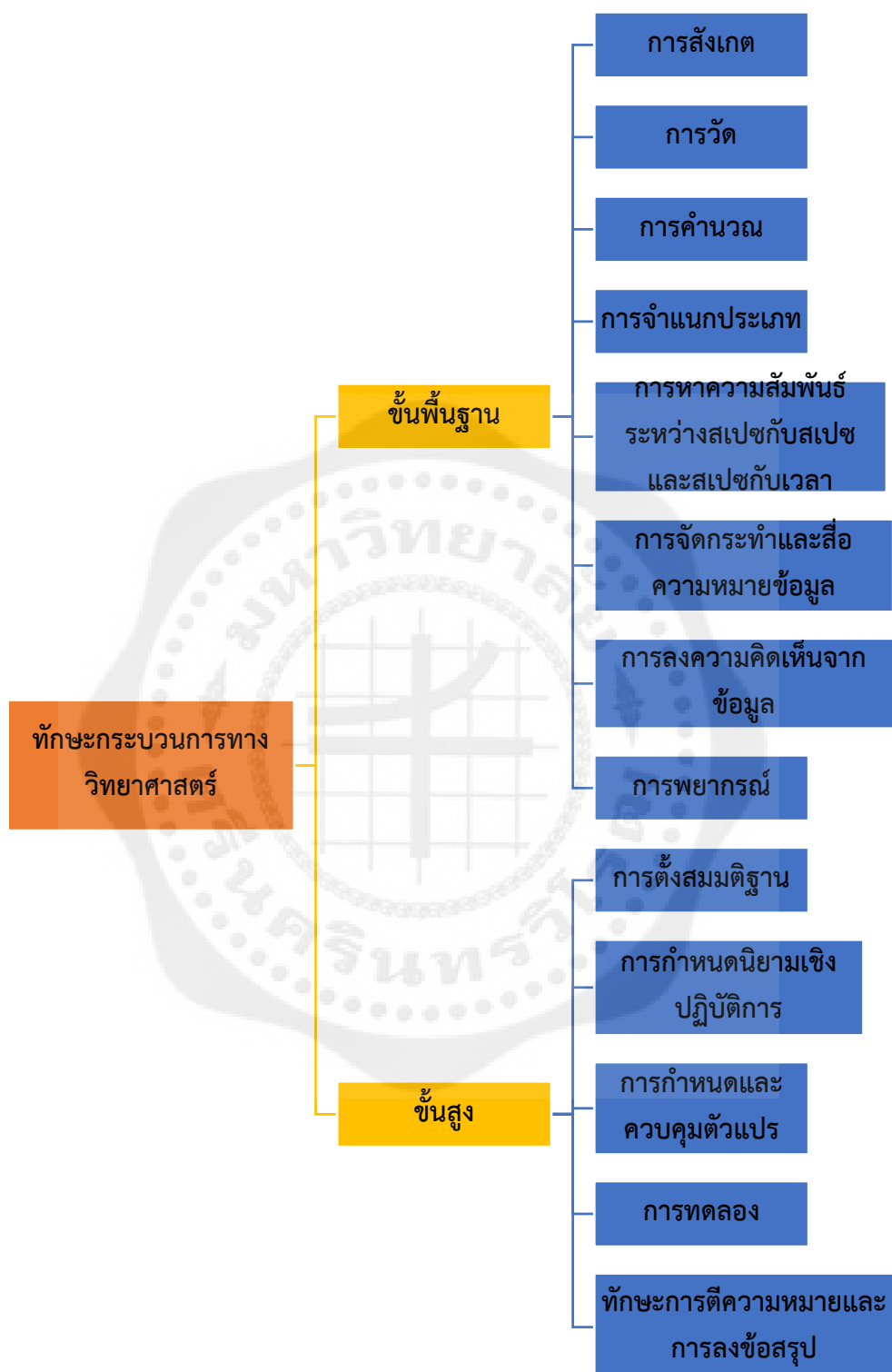
การตีความหมายข้อมูลในบางครั้งอาจต้องใช้ทักษะอื่น ๆ เช่น ทักษะการสังเกต ทักษะการคำนวณ การลงข้อมูล หมายถึง การวิเคราะห์ และการสรุปผลความสัมพันธ์ของข้อมูล สรุปประเด็นสำคัญของข้อมูลที่ได้จากการทดลองหรือศึกษา

พฤติกรรมที่แสดงการเกิดทักษะการตีความหมายข้อมูลและการลงข้อมูล คือ

- 1) สามารถในการวิเคราะห์ และสรุปประเด็นสำคัญ รวมถึงการแปลความหมายหรือบรรยายลักษณะของข้อมูล
- 2) สามารถบอกความสัมพันธ์ของข้อมูลได้



ผังมโนทัศน์ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์

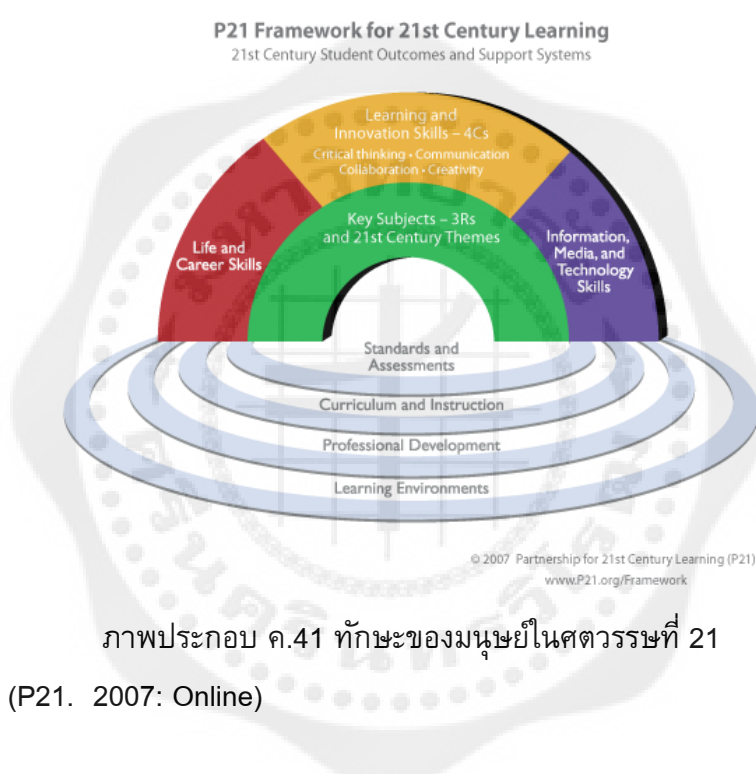


ภาพประกอบ ค.40 แสดงผังมโนทัศน์ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ 13 ทักษะ

ทักษะของคนในศตวรรษที่ 21

การศึกษาในศตวรรษที่ 21 ต้องเตรียมคนออกไปเป็นคนที่ใช้ความรู้ (knowledge worker) เป็นคนที่พร้อมเรียนรู้ (learning person) ไม่ว่าจะประกอบสัมมาชีพใด มนุษย์ในศตวรรษที่ 21 ต้องเป็นคนที่พร้อมเรียนรู้ และเป็นงานที่ใช้ความรู้ แม้จะเป็นชานาหรือเกษตรกรก็ต้องเป็นคนที่พร้อมเรียนรู้ และเป็นงานที่ใช้ความรู้ ดังนั้น ทักษะที่สำคัญที่สุดของศตวรรษที่ 21 จึงเป็นทักษะของการเรียนรู้ (learning skills)

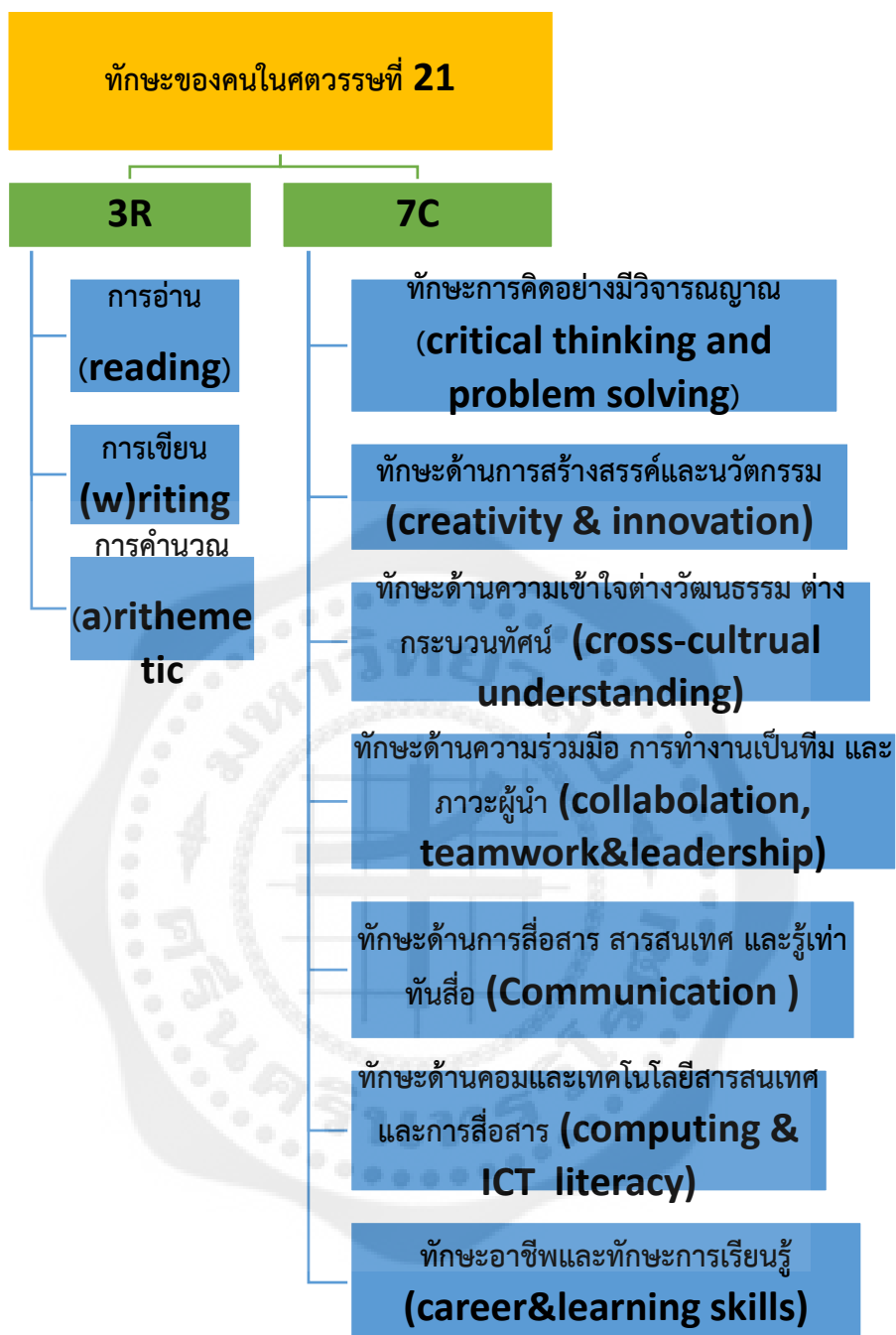
การศึกษาในศตวรรษที่ 21 จำต้องเป็นเช่นนี้เพราะต้องเตรียมคนไปเผชิญการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว รุนแรง พลิกผัน และคาดไม่ถึง คนยุคใหม่จึงต้องมีทักษะสูงในการเรียนรู้และปรับตัว



ภาพประกอบ ค.41 ทักษะของมนุษย์ในศตวรรษที่ 21

ที่มา : (P21. 2007: Online)

ทักษะของคนในศตวรรษที่ 21 ที่คนทุกคนต้องเรียนรู้ตั้งแต่อนุบาลไปจนถึงมหาวิทยาลัย และตลอดชีวิต คือ 3R x 7C ดังภาพประกอบ ค.41 แสดงผังมโนทัศน์ทักษะของมนุษย์ในศตวรรษที่ 21 (วิจารณ์ พานิช. 2555:18-58)



ภาพประกอบ ค.42 แสดงผังมโนทัศน์ทักษะของคนในศตวรรษที่ 21

การจัดการเรียนรู้แบบโดยใช้ปัญหาเป็นฐาน (Problem based learning: PBL)

แนวคิดการจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐาน (Problem based learning : PBL) (ภัทราวดี มากมี. 2554:7-14) มีรากฐานมาจากความคิดของ จอห์น ดิวอี้ มีการพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกโดย คณะวิทยาศาสตร์สุขภาพ (Faculty of Health Science) ของมหาวิทยาลัย Mc Master ของประเทศแคนาดา เพื่อการเตรียมตัวสอบให้กับนักศึกษาแพทย์ฝึกหัด วิธีการนี้ได้กลายเป็นรูปแบบ (Model) ที่มหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกาไปเป็นแบบอย่าง ต่อมามหาวิทยาลัย Mc Master ได้พัฒนาหลักสูตรแพทย์ที่ใช้ PBL ในการสอนเป็นครั้งแรก ทำให้มหาวิทยาลัยนี้เป็นที่ยอมรับและรู้จักกันทั่วโลกว่า เป็นผู้นำทางการจัดการเรียนรู้แบบ PBL มหาวิทยาลัยชั้นนำในสหรัฐอเมริกาได้นำรูปแบบการจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐานมาใช้ในการสอนหลายๆ แห่ง และเป็นที่ยอมรับมากขึ้น และขยายออกไปสู่การสอนในสาขาอื่น ๆ เช่น วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ ภาษาศาสตร์ สังคมศาสตร์ พฤติกรรมศาสตร์ เป็นต้น

สำหรับในประเทศไทย การเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐานเริ่มใช้ครั้งแรกในหลักสูตร แพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2531 และประยุกต์ใช้ในหลักสูตรสาธารณสุขศาสตรพยาบาลศาสตร์ ทั้งนี้การเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐาน เป็นวิธีการเรียนการสอนรูปแบบหนึ่ง ที่นำมาปรับใช้กับการศึกษาหลายระดับ

Gallagher (1997: 332-362) ได้ให้ความหมายว่าการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐาน เป็นการเรียนรู้ที่ผู้เรียนต้องเรียนรู้จากการเรียน โดยผู้เรียนจะทำงานร่วมกันเป็นกลุ่มเพื่อค้นหาวิธีการแก้ปัญหา โดยจะบูรณาการความรู้ที่ต้องการให้ผู้เรียนได้รับการแก้ปัญหาเข้าด้วยกัน ปัญหาที่ใช้มีลักษณะเกี่ยวกับชีวิตประจำวันและมีความสัมพันธ์กับผู้เรียน การเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐานจะมุ่งเน้นพัฒนาผู้เรียนในด้านทักษะการเรียนรู้มากกว่าความรู้ที่ผู้เรียนจะได้มาและพัฒนาผู้เรียนสู่การเป็นผู้ที่มีความสามารถเรียนรู้โดยการชี้นำตนเองได้

Barell (1998: 7) ได้ให้ความหมายของการเรียนรู้เป็นฐานไว้ว่า เป็นกระบวนการของการสำรวจเพื่อที่จะตอบคำถามสิ่งที่อยากรู้อยากเห็น ข้อสงสัยและความไม่มั่นใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์ธรรมชาติในชีวิตจริงที่มีความซับซ้อน ปัญหาที่ใช้ในกระบวนการเรียนรู้จะเป็นปัญหาที่ไม่ชัดเจนมีความยากหรือมีข้อสงสัยมาก มีแนวทางในการแก้ปัญหาอย่างหลากหลาย

ทิศนา ขัมมณี (2547: 137-138) กล่าวถึงการจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐานว่า เป็นการจัดสภาพการณ์ของการเรียนการสอนที่ใช้ปัญหาเป็นเครื่องมือในการช่วยให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ตามเป้าหมาย โดยผู้สอนอาจนำผู้เรียนไปเผชิญสถานการณ์ปัญหาจริง หรือผู้สอนอาจจัด

สภาพการณ์ให้ผู้เรียนเผชิญปัญหา และฝึกกระบวนการคิดวิเคราะห์ปัญหาและการแก้ปัญหาเป็นกลุ่ม ซึ่งจะช่วยให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจในปัญหานั้นอย่างชัดเจน ได้เห็นทางเลือกและวิธีการที่หลากหลายในปัญหานั้น รวมทั้งให้ผู้เรียนเกิดความใฝ่รู้ เกิดทักษะกระบวนการคิด และกระบวนการแก้ปัญหา

ญาดาภัก กิจทวี (2551: 29) สรุปว่าการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐาน เป็นกระบวนการจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหามาเป็นตัวกระตุ้นให้ผู้เรียนได้ศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลด้วยตนเอง เพื่อนำไปสู่การแก้ปัญหา โดยจะแบ่งผู้เรียนเป็นกลุ่มย่อยเพื่อช่วยกันศึกษา อภิปรายปัญหา โดยนำเอาข้อมูลและประสบการณ์ที่ผู้เรียนมีอยู่นั้นมาวิเคราะห์อย่างมีวิจารณญาณ เพื่อที่จะให้ผู้เรียนได้จดจำความรู้ใหม่ไว้ได้นาน และรู้จักนำไปประยุกต์ใช้กับสถานการณ์ต่างๆ ให้ผู้เรียนได้ฝึกทักษะการแก้ปัญหาเพื่อให้เกิดความเข้าใจในปัญหานั้นได้อย่างชัดเจนและถูกต้องจนสามารถแก้ไขปัญหาก็พบได้ในที่สุด

สุพัตรา เกานิล (2557: 17) สรุปความหมายของการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐานไว้ว่าเป็นการเรียนรู้อีกรูปแบบหนึ่งที่ใช้ปัญหาเป็นตัวกระตุ้น เพื่อนำทางให้มีความอยากรู้อยากเห็น กระตุ้นให้ผู้เรียนใช้ทักษะการคิดแก้ปัญหาและนำไปสู่การตัดสินใจที่ถูกต้องด้วยตนเอง มีการศึกษา ค้นคว้าจากข้อมูลที่หลากหลายเพื่อนำมาแก้ปัญหา ใช้กระบวนการกลุ่มจากการลงมือปฏิบัติจริงก่อนที่จะเผชิญปัญหาและแก้ปัญหา

สรุปได้ว่าวิธีการสอนโดยใช้ปัญหาเป็นฐานเป็นการจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นเครื่องมือกระตุ้นผู้เรียนให้มีความสนใจใคร่รู้และต้องการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเพื่อนำไปสู่การแก้ปัญหา ซึ่งผู้สอนอาจจัดสภาพการณ์ให้ผู้เรียนได้เผชิญปัญหาและฝึกกระบวนการวิเคราะห์และแก้ปัญหา เพื่อให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจในปัญหาอย่างชัดเจนและสามารถใช้ทักษะกระบวนการที่นำไปสู่การแก้ปัญหาได้

ลักษณะสำคัญของการจัดการเรียนรู้แบบใช้ปัญหาเป็นฐาน (ตามแนวคิดของสำนักงานเลขาธิการสภาการศึกษา)(สำนักงานเลขาธิการ. 2559: ออนไลน์)

1. ต้องเป็นสถานการณ์ที่เป็นปัญหา และเริ่มต้นการจัดกระบวนการเรียนรู้ด้วยการใช้ปัญหาเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดกระบวนการเรียนรู้
2. ปัญหาที่นำมาใช้ในการจัดกระบวนการเรียนรู้ ควรเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นและพบเห็นได้ในชีวิตจริงของผู้เรียนหรือมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นจริง

3. ผู้เรียนเรียนรู้โดยการนำตนเอง (Self – Directed Learning) ค้นหาและแสวงหาความรู้ได้ด้วยตนเอง ดังนั้น ผู้เรียนจึงต้องวางแผนการเรียนรู้ด้วยตนเอง บริหารเวลาเอง คัดเลือกวิธีการเรียนรู้และประสบการณ์การเรียนรู้ รวมทั้งประเมินการเรียนรู้ได้ด้วยตนเอง

4. ผู้เรียนเรียนรู้เป็นกลุ่มย่อย เพื่อประโยชน์ในการค้นหาความรู้ ข้อมูลร่วมกัน เป็นการพัฒนาทักษะแก้ปัญหาด้วยเหตุและผล ฝึกให้ผู้เรียนมีทักษะในการรับส่งข้อมูล เรียนรู้เกี่ยวกับความแตกต่างระหว่างคน และฝึกการจัดระบบตนเองเพื่อพัฒนาความสามารถในการทำงานร่วมกันเป็นทีม ความรู้คำตอบที่ได้มีความหลากหลาย องค์ความรู้จะผ่านการวิเคราะห์โดยผู้เรียน มีการสังเคราะห์และตัดสินใจร่วมกัน การจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐานนี้ นอกจากการจัดการเรียนเป็นกลุ่มแล้วยังสามารถจัดให้ผู้เรียนเรียนรู้เป็นรายบุคคลได้ แต่อาจทำให้ผู้เรียนขาดทักษะในการทำงานร่วมกันกับผู้อื่น

5. การเรียนรู้มีลักษณะการบูรณาการความรู้และบูรณาการทักษะกระบวนการต่าง ๆ เพื่อให้ผู้เรียนได้รับความรู้และคำตอบที่กระจ่างชัด

6. ความรู้ที่เกิดขึ้นจากการเรียนรู้จะได้มาภายหลังจากผ่านกระบวนการเรียนรู้โดยใช้การแก้ปัญหาเป็นฐาน

7. การประเมินผลเป็นการประเมินผลจากสภาพจริง โดยพิจารณาจากการปฏิบัติงานตามความก้าวหน้าของผู้เรียน

การจัดการเรียนรู้แบบใช้ปัญหาเป็นฐาน สิ่งสำคัญที่สุดคือ ปัญหาหรือสถานการณ์ที่จะเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดกระบวนการเรียนรู้ ลักษณะสำคัญของปัญหาตามข้อสรุปของสำนักงานเลขาธิการสภาการศึกษา มีดังนี้

1. เกิดขึ้นในชีวิตจริงและเกิดจากประสบการณ์ หรือผู้เรียนมีโอกาสเผชิญกับปัญหานั้น
2. เป็นปัญหาที่พบบ่อย มีความสำคัญ มีข้อมูลประกอบเพียงพอสำหรับการค้นคว้า
3. เป็นปัญหาที่ยังไม่มีคำตอบชัดเจน เป็นปัญหาที่มีความซับซ้อน คลุมเครือ หรือผู้เรียนเกิดความสงสัย
4. ปัญหาที่เป็นประเด็นขัดแย้ง ขัดแย้งในสังคมยังไม่มีคำตอบ
5. เป็นปัญหาอยู่ในความสนใจ เป็นสิ่งที่อยากรู้ แต่ไม่รู้
6. เป็นปัญหาที่สร้างความเดือดร้อน เสียหาย เกิดโทษภัยและเป็นสิ่งไม่ดีหากใช้ข้อมูลเพียงลำพังคนเดียวอาจทำให้การแก้ปัญหาผิดพลาด

7. เป็นปัญหาที่มีการยอมรับว่าจริง ถูกต้อง แต่ผู้เรียนไม่เชื่อว่าจริง ไม่สอดคล้องกับความคิดของผู้เรียน
8. ปัญหาที่อาจมีคำตอบหรือมีแนวทางในการแสวงหาคำตอบได้หลายทาง ครอบคลุมการเรียนรู้ที่กว้างขวางหลากหลายเนื้อหา
9. เป็นปัญหาที่ไม่สามารถหาคำตอบได้ทันที ต้องการการสำรวจค้นคว้าและการรวบรวมข้อมูลหรือทดลองดูก่อน จึงจะได้คำตอบ ไม่สามารถคาดเดาหรือทำนายได้ง่าย ๆ ว่าต้องใช้ความรู้อะไร ยุทธวิธีในการสืบเสาะหาความรู้จะเป็นอย่างไรหรือคำตอบ หรือผลของความรู้เป็นอย่างไร
10. เป็นปัญหาที่มีความยากง่ายเหมาะสมกับพื้นฐานของผู้เรียน
11. เป็นปัญหาส่งเสริมความรู้ด้านทักษะ สอดคล้องกับหลักสูตรการศึกษา



แนวทางการจัดการเรียนรู้: เรื่อง การทดลองแก๊งก์น้ำของทอริริเซลลี

หน่วยการเรียนรู้ การทดลองแก๊งก์น้ำของทอริริเซลลี	เรื่อง การทดลองแก๊งก์น้ำของทอริริเซลลี
รายวิชา ฟิสิกส์เพิ่มเติม	กลุ่มสาระการเรียนรู้ วิทยาศาสตร์
ชั้น มัธยมศึกษาปีที่ 5	ผู้สอน
ภาคเรียนที่.....	ปีการศึกษา.....

สาระการเรียนรู้และมาตรฐานการเรียนรู้

สาระที่ 5 งานและพลังงาน

มาตรฐาน ว 5.1 เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับการดำรงชีวิต การเปลี่ยนรูปพลังงาน ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารและพลังงาน ผลของการใช้พลังงานต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม มีกระบวนการสืบเสาะหาความรู้ สื่อสารสิ่งที่เรียนรู้และนำความรู้ไปใช้ประโยชน์

สาระที่ 8 ธรรมชาติของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มาตรฐาน ว 8.1 ใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์และจิตวิทยาศาสตร์ในการสืบเสาะหาความรู้ การแก้ปัญหา รู้ว่าปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มีรูปแบบที่แน่นอน สามารถอธิบายและตรวจสอบได้ภายใต้ข้อมูลและเครื่องมือที่มีอยู่ในช่วงเวลานั้น ๆ เข้าใจว่า วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี สังคม และสิ่งแวดล้อม มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กัน

สาระสำคัญ

สสารในสภาพปกติมี 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ที่อุณหภูมิหนึ่งของแข็งมีรูปร่างและปริมาตรคงตัว ถ้าถูกแรงไม่มากอัด ส่วนของเหลวจะมีปริมาตรคงตัวและมีรูปทรงตามภาชนะที่บรรจุและปริมาตรจะลดลงเล็กน้อยเมื่อถูกแรงอัด ส่วนแก๊สมีรูปร่างและปริมาตรไม่คงตัว ปริมาตรของแก๊สขึ้นอยู่กับปริมาตรภาชนะที่บรรจุ แก๊สมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมากกว่าของเหลวมาก แม้อุณหภูมิจะเปลี่ยนเพียงเล็กน้อยก็ตาม แต่เนื่องจากของเหลวและแก๊สมีรูปร่างไม่แน่นอน อีกทั้งสามารถไหลจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งได้ จึงอาจเรียกของเหลวและแก๊สว่า ของไหล (Fluid)

สมการความต่อเนื่อง (continuity equation) สรุปได้ว่า ผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดกับอัตราเร็วของของไหลอุดมคติ ไม่ว่าจะอยู่ที่ตำแหน่งใดในท่อจะมีค่าคงตัว

สมการของแบร์นูลลี ซึ่งกล่าวว่า ผลรวมของความดัน พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และพลังงานศักย์โน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ ภายในท่อที่ของไหลผ่านมีค่าคงตัว สมการนี้มีบทบาทมากในการแก้ปัญหาทางกลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น ซึ่งชื่อของสมการตั้ง

ให้เป็นเกียรติยศแก่ แดเนียล แบริ์นูลลี (Daniel Bernoulli) นักฟิสิกส์ชาวสวิส ผู้สร้างสมการแบร์นูลลีเป็นคนแรก

จุดประสงค์การเรียนรู้

ด้านความรู้ความเข้าใจ (K)

1. วิเคราะห์ เปรียบเทียบสมการทอริเซลลีสำหรับของไหลอุดมคติและของไหลจริง
2. ทดลองและคำนวณสัมประสิทธิ์ความเร็วในการทดลองแท่งก้น้ำของทอริเซลลีได้

ด้านทักษะกระบวนการ (P)

1. ทักษะการตั้งสมมติฐาน
2. ทักษะการกำหนดนิยามเชิงปฏิบัติการ
3. ทักษะการกำหนด และควบคุมตัวแปร
4. ทักษะการทดลอง
5. ทักษะการตีความหมายข้อมูล และการลงข้อมูล

ด้านคุณลักษณะอันพึงประสงค์(A)

1. มีความรับผิดชอบ
2. ตรงต่อเวลา

ด้านทักษะของคนในศตวรรษที่ 21

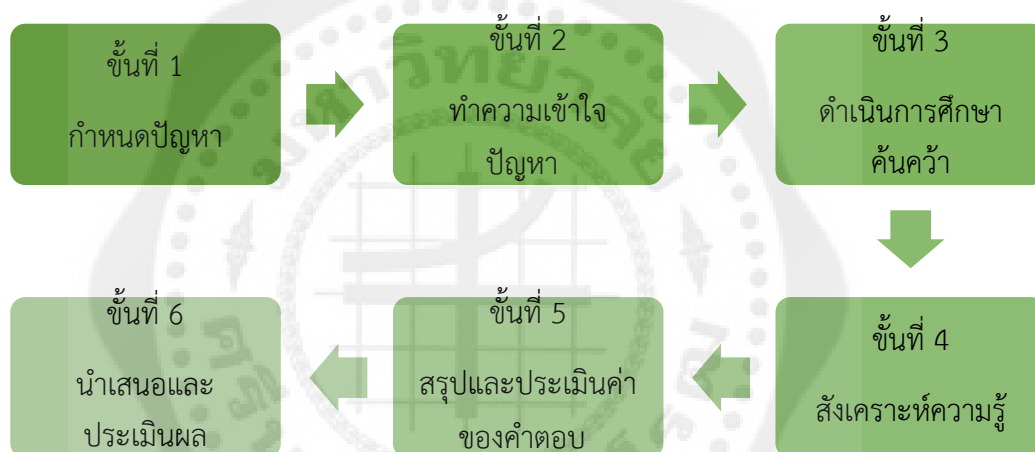
1. การคิดแบบมีวิจารณญาณ
2. การแก้ปัญหา
3. การสื่อสาร
4. การทำงานเป็นทีม

สาระการเรียนรู้

1. ของไหล
2. สมการความต่อเนื่อง
3. สมการแบร์นูลลี
4. การหาอัตราเร็วของของเหลวที่พุ่งออกจากรูขนาดเล็ก

ขั้นตอนการจัดกิจกรรมการเรียนรู้: การเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐาน (Problem-based Learning)

วิธีการสอนโดยใช้ปัญหาเป็นฐานเป็นการจัดการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นเครื่องมือกระตุ้นผู้เรียนให้มีความสนใจใคร่รู้และต้องการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเพื่อนำไปสู่การแก้ปัญหา ซึ่งผู้สอนอาจจัดสภาพการณ์ให้ผู้เรียนได้เผชิญปัญหาปและฝึกกระบวนการวิเคราะห์และแก้ปัญหา เพื่อให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจในปัญหาอย่างชัดเจนและสามารถใช้ทักษะกระบวนการที่นำไปสู่การแก้ปัญหาได้ (สุคนธ์ สิทธิพานนท์. 2558: 90-101) ผู้จัดทำได้เลือกการจัดกิจกรรมการเรียนรู้โดยใช้ปัญหาเป็นฐาน (PBL) แบบ 6 ขั้นตอน ดังนี้



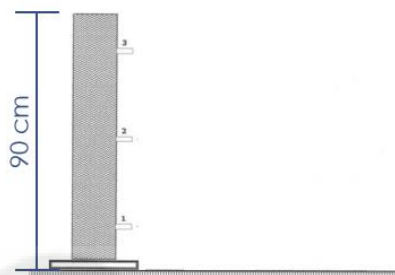
ภาพประกอบ 43 ผังมโนทัศน์แสดงขั้นตอนการจัดการเรียนรู้แบบการใช้ปัญหาเป็นฐาน

ขั้นที่ 1 กำหนดปัญหา

กำหนดปัญหาจัดสถานการณ์ต่าง ๆ กระตุ้นให้ผู้เรียนเกิดความสนใจ มองเห็นปัญหา กำหนดสิ่งที่เป็นปัญหาที่ผู้เรียนอยากรู้อยากเรียน และเกิดความสนใจที่จะค้นหาคำตอบ

- ♥ แบ่งกลุ่มผู้เรียนเป็นกลุ่มๆ ละ 4-5 คน
- ♥ เสนอสถานการณ์ปัญหาต่อไปนี้แก่ผู้เรียน

“ถ้าเราต้องการรตน้ำแปลงผักที่มีความยาว 90 เซนติเมตร นักเรียนจะต้องใส่น้ำเท่าไร และเปิดรูไหน จึงจะสามารถรตน้ำแปลงผักได้ทั้งหมด โดยที่ใครใช้ปริมาณน้ำน้อยที่สุด จะเป็นผู้ชนะ”



ภาพประกอบคำถาม

- ♥ จากสถานการณ์ที่กำหนดให้ ให้ผู้เรียนแต่ละคนตอบคำถามต่อไปนี้ เขียนตอบลงในสมุด
- ♥ อภิปรายในกลุ่ม เลือกคำตอบที่คิดว่าดีที่สุดของกลุ่ม

ปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลต่อระยะทางการตกของน้ำ (s)

1. ระดับน้ำในแทงก์น้ำ
2. ระดับของรูเปิด
3. ประเภทของรูเปิด

- ♥ สุ่มกลุ่มเสนอผลการทำกิจกรรม (แต่ละกลุ่มอาจได้คำตอบที่แตกต่างกัน โดยครูยังไม่เฉลย)
- ♥ กลุ่มร่วมกันบอกถึงปัญหาที่พบจากการแก้สถานการณ์ที่กำหนดให้
- ♥ กลุ่มร่วมกันกำหนดสิ่งที่ต้องเรียนรู้ อันเป็นเครื่องมือที่นำไปสู่การแก้ปัญหาจากสถานการณ์ที่กำหนดให้

ขั้นที่ 2 ทำความเข้าใจปัญหา

ทำความเข้าใจกับปัญหา กลุ่มจะต้องสามารถอธิบายสิ่งต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาได้

- ♥ ให้ผู้เรียนทำความเข้าใจปัญหา โดยให้ผู้เรียนระบุว่า การแก้ปัญหาจากสถานการณ์ที่กำหนดให้ จำเป็นต้องศึกษาความรู้เกี่ยวกับเรื่องอะไรบ้าง
(เช่น ของไหล สมการความต่อเนื่อง สมการแบร์นูลลี)
- ♥ ให้แต่ละกลุ่มนำเสนอ เรื่องที่จำเป็นต้องศึกษา โดยให้ผู้สอนและผู้เรียนร่วมกันเสริมเพิ่มเติมเรื่องที่ต้องไปศึกษา
(ถ้าผู้เรียนนำเสนอเรื่องที่ไม่จำเป็นต้องศึกษาไม่ครบ ผู้สอนให้ศึกษาเพิ่มอีก ได้แก่ การหาอัตราเร็วของน้ำที่พุ่งออกจากรูเปิด สมการทอริเชลลี และประเภทของรูเปิด)

ขั้นที่ 3 ดำเนินการศึกษาค้นคว้า

ดำเนินการศึกษาค้นคว้า กำหนดสิ่งที่ต้องการเรียนและดำเนินการศึกษาค้นคว้าอย่างหลากหลาย

- ♥ ผู้สอนทำใบเอกสารประกอบการเรียนรู้ เรื่องของไหล แจกผู้เรียน
- ♥ ผู้สอนจัดเตรียมชุดการทดลองแท็งก์น้ำของทอริเชลลี
(ประกอบไปด้วย ชุดการทดลองทอริเชลลี และ น้ำ)
- ♥ ให้กลุ่มกำหนดสิ่งที่ตนเองต้องเรียนรู้ พร้อมทั้งตั้งสมมติฐาน เพื่อนำไปสู่การออกแบบการทดลอง
(ตัวอย่างสมมติฐานของนักเรียน
 1. ระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับรูเปิดส่งผลต่อความเร็วอย่างไร
 2. รูเปิดที่แตกต่างกันนั้นส่งผลต่อความเร็วอย่างไร)
- ♥ กลุ่มทำการทดลองตามแผนการทดลองที่กลุ่มของตนเองได้ออกแบบไว้

ขั้นที่ 4 สังเคราะห์ความรู้

สังเคราะห์ความรู้ แต่ละกลุ่มนำความรู้ที่ได้ค้นคว้ามาแลกเปลี่ยนเรียนรู้ร่วมกันอภิปรายผลและสังเคราะห์ความรู้ที่ได้มาว่ามีความเหมาะสมหรือไม่

- ♥ ผู้เรียนร่วมกันวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ โดยนำความรู้ที่ผู้เรียนดำเนินการศึกษาด้วยตนเอง จากแหล่งข้อมูลที่เตรียมไว้ให้ ตามความสนใจของนักเรียน และเขียนสรุปความรู้ที่ตนเองศึกษา
- ♥ หลังจากให้ผู้เรียนแต่ละคนได้ศึกษาเรื่อง ของไหล จากแหล่งเรียนรู้ที่ตนเองเลือกแล้ว ให้แลกเปลี่ยนสิ่งที่ตนเองได้เรียนรู้ภายในกลุ่ม เพื่ออภิปรายและสังเคราะห์ความรู้ที่ได้มา ว่ามีความเหมาะสม ถูกต้องหรือไม่

ขั้นที่ 5 สรุปและประเมินค่าของคำตอบ

สรุปและประเมินค่าของคำตอบ ผู้เรียนแต่ละกลุ่มสรุปผลงานของกลุ่มตนเอง ประเมินผลงานว่าข้อมูลที่ได้ศึกษาค้นคว้ามีความเหมาะสมเพียงใด โดยการตรวจสอบแนวคิดภายในกลุ่มของตนเองอย่างอิสระ ทุกกลุ่มร่วมกันสรุปองค์ความรู้ในภาพรวมของปัญหาอีกครั้ง

- ♥ ให้ผู้เรียนแต่ละกลุ่มสรุปผลการทดลองแก๊งก์น้ำของทอริริเชลลี และองค์ความรู้เรื่อง
ของไหล

1. สรุปผลการทดลอง

- ❖ น้ำที่ไหลออกจากรูเปิดขอบคมนั้นมีความเร็วมากกว่าน้ำที่ไหลออกจากรูเปิดขอบกึ่งคม
- ❖ ที่ระดับน้ำสูงกว่าความเร็วของน้ำที่ไหลออกมานั้นมากกว่า
- ❖ สมบัติความเร็วเป็นค่าไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับระดับน้ำ ประเภทและระยะของรูเปิด

2. สรุปองค์ความรู้เรื่องของไหล

- ❖ ความหนาแน่นคือมวลต่อปริมาตรหนึ่งหน่วย ถ้ามวล m ของวัสดุมีปริมาตรเดียวมีและปริมาตร V ความหนาแน่นของวัสดุ คือ

$$\rho = \frac{m}{V}$$

ความถ่วงจำเพาะ คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นต่อวัสดุต่อความหนาแน่นของน้ำ

- ❖ ความดันคือแรงแนวฉากต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย กฎของพาสคัลกล่าวว่าความดันซึ่งกระทำที่ผิวของของไหลในภาชนะปิดจะถูกส่งผ่านโดยไม่ลดลงไปยังทุกส่วนของของไหล ความดันสัมบูรณ์คือความดันทั้งหมดในของไหล ความดันเกจเป็นผลต่างระหว่างความสัมบูรณ์กับความดันบรรยากาศ หน่วยในระบบ SI ของความดันคือพาสคัล
- ❖ ถ้าของไหลมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ρ (ของไหลที่บีบอัดไม่ได้) อยู่หนึ่ง ผลต่างความดันระหว่างจุด 1 และ 2 ที่ความสูง y_1 และ y_2 คือ

$$p_1 - p_2 = -\rho g(y_2 - y_1)$$

ถ้าความดันที่ผิวของไหลแบบบีบอัดไม่ได้ซึ่งอยู่หนึ่งมีค่าเท่ากับ p_0 ความดันที่

ระดับลึก h คือ

$$p = p_0 + \rho gh$$

- ❖ หลักของอาร์คิเมดีส กล่าวว่า เมื่อวัตถุจุ่มอยู่ในของไหล ของไหลจะออกแรงลอยตัวดันขึ้นต่อวัตถุด้วยขนาดเท่ากับน้ำหนักของของไหลที่วัตถุไปแทนที่
- ❖ ผิวของเหลวทำตัวเหมือนแผ่นเมมเบรนภายใต้ความตึง เราเรียกแรงต่อความยาวหนึ่งหน่วยซึ่งกระทำต่อเส้นบนผิวว่าความตึงผิว
- ❖ ของไหลในอุดมคติบีบอัดไม่ได้และไม่มี ความหนืด เส้นการไหลคือเส้นทางของอนุภาคของไหล เส้นกระแสคือเส้นโค้งที่สัมผัสกับเวกเตอร์ความเร็วที่แต่ละจุด ท่อการไหลคือท่อที่ถูกล้อมรอบข้างด้วยเส้นการไหล ในการไหลแบบลามินาร์ ชั้นของไหลไหลไหลผ่านไปบนชั้นอื่นอย่างราบเรียบ การไหลแบบอลวนมีความยุ่งเหยิงมากและรูปแบบการไหลนั้นเปลี่ยนไปตลอดเวลา
- ❖ สมการความต่อเนื่องบรรยายการคงตัวของมวลในของไหลที่บีบอัดไม่ได้ : อัตราการไหล v_1 และ v_2 ที่ภาคตัดขวาง A_1 และ A_2 สองแห่งในท่อการไหลมีความสัมพันธ์กันโดยที่

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

ผลคูณ Av คืออัตราการไหลเชิงปริมาตร dV/dt ซึ่งคือปริมาตรผ่านภาคตัดขวาง

ท่อ

- ❖ สมการของแบร์นูลลีให้ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน p อัตราเร็วการไหล v และระดับสูง y สำหรับการไหลแบบคงตัวของของไหลอุดมคติ สำหรับสองจุดใด ๆ

$$\frac{1}{2} v_1^2 + \frac{P_1}{\rho} + gy_1 = \frac{1}{2} v_2^2 + \frac{P_2}{\rho} + gy_2$$

- ❖ ความหนืดของของไหลบอกสมบัติความต้านทานของไหลต่อความเครียดเฉือน ในของไหลแบบนิวโตเนียน แรงหนืดแปรตรงกับอัตราความเครียด เมื่อของไหลชนิดนั้นไหลผ่านท่อทรงกระบอกรัศมีภายใน R และยาว L อัตราการไหลเชิงปริมาตรหาได้จากสมการ Poiseuille

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi}{8} \left(\frac{R^4}{\eta} \right) \left(\frac{p_1 - p_2}{L} \right)$$

โดยที่ p_1 และ p_2 เป็นความดันที่ปลายสองข้าง และ η คือความหนืด

- ❖ เมื่อทรงกลมรัศมี r เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว v ผ่านของไหล ซึ่งมีความหนืด η จะมีแรงหนืด F ต้านการเคลื่อนที่ แรงนี้หาได้จากกฎของ Stokes

$$F = 6\pi\eta Rv$$

- ♥ ให้ผู้เรียนนำความรู้ที่ได้จากการทดลอง ไปใช้ตรวจสอบผลการทำแบบฝึกหัดในเอกสารประกอบการสอน เรื่อง ของไหล
- ♥ ผู้เรียนทุกกลุ่มร่วมกันสรุปองค์ความรู้ ที่ได้จากการทดลองแก๊งก์น้ำของทอร์ริเชลลี
- ♥ ให้ผู้เรียนแต่ละคนนำข้อสรุปที่ได้ มาเขียนเรียบเรียงเป็นองค์ความรู้ของตนเอง พร้อมยกตัวอย่างประกอบองค์ความรู้นั้น

ขั้นที่ 6 นำเสนอและประเมินผลงาน

นำเสนอและประเมินผลงาน กลุ่มนำข้อมูลที่ได้นำจัดระบบองค์ความรู้และนำเสนอในรูปแบบผลงานที่หลากหลาย ผู้เรียนทุกคนและผู้เกี่ยวข้องกับปัญหา ร่วมกันประเมินผลงาน

- ♥ ให้กลุ่มนำข้อสรุปที่ได้มาจัดระบบ โดยการเขียนแผนผังมโนทัศน์เรื่อง ของไหล
- ♥ ให้กลุ่มแต่ละกลุ่มนำเสนอผลงาน
- ♥ ให้กลุ่มทุกกลุ่มร่วมกันประเมินการเขียนผังมโนทัศน์ โดยใช้เกณฑ์การประเมินที่ผู้สอนเตรียมไว้ให้
- ♥ ให้ผู้เรียนแต่ละคนนำความรู้ที่ได้ไปใช้ในการทำแบบฝึกหัดเรื่อง ของไหล

สื่อการเรียนรู้/แหล่งการเรียนรู้

1. เอกสารประกอบการเรียน เรื่อง ของไหล
2. อุปกรณ์การทดลองแก๊งก์น้ำของทอร์ริเชลลี
3. รายงานผลการทดลอง

การวัดผลและประเมินผลการเรียนรู้

สิ่งที่ประเมิน/ ชิ้นงาน/ภาระงาน	วิธีการประเมิน	เครื่องมือ	เกณฑ์การตัดสิน
1. ความรู้/ความเข้าใจ 1.1 แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์	1. ตรวจ แบบทดสอบ	1. แบบทดสอบ 20 ข้อ	ผู้เรียนร้อยละ 70 มีคะแนนประเมินด้านความรู้ความเข้าใจระดับคุณภาพ 3
2. รายงานบันทึกผลการทดลอง 2.1 การกำหนดปัญหา	- ตรวจรายงานการทดลอง	- แบบประเมินทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์	ผู้เรียนร้อยละ 70 มีคะแนนทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ระดับคุณภาพ 3
2.2 การตั้งสมมติฐาน	- ตรวจรายงานการทดลอง	- แบบประเมินทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์	ผู้เรียนร้อยละ 70 มีคะแนนทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ระดับคุณภาพ 3
2.3 วางแผนกำหนดขั้นตอนการทำงาน	- สังเกต	- แบบประเมินทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์	ผู้เรียนร้อยละ 70 มีคะแนนทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ระดับคุณภาพ 3
2.4 ศึกษาค้นคว้าทดลอง สังเกตรวบรวมข้อมูล	- สังเกต / ตรวจรายงานการทดลอง	แบบประเมินทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์	ผู้เรียนร้อยละ 70 มีคะแนนทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ระดับคุณภาพ 3
2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล	- สังเกต ตรวจรายงานการทดลอง	- แบบประเมินทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์	ผู้เรียนร้อยละ 70 มีคะแนนทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ระดับคุณภาพ 3
2.6 การสรุปผลการทดลอง	- ตรวจรายงานการทดลอง	- แบบประเมินทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์	ผู้เรียนร้อยละ 70 มีคะแนนทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ระดับคุณภาพ 3

สิ่งที่ประเมิน/ ชิ้นงาน/ภาระงาน	วิธีการประเมิน	เครื่องมือ	เกณฑ์การตัดสิน
3.คุณลักษณะอันพึงประสงค์ (A) 3.1 มีความรับผิดชอบ	- สังเกตพฤติกรรม การทำงาน	- แบบประเมิน คุณลักษณะอันพึง ประสงค์	- ผู้เรียนร้อยละ 70 มีคะแนนคุณลักษณะ อันพึงประสงค์ ระดับ คุณภาพ 3
3.2 ตรงเวลา	- สังเกตพฤติกรรม การเข้าเรียน	- แบบประเมิน คุณลักษณะอันพึง ประสงค์	- ผู้เรียนร้อยละ 70 มีคะแนนคุณลักษณะ อันพึงประสงค์ ระดับ คุณภาพ 3
4.ทักษะของคนใน ศตวรรษที่ 21 4.1 การคิดอย่างมี วิจารณญาณ	- สังเกตพฤติกรรม การทำงาน	- แบบประเมิน คุณลักษณะอันพึง ประสงค์	- ผู้เรียนร้อยละ 70 มีคะแนนคุณลักษณะ อันพึงประสงค์ ระดับ คุณภาพ 3
4.2 การแก้ปัญหา	- สังเกตพฤติกรรม การทำงาน	- แบบประเมิน คุณลักษณะอันพึง ประสงค์	- ผู้เรียนร้อยละ 70 มีคะแนนคุณลักษณะ อันพึงประสงค์ ระดับ คุณภาพ 3
4.3 การสื่อสาร	- สังเกตพฤติกรรม การทำงาน	- แบบประเมิน คุณลักษณะอันพึง ประสงค์	- ผู้เรียนร้อยละ 70 มีคะแนนคุณลักษณะ อันพึงประสงค์ ระดับ คุณภาพ 3
4.4 การทำงานเป็น ทีม	- สังเกตพฤติกรรม การทำงาน	- แบบประเมิน คุณลักษณะอันพึง ประสงค์	- ผู้เรียนร้อยละ 70 มีคะแนนคุณลักษณะ อันพึงประสงค์ ระดับ คุณภาพ 3

เกณฑ์การประเมิน

สิ่งที่ประเมิน	เกณฑ์การให้คะแนน		
	3	2	1
1. ความรู้/ความเข้าใจ 1.1 แบบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน	- ได้คะแนน 16-20 คิดเป็น 80% ของแบบทดสอบ	- ได้คะแนน 12-16 คิดเป็น 60% ของแบบทดสอบ	- ได้คะแนน 8-12 คิดเป็น 40% ของแบบทดสอบ
2. รายงานการทดลอง 2.1 การกำหนดปัญหา	- กำหนดปัญหาสอดคล้องกับจุดประสงค์และสอดคล้องกับกิจกรรมการทดลองได้ชัดเจน	- กำหนดปัญหาได้สอดคล้องกับจุดประสงค์และกิจกรรมการทดลองได้ยังไม่ชัดเจน	- กำหนดปัญหาไม่สอดคล้องกับจุดประสงค์และไม่สอดคล้องกับกิจกรรมการทดลอง
2.2 การตั้งสมมติฐาน	- ตั้งสมมติฐานสอดคล้องกับปัญหาและแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผลดี	- ตั้งสมมติฐานสอดคล้องกับปัญหาแต่ไม่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล	- ตั้งสมมติฐานไม่สอดคล้องกับปัญหา
2.3 วางแผนกำหนดขั้นตอนการทำงาน	- วางแผนขั้นตอนการทดลองครบถ้วนทุกขั้นตอนและบันทึกผลการทดลองได้บ้าง ทำการทดลองได้สอดคล้องกับจุดประสงค์และบันทึกการทดลองได้ดี	- วางแผนขั้นตอนการทดลองและบันทึกผลการทดลองได้พอสมควร ทำการทดลองบางส่วนสอดคล้องกับจุดประสงค์ของการทดลองได้พอใช้	- วางแผนขั้นตอนการทดลองและบันทึกผลการทดลองด้วยตนเองไม่ได้ ต้องได้รับการช่วยเหลือจึงจะทำการทดลองได้
2.4 ศึกษาค้นคว้าทดลอง สังเกตรวบรวมข้อมูล	- สังเกต ศึกษาทดลอง รวบรวมข้อมูลอย่างถูกต้องครบถ้วน ตามแผนที่วางไว้ บันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่อง และ	- สังเกต ศึกษาทดลองบางส่วนรวบรวมข้อมูลตามแผนที่วางไว้ บันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่อง และ แก้ปัญหาการทำงานได้ด้วย	- สังเกต ศึกษาทดลอง รวบรวมข้อมูลตามแผนที่วางไว้ บันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่อง และ แก้ปัญหาการทำงาน

	แก้ปัญหาการทำงาน ได้ด้วยตัวเองได้รับ คำแนะนำเพียง เล็กน้อย	ตัวเองเป็นบางส่วน ต้องได้รับคำแนะนำ เพียงบางส่วน	ด้วยตัวเองไม่ได้ ต้อง ได้รับคำแนะนำ ตลอดเวลา
2.5 การวิเคราะห์ ข้อมูล	- จำแนก แยกแยะ ข้อมูลเปรียบเทียบ ความเหมือนและ ความแตกต่าง เรียงลำดับวิเคราะห์ เหตุผล ด้วยตนเอง เหมาะสมกับสิ่งที่ ศึกษาและจุดประสงค์ ของการทดลองดี	- จำแนก แยกแยะ ข้อมูล เปรียบเทียบ ความเหมือนและความ แตกต่าง เรียงลำดับ วิเคราะห์เหตุผล ด้วย ตนเองได้เป็นบางส่วน และต้องได้รับคำชี้แนะ	-จำแนก แยกแยะ ข้อมูล เปรียบเทียบ ความเหมือนและ ความแตกต่าง เรียงลำดับวิเคราะห์ เหตุผล ด้วยตนเองได้ น้อยมาก และต้อง ได้รับคำชี้แนะ ค่อนข้างมาก
2.6 การสรุปผลผล การทดลอง	- สรุปข้อมูลได้ถูกต้อง และสมบูรณ์ชัดเจน เป็นส่วนใหญ่	- สรุปข้อมูลได้ถูกต้อง เป็นส่วนใหญ่แต่ สมบูรณ์ชัดเจนเพียง บางส่วน	- สรุปข้อมูลได้ถูกต้อง และสมบูรณ์ชัดเจน เพียงบางส่วน
3. คุณลักษณะอัน พึงประสงค์ 3.1 มีความ รับผิดชอบ	-ทำงานในหน้าที่ที่ได้รับ มอบหมายครบถ้วน เต็มความสามารถ พยายามแก้ปัญหา การทำงานด้วยตนเอง และมุ่งมั่น จงงาน สำเร็จ	-ทำงานในหน้าที่ที่ ได้รับมอบหมาย ครบถ้วน แก้ปัญหาการ ทำงาน ด้วยตนเองเป็น บางครั้ง และทำงานจน สำเร็จ	-รับผิดชอบในงานที่ ได้รับมอบหมายน้อย มากต้องคอยควบคุม และกระตุ้นเตือนบ่อย ๆ ทำงานไม่สำเร็จ

สิ่งที่ประเมิน	เกณฑ์การให้คะแนน		
	3	2	1
3.2 ตรงต่อเวลา	สามารถควบคุมตนเอง การเริ่ม ทำ เลิกงานให้ เป็นไปตามที่กำหนด เข้าเรียนตรงเวลา สาย ไม่เกิน 5 นาที ไม่มา โรงเรียนสาย มา โรงเรียนคิดเป็นร้อยละ 80% ของเวลาเรียน ทั้งหมด	สามารถควบคุมตนเอง การเริ่ม ทำ เลิกงานให้ เป็นไปตามที่กำหนด เข้า เรียนตรงเวลา สายเกิน 5 นาทีบางครั้ง มาโรงเรียน สายบางครั้ง	ไม่สามารถควบคุม ตนเอง การเริ่ม ทำ เลิกงานให้เป็นไป ตามที่กำหนด เข้า เรียนสาย มาโรงเรียน สาย
4.ทักษะของคน ในศตวรรษที่ 21 4.1 การคิดอย่าง มีวิจารณญาณ	สามารถใช้เหตุผล คิดได้ เป็นเหตุเป็นผล และใช้ การคิดกระบวนการ สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ปัจจัยย่อยมีปฏิสัมพันธ์ กันอย่างไร สามารถใช้ วิจารณญาณและการ ตัดสินใจ	สามารถใช้เหตุผล คิดได้ เป็นเหตุเป็นผล และใช้ การคิดกระบวนการ บางครั้ง สามารถ วิเคราะห์ว่าปัจจัยย่อยมี ปฏิสัมพันธ์กันอย่างไร สามารถใช้วิจารณญาณ และการตัดสินใจได้เพียง บางส่วน	ไม่สามารถใช้เหตุผล คิดได้เป็นเหตุเป็นผล และใช้การคิด กระบวนการ ไม่ สามารถวิเคราะห์ได้ ว่าปัจจัยย่อยมี ปฏิสัมพันธ์กัน อย่างไร ไม่สามารถใช้ วิจารณญาณและการ ตัดสินใจ
4.2 การ แก้ปัญหา	สามารถแก้ปัญหาที่ไม่ คุ้นเคยหลากหลายแบบ ทั้งโดยแนวทางที่ยอมรับ กันทั่วไป และแนวทางที่ แหวกแนว	สามารถแก้ปัญหาที่ไม่ คุ้นเคยหลากหลายแบบ ทั้งโดยแนวทางที่ยอมรับ กันทั่วไป และแนวทางที่ แหวกแนวบางครั้ง	ไม่สามารถแก้ปัญหา ที่ไม่คุ้นเคย หลากหลายแบบ ทั้ง โดยแนวทางที่ยอมรับ กันทั่วไป และ แนวทางที่แหวกแนว

สิ่งที่ประเมิน	เกณฑ์การให้คะแนน		
	3	2	1
4.3 การสื่อสาร	สามารถเรียบเรียงความคิดและมุมมองได้เป็นอย่างดี สื่อสารออกมาเข้าใจง่ายและตรงตาม และมีความสามารถสื่อสารได้หลายแบบ ทั้งวาจา ข้อเขียน และภาษาที่ไม่ใช่ภาษาพูด และเขียน	สามารถเรียบเรียงความคิดและมุมมองได้เป็นอย่างดี สื่อสารออกมาเข้าใจง่าย และมี ความสามารถสื่อสารได้หลายแบบ ทั้งวาจา ข้อเขียน	ไม่สามารถเรียบเรียงความคิดและมุมมองได้ สื่อสารไม่ได้ และไม่สามารถสื่อสารได้หลายแบบ ทั้งวาจา ข้อเขียน
4.4 การทำงานเป็นทีม	เคารพความแตกต่างทางวัฒนธรรมและทำงานร่วมกันกับคนที่มีพื้นฐานแตกต่างกันทางสังคมและวัฒนธรรมได้ดี ตอบสนองความเห็นและคุณค่าที่แตกต่างอย่างใจกว้าง	เคารพความแตกต่างทางวัฒนธรรมและทำงานร่วมกันกับคนที่มีพื้นฐานแตกต่างกันทางสังคม และวัฒนธรรมได้บ้าง ตอบสนองความเห็นและคุณค่าที่แตกต่างอย่างใจกว้าง	ไม่เคารพความแตกต่างทางวัฒนธรรมและไม่สามารถทำงานร่วมกันกับคนที่มีพื้นฐานแตกต่างกันทางสังคมและวัฒนธรรมได้

บันทึกผลหลังการสอน

ผลการจัดการเรียนรู้

ด้านความรู้

.....

.....

.....

ด้านทักษะ

.....

.....

.....

ด้านคุณลักษณะ

.....

.....

.....

ปัญหาและอุปสรรค

.....

.....

.....

วิธีการปรับปรุง/พัฒนา

นักเรียนที่ต้องดูแลเป็นพิเศษ

.....

.....

.....

นักเรียนที่มีความสามารถพิเศษ

.....

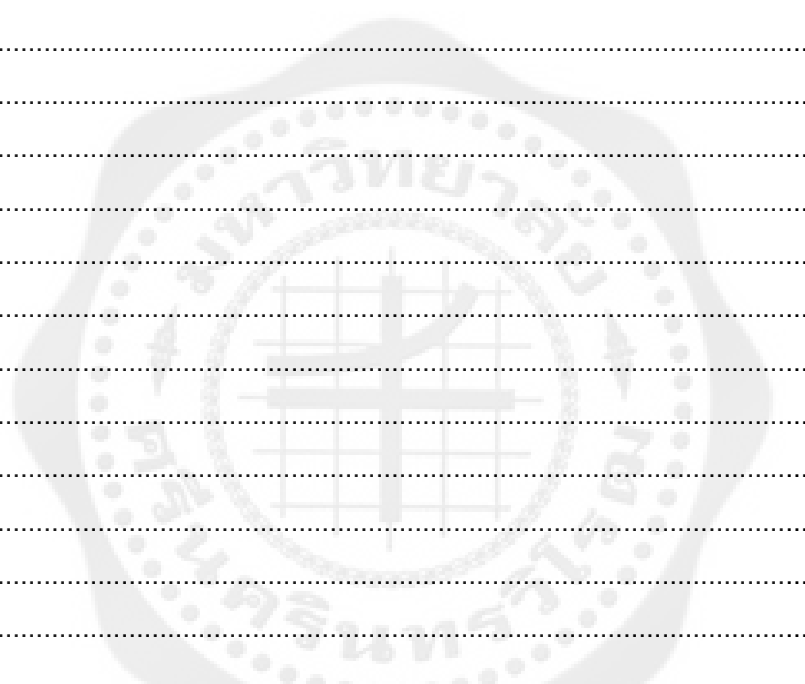
.....

.....

ลงชื่อ.....

ผู้สอน

ความคิดเห็น / ข้อเสนอแนะของผู้ตรวจ



ลงชื่อ.....ผู้ตรวจ

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

เอกสารประกอบการเรียน วิชาฟิสิกส์เพิ่มเติม เรื่อง ของไหล



ชื่อ-สกุล.....ชั้น.....เลขที่.....

คำนำ

เอกสารประกอบการเรียน วิชาฟิสิกส์เพิ่มเติม เรื่องของไหล จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอรูปแบบเอกสารประกอบการเรียนการสอน สำหรับระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ภายในเล่มประกอบไปด้วยเนื้อหา พร้อมทั้งแบบฝึกหัดเรื่องของไหล เพื่อสร้างความสะดวกให้แก่ผู้สอนและผู้เรียน

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ รวมไปถึงผู้เชี่ยวชาญที่มีส่วนร่วมทำให้เอกสารประกอบการเรียนเรื่องของไหลเล่มนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวสุทธี อภิวันท์
ผู้จัดทำ



กลศาสตร์ของไหล

1. ของไหล (Fluid)

สสารในสภาพปกติที่อุณหภูมิหนึ่งมี 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส สสารที่เป็นของแข็งมีรูปร่างและปริมาตรคงตัว ถ้าถูกแรงไม่มากอัด ส่วนของเหลวจะมีปริมาตรคงตัวและมีรูปทรงตามภาชนะที่บรรจุ ดังภาพประกอบ 1 และปริมาตรจะลดลงเล็กน้อยเมื่อถูกแรงอัด ส่วนแก๊สมีรูปร่างและปริมาตรไม่คงตัว ปริมาตรของแก๊สขึ้นอยู่กับปริมาตรภาชนะที่บรรจุ แก๊สมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมากกว่าของเหลวมาก แม้อุณหภูมิจะเปลี่ยนเพียงเล็กน้อยก็ตาม เนื่องจากของเหลวและแก๊สมีรูปร่างไม่แน่นอน อีกทั้งสามารถไหลจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งได้ จึงอาจเรียกของเหลวและแก๊สว่า ของไหล (Fluid)



ภาพประกอบ 1 แสดงรูปร่างที่ไม่แน่นอนของของเหลวซึ่งเปลี่ยนตามภาชนะบรรจุ
ที่มา: (Natkamol Chand .2558 :Online)

2. ความหนาแน่น (density)

ความหนาแน่น (density) เป็นสมบัติของสาร ซึ่งสามารถหาได้จากปริมาณมวลสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เขียนเป็นสมการ ดังนี้

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{นิยามของความหนาแน่น}) \quad (1)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

m คือมวลของสาร (กิโลกรัม)

V คือปริมาตรของสาร (ลูกบาศก์เมตร)

➤ แบบฝึกหัด : ความหนาแน่น

1. นักสำรวจเดินทางด้วยบอลูนบรรจุแก๊ส ก่อนออกเดินทางเขาบรรจุแก๊สฮีเลียมที่มีปริมาตร 400 ลูกบาศก์เมตร และมีมวล 65 กิโลกรัม แก๊สฮีเลียมในลูกบอลนี้จะมีควาหนาแน่นเท่าใด

ก. 0.05 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ข. 0.16 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
ค. 0.48 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ง. 0.54 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

2. วัตถุลูกบาศก์มีความยาวแต่ละด้านเท่ากับ 2 เมตร มีมวล 400 กิโลกรัม จงหาควาหนาแน่นของวัตถุนี้

ก. 30 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ข. 40 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
ค. 50 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ง. 60 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

3. ทรงกระบอกทำจากเหล็กและอลูมิเนียม ถ้าเหล็กมีมวลเป็น 6 เท่าของอลูมิเนียมแล้วปริมาตรของเหล็ก

จะมีค่าเป็น 2 เท่าของอลูมิเนียม ถ้าอลูมิเนียมมีความหนาแน่น 2600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร จงหา

ควาหนาแน่นของเหล็ก

ก. 5,200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ข. 7,800 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
ค. 10,400 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ง. 13,000 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

4. โลหะรูปลูกบาศก์มีความยาวด้านละ 2 เมตร จะมีมวลเท่ากับก้อนทองปริมาตร 2 ลูกบาศก์เมตร ถ้า

ทองมีความหนาแน่น 19.4×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จงหาควาหนาแน่นของโลหะ

ก. 3.29×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ข. 4.85×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
ค. 5.56×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ง. 7.39×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

5. ดาวเคราะห์ดวงหนึ่งมีมวลเป็น 4 เท่าของโลก และมีรัศมีเป็น 2 เท่าของโลก จงหาว่าควาหนาแน่น

ของดาวเคราะห์ดวงนี้มีค่าเป็นกี่เท่าของโลก

ก. 2 ข. 4 ค. $\frac{1}{2}$ ง. $\frac{1}{4}$

6. ของเหลวชนิดหนึ่งที่มีความหนาแน่น 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จงหาว่าของเหลวนี้ปริมาตร 3.50 ลูกบาศก์เมตร จะมีน้ำหนักกี่นิวตัน

- ก. 350 นิวตัน ข. 3,500 นิวตัน
ค. 35,000 นิวตัน ง. 350,000 นิวตัน

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (relative density) หรือ ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)

หมายถึงอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของสารต่อความหนาแน่นของน้ำ

ดังนั้น ความหนาแน่นสัมพัทธ์ = ความหนาแน่นของสาร/ความหนาแน่นของน้ำ

หรือ $\text{ความถี่จำเพาะของสาร} = \frac{\text{ความหนาแน่นของสาร}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำ}}$

และ $\text{ความหนาแน่นของสาร} = \frac{\text{ความถ่วงจำเพาะของสาร} \times \text{ความหนาแน่นของน้ำ}}$

7. แอลกอฮอล์มีความถี่จำเพาะ 0.8 จงหาค่าความหนาแน่นของแอลกอฮอล์

- ก. 0.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ข. 0.8×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
ค. 1.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ง. 1.6×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

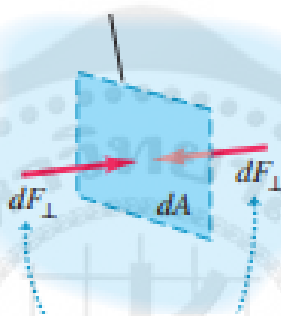
8. โปรทมีความหนาแน่น 1.36×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร จงหาความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโปรท



3. ความดันในของเหลว

เมื่อของไหล (ของเหลวหรือก๊าซ) อยู่หนึ่ง ของไหลออกแรงดันจากกับพื้นที่ผิวสัมผัสกับของไหล เช่นผนังภาชนะหรือวัตถุที่จมอยู่ในของไหล ตัวอย่างเช่น แรงที่กดขาเรา เมื่อเราห้อยขาในสระว่ายน้ำ แม้ว่าของไหลทั้งก่อนจะดูว่าอยู่หนึ่ง แต่โมเลกุลที่ประกอบเป็นของไหลเคลื่อนที่ไปมา แรงที่ของไหลกระทำเกิดจากการชนของโมเลกุลของไหลกับสิ่งแวดล้อม

ถ้าเราคิดว่ามีผิวสมมุติภายในของไหล ของไหลบนสองฝั่งของผิวออกแรงขนาดเท่ากันแต่ทิศตรงข้าม (มิเช่นนั้นผิวจะมีความเร่งและของไหลจะไม่คงอยู่หนึ่ง) พิจารณาผิวเล็ก ๆ พื้นที่ dA ซึ่งมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดหนึ่งในของไหล แรงแนวฉากที่ของไหลทำแต่ละด้านมีขนาด $dF_{\perp}$ ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 สมมติพื้นที่ dA ขนาดเล็กภายในของไหลมีแรงแนวฉาก $dF_{\perp}$ ขนาดทำต่อพื้นที่

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 375)

เรานิยามความดัน (p) ที่จุดนั้นว่าคือแรงแนวฉากต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย

$$p = \frac{dF_{\perp}}{dA} \quad (2)$$

ถ้าความดันมีค่าเท่ากันที่ทุกจุดบนผิวระนาบจำกัดพื้นที่ A เราจะได้ว่า

$$p = \frac{F_{\perp}}{A} \quad (3)$$

โดยที่ $F_{\perp}$ คือแรงแนวฉากสุทธิบนผิวด้านหนึ่ง หน่วย SI ของความดันคือ **พาสคัล(Pa)** โดย

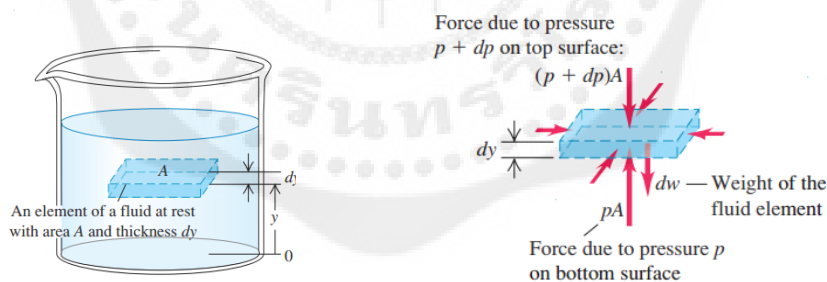
$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

ความดันบรรยากาศ (p_a) สำหรับบรรยากาศของโลก ประกอบไปด้วยโมเลกุลของก๊าซจำนวนมาก โมเลกุลของก๊าซจะมีมวลน้อยมาก โดยโมเลกุลเหล่านี้จะเคลื่อนที่อย่างอิสระ วิ่งชนผนังภาชนะ ทำให้เกิดเป็นแรงดันเนื่องจากการชนขึ้น ส่งผลให้เกิดเป็นความดันเนื่องจากบรรยากาศของโลก ดังนั้น ในระดับความสูงที่ต่างกันไม่มากนัก จึงถือว่า “ความดันบรรยากาศจะมีค่าคงที่ โดยที่ระดับน้ำทะเลจะมีค่าความดันประมาณ $1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. เรียกว่า เป็นค่าความดัน 1 บรรยากาศ (atm)”

ควรระวัง : ในกลศาสตร์ของไหล “ความดัน” และ “แรง” มีความหมายต่างกัน ความดันของไหลกระทำตั้งฉากกับผิวใด ๆ ในของไหลไม่ว่าจะวางตัวอย่างไร ดังนั้นความดันเป็นปริมาณสเกลาร์ ในทางตรงข้าม แรงเป็นเวกเตอร์ซึ่งมีทิศทางที่แน่นอน ความดันเป็นขนาดของแรงต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย

ถ้าเราไม่คำนึงถึงน้ำหนักของไหล ค่าความดันในของไหลมีค่าเท่ากันตลอดปริมาตรของไหล เราใช้การประมาณในการพิจารณาเรื่องความเค้นและความเครียดเชิงปริมาตร แต่บางกรณีเราจำเป็นต้องคำนึงถึงน้ำหนักของของไหลด้วย ยกตัวอย่างเช่น ความดันบรรยากาศที่ระดับสูงมีขนาดน้อยกว่าที่ระดับน้ำทะเล นี่เป็นเหตุผลว่าทำไมเราต้องเพิ่มความดันในห้องเครื่องบินเมื่อบินที่ระดับ 35,000 ฟุต

เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (p) ที่จุดใด ๆ ในของไหลสถิตกับระดับความสูง (y) ของจุดนั้นได้ เราสมมติว่าความหนาแน่น (ρ) ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (g) มีค่าเดียวตลอด ถ้าของไหลอยู่ในสมดุล ทุกชั้นปริมาตรจะอยู่ในสมดุล พิจารณาชั้นของไหลบางสูง



ภาพประกอบ 3 (ก) พิจารณาของไหลบางสูง dy (ข) แรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อพื้นที่ของไหลที่อยู่ในสมดุล

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 376)

ดังภาพประกอบ 3 ผิวด้านล่างและผิวด้านบนต่างมีพื้นที่ A และผิวทั้งสองอยู่ที่ความสูง y และ $y + dy$ เหนือระดับอ้างอิงที่ $y = 0$ ชิ้นของไหลมีปริมาตร $dV = A dy$ มีมวล $dm = \rho dV = \rho A dy$ และน้ำหนักคือ $dw = dm g = \rho g A dy$

แรงอื่นที่ทำต่อชิ้นของไหลนี้มีอะไรบ้าง ให้ความดันที่ผิวล่างเป็น p องค์ประกอบแกน y ของแรงที่ค้ำขึ้นสู่ผิวบนผิวนี้คือ pA ความดันที่ผิวบนคือ $p + dp$ องค์ประกอบแกน y ของแรง (ที่ลดลง) บนผิวนี้คือ $-(p + dp)A$ ชิ้นของไหลอยู่ในสมดุล ดังนั้นองค์ประกอบแกน y ของแรงซึ่งรวมน้ำหนักและแรงที่ผิวล่างกับผิวบนต้องเป็นศูนย์

$$\Sigma F_y = 0 \quad \text{ดังนั้น} \quad pA - (p + dp)A - \rho g A dy = 0$$

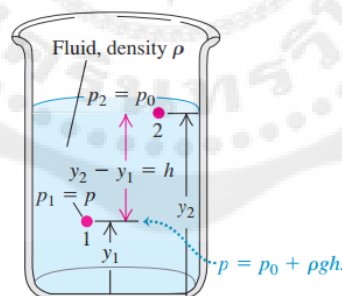
เมื่อเราหารพื้นที่ A ตลอดและจัดสมการใหม่ เราได้ว่า

$$\frac{dp}{dy} = -\rho g \quad (4)$$

สมการ (4) แสดงว่าเมื่อ y เพิ่มขึ้น p จะลดลง ถ้า p_1 และ p_2 เป็นความดันที่มีความสูง y_1 และ y_2 ตามลำดับ และถ้าความดัน p และค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก g คงตัว เราจะได้ว่า

$$p_1 - p_2 = -\rho g (y_2 - y_1) \quad (5)$$

เรานิยมเขียนสมการ (5) ในรูปของความลึกจากผิวของของไหลเพื่อความสะดวกในการคำนวณ



ภาพประกอบ 4 ความดันที่ความลึก h ในของไหลมีขนาดมากกว่าความดัน p_0 ที่ผิวอยู่เท่ากับ ρgh

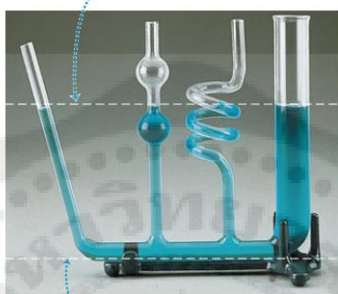
ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 377)

จากภาพประกอบ 4 เลือกจุด 1 ให้เป็นจุดใด ๆ ในของไหลและให้ p แทนความดันที่จุดนี้ ให้จุด 2 เป็นจุดที่ผิวของไหลที่มีความดันเท่ากับ p_0 (ตัวห้อยศูนย์สำหรับความลึกศูนย์) ความลึกของจุด 1 จากผิวคือ $h = y_1 - y_2$ และสมการ (5) จะเป็น

$$p_0 - p = -\rho g(y_2 - y_1) = -\rho gh$$

$$p = p_0 + \rho gh \quad (6)$$

ความดัน p ที่ความลึก h มีค่ามากกว่าความดัน p_0 ที่ผิวอยู่ ρgh สังเกตว่าความดันมีค่าเดียวกันที่จุดสองจุดใด ๆ ซึ่งอยู่ระดับเดียวกันในของไหล รูปร่างของภาชนะไม่สำคัญ ดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 ความดันในของไหลมีค่าเท่ากันที่ระดับเดียวกัน รูปร่างของภาชนะไม่มีผลต่อความดัน
ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 377)

แรงดันและความดันของของเหลวใด ๆ จะมีทิศได้ทุกทิศทาง และตั้งฉากกับผิวสัมผัส ถ้าเรานำของเหลวไปใส่ภาชนะ แรงดันและความดันของของเหลวที่กระทำต่อผนังภาชนะ จะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ แรงดันและความดันที่กดกันภาชนะและด้านข้างภาชนะ

3.1 แรงดันและความดันของเหลวที่กระทำต่อพื้นที่ก้นภาชนะ

3.1.1 กรณีที่ภาชนะบรรจุของเหลวเป็นภาชนะปิด

ในของเหลว โมเลกุลของของเหลวจะเคลื่อนที่ได้น้อย แรงดันที่กระทำต่อพื้นที่ของเหลวเกิดจากน้ำหนักของของเหลวที่กดทับบนพื้นที่ นั้นคือ

$$F = mg$$

โดยจะพบว่าของเหลวที่มีความหนาแน่นเป็น ρ ณ จุดที่ลึกจากผิวของเหลว h จะเกิดความดันเนื่องจากของเหลว (ซึ่งกดทับอยู่ด้านบน) ตามสมการ (7)

$$P_w = \rho gh \quad (7)$$

เมื่อ	P_w	คือ	ความดันที่กีดกันภาชนะ (นิวตัน/ตารางเมตร)
	F	คือ	แรงที่กีดกันภาชนะ (นิวตัน)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
	h	คือ	ความลึกเมื่อวัดจากผิวของของเหลวถึงก้นภาชนะ (เมตร)

นั่นคือ “ความดันในของเหลวที่อยู่นิ่ง ณ อุณหภูมิคงที่ จะขึ้นกับความหนาแน่นของของเหลว และความลึกของของเหลวนั่นเอง”

9. กล่องปิโตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก มีพื้นที่ฐานเท่ากับ 0.2 ตารางเมตร บรรจุน้ำบริสุทธิ์มวล 5 กิโลกรัม จงหาแรงดันและความดันของน้ำที่กีดกันภาชนะ

- ก. 50 นิวตัน และ 150 นิวตัน/ตารางเมตร
- ข. 50 นิวตัน และ 250 นิวตัน/ตารางเมตร
- ค. 100 นิวตัน และ 150 นิวตัน/ตารางเมตร
- ง. 100 นิวตัน และ 250 นิวตัน/ตารางเมตร

10. ภาชนะปิโตรรูปทรงกระบอกสูง 50 เซนติเมตร พื้นที่หน้าตัด 0.8 ตารางเมตร ฝาด้านบนเจาะเป็นรูวงกลมแล้วต่อเป็นปล่องสูง 50 เซนติเมตร ถ้าใส่น้ำจนเต็มขึ้นมาเสมอระดับปากท่อที่ต้องขึ้นมาใหม่ จงหาความดัน และแรงดันของน้ำที่ก้นภาชนะ

- ก. 4×10^3 นิวตัน และ 1×10^4 นิวตัน/ตารางเมตร
- ข. 4×10^3 นิวตัน และ 2×10^4 นิวตัน/ตารางเมตร
- ค. 8×10^3 นิวตัน และ 1×10^4 นิวตัน/ตารางเมตร
- ง. 8×10^3 นิวตัน และ 2×10^4 นิวตัน/ตารางเมตร

3.1.2 กรณีที่ภาชนะบรรจุของเหลวเป็นภาชนะเปิด

ของเหลวที่บรรจุอยู่ในภาชนะเปิดนั้น ความดันที่กระทำต่อพื้นที่ก้นภาชนะจะมี 2 อย่าง ได้แก่ ความดันบรรยากาศ (P_a) และความดันเกจ (P_g)

ค่าความดันในของเหลว ตามความสัมพันธ์ $P_w = \rho gh$ เป็นความดัน ณ จุดลึกจากผิวของเหลว เป็นระยะ h เป็นความดันอันเนื่องมาจากน้ำหนักของของเหลว แต่เนื่องจากโลกของเราอยู่ภายใต้บรรยากาศของโลก ซึ่งมีความกดดันอยู่ (แม้เราจะเคยชินจนรู้สึกเหมือนไม่มีอะไรอยู่ก็ตาม) ดังนั้นที่ผิวหน้าของของเหลว อากาศก็จะกดอยู่ด้วยความดันบรรยากาศ นั่นคือ “ความดันที่แท้จริง ณ จุดลึกจากผิวของเหลว จะประกอบด้วยความดันเนื่องจากตัวของเหลวรวมกับความดันบรรยากาศที่ผิวหน้าของของเหลว เรียกว่า ความดันสมบูรณ์ (Absolute Pressure)” สามารถเขียนได้เป็น

$$\text{ความดันสมบูรณ์ } P = P_w + P_a \text{ หรือ } P = \rho gh + P_a$$

อย่างไรก็ตามในการวัดความดันโดยปกติ เครื่องวัดจะอยู่ภายใต้ความดันบรรยากาศเช่นกัน ก่อนทำการวัดเครื่องวัดจะมีสเกลชี้ที่ศูนย์ (ทั้ง ๆ ที่ความจริงควรจะต้องชี้ที่ความดันบรรยากาศ) และเมื่อนำเครื่องวัดไปวัดค่าความดันใด ๆ ค่าที่เครื่องวัดอ่านได้จะเป็นค่าความดันที่สูงขึ้นไปกว่าความดันบรรยากาศ เพราะขณะเครื่องวัดยังไม่อ่านจะชี้เลขศูนย์ นั่นคือ ค่าความบรรยากาศอยู่ “ค่าความดันที่อ่านได้จากเครื่องวัดโดยตรงนั้น จะเรียกว่า ความดันเกจ (gauge pressure, P_g)” ซึ่งจะเป็นค่าที่ยังไม่รวมกับค่าความดันบรรยากาศ ดังนั้นเมื่อใช้เครื่องวัดวัดความดันได้เป็นความดันเกจแล้ว ค่าความดันที่แท้จริงหรือความดันสมบูรณ์คือ

$$\text{ความดันสมบูรณ์} = \text{ความดันเกจ} + \text{ความดันบรรยากาศ}$$

$$P = P_g + P_a \quad (8)$$

11. น้ำทะเลมีความหนาแน่น 1.03×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และความดันบรรยากาศที่

ระดับน้ำทะเลเป็น 1×10^5 นิวตัน/ตารางเมตร จงหาความดันสมบูรณ์ที่ใต้ทะเลลึก 100 เมตร

ก. 1×10^5 นิวตัน/ตารางเมตร

ข. 10.3×10^5 นิวตัน/ตารางเมตร

ค. 11.3×10^5 นิวตัน/ตารางเมตร

ง. 11.3×10^6 นิวตัน/ตารางเมตร

12. ณ ความลึกตำแหน่งหนึ่งใต้ทะเล วัดความดันได้ 4 เท่าของความดันที่ผิวน้ำบริเวณนั้น จงหาความลึก ณ ที่แห่งนี้ เมื่อความหนาแน่นของน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 1.025×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

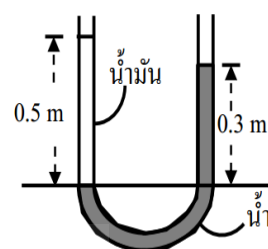
ก. 10.30 เมตร

ข. 15.25 เมตร

ค. 20.30 เมตร

ง. 29.27 เมตร

13. น้ำและน้ำมันชนิดหนึ่งบรรจุในหลอดแก้วรูปตัวยู โดยน้ำอยู่ในหลอดแก้วและน้ำมันอยู่ในภาวะสมดุลกับระดับน้ำและน้ำมัน ดังรูป จงหาความหนาแน่นของน้ำมันมีค่ากี่กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร



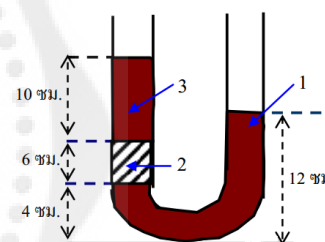
ก. 900 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ข. 700 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ค. 800 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ง. 600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

14. ของเหลว 3 ชนิด อยู่ในสภาวะสมดุลในหลอดแก้วตัวยูดังรูป ความหนาแน่นของของเหลวชนิดที่หนึ่ง และชนิดที่สองมีค่า 4.0×10^3 และ 3.0×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ความหนาแน่นของของเหลวชนิดที่สามมีค่ากี่กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ดังรูป



ก. 1.4×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ข. 1.6×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ค. 2.4×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ง. 2.8×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

15. หลอดรูปตัวยู มีขาโตเท่ากันมีของเหลวบรรจุอยู่ ถ้าเทน้ำลงไปในขาหลอดกระทั่งของเหลวในขาข้างนั้นลดลง 1 เซนติเมตร จงหาว่าน้ำสูงเท่าไร (กำหนดความหนาแน่นของของเหลว 3×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

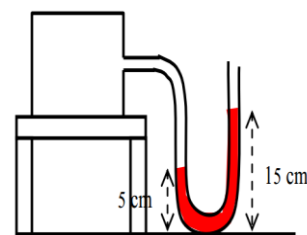
ก. 1 เซนติเมตร

ข. 4 เซนติเมตร

ค. 5 เซนติเมตร

ง. 6 เซนติเมตร

16. ขาข้างหนึ่งของแมนอมิเตอร์ที่มีปรอทบรรจุอยู่ ถูกต่อเข้ากับถังสี่เหลี่ยมที่บรรจุแก๊สชนิดหนึ่ง ปรากฏว่าระดับปรอทในขาทั้งสองข้างสูง 5 เซนติเมตร และ 15 เซนติเมตร ดังรูป ถ้าความดันของอากาศขณะนั้นเท่ากับ 10^5 พาสคัล แก๊สในถังมีความดันกี่พาสคัล กำหนดให้ความหนาแน่นปรอท 1.36×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร



- ก. 1.00×10^5 พาสคัล ข. 1.13×10^5 พาสคัล
ค. 2.00×10^5 พาสคัล ง. 2.00×10^5 พาสคัล

3.2 แรงดันและความดันของเหลวที่กระทำต่อพื้นที่ด้านข้างภาชนะ

การหาความดันของของเหลวที่กระทำต่อพื้นที่ด้านข้าง สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของความดัน ณ จุดบนสุดและจุดต่ำสุดของพื้นที่นั้น นั่นคือ

$$P_{\text{ข้าง}} = \frac{P_{\text{บนสุด}} + P_{\text{ล่างสุด}}}{2}$$

- เมื่อ $P_{\text{ข้าง}}$ คือความดันที่ดันพื้นที่ด้านข้าง (นิวตัน/ตารางเมตร)
 $P_{\text{บนสุด}}$ คือความดัน ณ จุดบนสุดของพื้นที่ (นิวตัน/ตารางเมตร)
 $P_{\text{ล่างสุด}}$ คือความดัน ณ จุดล่างสุดของพื้นที่ (นิวตัน/ตารางเมตร)

นอกจากนี้ ความดันของเหลวที่กระทำต่อพื้นที่ด้านข้าง ยังอาจหาได้จากสมการ

$$P_{\text{ข้าง}} = \rho gh$$

- เมื่อ h คือความลึกที่วัดจากผิวของของเหลวถึงจุดกึ่งกลางพื้นที่ด้านข้าง (เมตร)

การหาความดันที่กระทำต่อพื้นที่ด้านข้าง ไม่จำเป็นต้องคิดความดันบรรยากาศ (P_a) เพราะความดันบรรยากาศจะมีทั้งภายในและภายนอกภาชนะ และจะเกิดการหักล้างกันหมด

17. ถังปิตรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีความยาวด้านละ 2 เมตร เมื่อบรรจุน้ำเต็มและแรงดันของของเหลว ที่กระทำต่อพื้นที่ด้านข้างของกล่องมีขนาดเท่ากับเท่าไร

- ก. 1×10^4 พาสคัล และ 2×10^4 นิวตัน ข. 1×10^4 พาสคัล และ 4×10^4 นิวตัน
ค. 2×10^4 พาสคัล และ 2×10^4 นิวตัน ง. 2×10^4 พาสคัล และ 4×10^4 นิวตัน

18. เชื่อนก้นน้ำแห่งหนึ่งยาว 200 เมตร ก้นน้ำสูง 20 เมตร จงหาแรงดันของน้ำที่กระทำต่อเชื่อนนี้

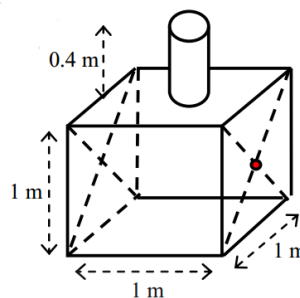
ก. 2×10^8 นิวตัน

ข. 4×10^8 นิวตัน

ค. 6×10^8 นิวตัน

ง. 8×10^8 นิวตัน

19. กล่องสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีความยาวด้านละ 1 เมตร ด้านบนมีฝาปิด ตรงกลางฝาด้านบนเจาะรูโดยขนาด 200 ตารางเซนติเมตร เสียบท่อแนวนพอดิ และเติมน้ำลงไปตามท่อ จนกระทั่งระดับน้ำเต็มท่อพอดิแล้วปิดฝาให้สนิท เมื่อท่อยาว 40 เซนติเมตร จงหาแรงดันของน้ำที่ด้านข้างแต่ละข้าง



ก. 6×10^3 นิวตัน

ข. 7×10^3 นิวตัน

ค. 8×10^3 นิวตัน

ง. 9×10^3 นิวตัน

20. เชื่อนก้นน้ำจืดแห่งหนึ่ง มีน้ำอยู่ลึก 20 เมตร ที่ฐานเชื่อนเจาะเป็นรูโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 เมตร จงหาแรงดันของน้ำที่ไหลออกไป

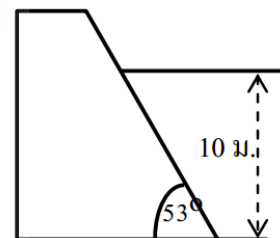
ก. 2.97×10^5 นิวตัน

ข. 4.97×10^5 นิวตัน

ค. 2.51×10^5 นิวตัน

ง. 4.51×10^5 นิวตัน

21. เชื่อนยาว 50 เมตร ผิวเชื่อนด้านข้างที่รับน้ำเอียง 53 องศา กับแนวราบในขณะที่มีน้ำสูง 10 เมตร จงหาแรงดันของน้ำที่กระทำต่อเชื่อนนี้



ก. 6.25×10^7 นิวตัน

ข. 3.12×10^7 นิวตัน

ค. 6.25×10^8 นิวตัน

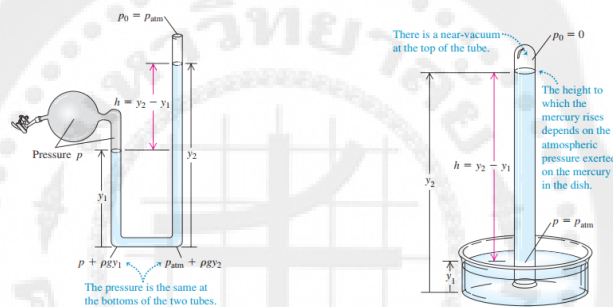
ง. 3.12×10^8 นิวตัน

3.3 เครื่องวัดความดัน

3.3.1 แมนอมิเตอร์แบบท่อปลายเปิด (manometer) เป็นเครื่องมือวัดความดันที่ง่ายที่สุดชนิดหนึ่ง ประกอบด้วย หลอดแก้วรูปตัวยูบรรจุของเหลวความหนาแน่น ρ ซึ่งมักจะเป็นปรอทหรือน้ำ ปลายหนึ่งของท่อต่อกับภาชนะที่ต้องการวัดความดัน p และอีกข้างหนึ่งเปิดสู่บรรยากาศที่ความดัน $p_0 = p_a$ ความดันที่ด้านล่างของท่อเนื่องจากของไหลในลำซ้ายมือคือ $p + \rho g y_1$ และความดันที่ด้านล่างเนื่องจากของไหลในด้านขวามือคือ $p_a + \rho g y_2$ ความดันที่จุดเดียวกันต้องเท่ากัน

$$p - p_a = \rho g(y_2 - y_1) = \rho g h \quad (11)$$

สมการ (11) p คือความดันสัมบูรณ์ และผลต่างของความดันสัมบูรณ์กับความดันบรรยากาศ $p - p_0$ คือความดันเกจ ดังนั้นความดันเกจแปรผันตรงกับผลต่างความสูง $(y_2 - y_1)$



ภาพประกอบ 6 เกจวัดความดัน (ก) แมนอมิเตอร์ และ (ข) บารอมิเตอร์ปรอท

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 378)

3.3.2 บารอมิเตอร์ปรอท (mercury barometer) เป็นเครื่องมือสำหรับวัดความดันบรรยากาศโดยตรง ประกอบด้วยหลอดแก้วปลายปิดบรรจุปรอทจนเต็มคว่ำในภาชนะที่มีปรอท โดยไม่ให้อากาศเข้าไปในหลอดที่สมดุล ปลายบนของหลอดจะเกิดเป็นสุญญากาศและความดันของลำปรอทในหลอดจะมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศด้านนอกพอดี

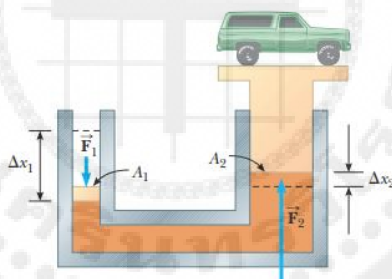
ความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล $P_a = 1.01 \times 10^5$ นิวตัน/ตารางเมตร ดังนั้น ถ้าในหลอดบรรจุปรอทที่มีความหนาแน่น $\rho = 13.6 \times 10^3$ นิวตัน/ตารางเมตร ก็จะได้ว่าความสูงของลำปรอทในหลอดแก้วเมื่อความดันข้างนอก คือ 1 บรรยากาศ คือ

$$h = \frac{1.10 \times 10^5}{13.6 \times 10^3 \times 9.8} = 0.76 \text{ เมตร}$$

จึงกล่าวได้ว่า ความดัน 1 บรรยากาศ มีค่าเท่ากับ ความสูง 760 มิลลิเมตรปรอทนั่นเอง ถ้าความดันบรรยากาศเปลี่ยนไป ก็จะทำให้ความสูงของของเหลวในหลอดเปลี่ยนไปด้วย

4. กฎของพาสคัลและเครื่องไฮดรอลิก

พาสคัล นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสได้ศึกษาสมบัติเกี่ยวกับความดันในของเหลว แล้วตั้งกฎในค.ศ. 1653 เรียกว่า กฎของพาสคัล ซึ่งกล่าวว่า “เมื่อเพิ่มความดัน ณ ตำแหน่งใด ๆ ให้กับของเหลวที่อยู่นิ่งในภาชนะปิด ความดันที่เพิ่มขึ้นจะถูกถ่ายทอดไปยังทุก ๆ จุดในของเหลว” สรุปคือ เมื่อความดันในของเหลวเพิ่มขึ้น ณ จุดใดก็ตาม ทุก ๆ จุดในของเหลว (ของเหลวนิ่งในภาชนะปิด) จะมีความดันเพิ่มขึ้นเท่าๆ กัน



ภาพประกอบ 7 หลักการทำงานของเครื่องยกไฮดรอลิก ใช้กฎของพาสคัล

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 379)

กระบอกสูบ 2 กระบอกที่มีขนาดต่างกัน มีพื้นที่หน้าตัด A_1 และ A_2 ตามลำดับ ต่อเชื่อมเข้าด้วยกัน และบรรจุของเหลวอยู่ภายใน เมื่อออกแรงกด F_1 ดันลูกสูบด้านที่มีพื้นที่หน้าตัด A_1 จะทำให้เกิด

ความดันในของเหลวเพิ่มขึ้น เป็น $P_1 = \frac{F_1}{A_1}$

ความดันที่เพิ่มขึ้นนี้ จะถูกถ่ายทอดไปยังทุก ๆ จุดในของเหลว ทำให้ที่ปลายลูกสูบอีกข้างหนึ่งที่มีพื้นที่หน้าตัด A_2 ส่งผลให้เกิดเป็นแรงดันที่ F_2 ซึ่งมีค่าเป็น

$$F_2 = P_2 A_2 = \left(\frac{F_1}{A_1} \right) A_2$$

นั่นคือ ที่กระบอกสูบนี้ จะเกิดแรงที่จะยกวัตถุที่หนัก F_2 ได้นั่นเอง เขียนเป็นสมการได้ว่า

ความดันที่เพิ่มในกระบอกสูบด้านซ้าย = ความดันที่เพิ่มในกระบอกสูบด้านขวา

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (13)$$

จากสมการ (13) หมายความว่า ถ้าเราออกแรงกด F_1 น้อย จะสามารถยกวัตถุหนัก F_2 ได้มาก ทำให้เกิดการผ่อนแรงมากขึ้น เครื่องผ่อนแรงที่อาศัยกฎของพาสคัลนี้เรียกว่า “**เครื่องอัดไฮดรอลิก**” **เครื่องมือนี้เป็นเครื่องที่ใชยกวัตถุที่มีน้ำหนักมาก**” เช่น แม่แรงยกรถ เป็นต้น เครื่องอัดไฮดรอลิก โดยทั่วไปจะมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ลูกสูบขนาดใหญ่ และลูกสูบขนาดเล็ก ซึ่งมีท่อเชื่อมต่อถึงกัน ภายในนั้นจะบรรจุของเหลวไว้ดังแสดงในภาพประกอบ 7 เมื่อจะใชยกวัตถุต้องนำลูกสูบใหญ่เป็นตัวยกวัตถุนั้น แล้วออกแรงกดที่ลูกสูบเล็กแล้วจะสามารถยกวัตถุหนักได้ โดยใช้แรงที่น้อยกว่า

การคำนวณเกี่ยวกับเครื่องอัดไฮดรอลิกนั้นจะอาศัยกฎของพาสคัล กล่าวคือ ความดันที่ลูกสูบใหญ่จะมีค่าเท่ากับความดันที่ลูกสูบเล็ก เพราะอยู่ในของเหลวเดียวกัน นั่นคือ

$$\frac{F_2}{A_2} = \frac{F_1}{A_1}$$

เมื่อ	F_2	คือน้ำหนักที่ยกได้
	F_1	คือแรงที่ใช้กด
	A_2	คือพื้นที่หน้าตัดลูกสูบใหญ่
	A_1	คือพื้นที่หน้าตัดลูกสูบเล็ก

สำหรับการได้เปรียบเชิงกลและประสิทธิภาพเชิงกลของเครื่องอัดไฮดรอลิก หาได้จาก

$$\text{การได้เปรียบเชิงกลทางปฏิบัติ (M.A.ปฏิบัติ)} = \frac{F_2}{F_1} \quad (15)$$

$$\text{การได้เปรียบเชิงกลทางทฤษฎี (M.A.ทฤษฎี)} = \frac{A_2}{A_1} \quad (16)$$

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกล (Eff)} = \frac{F_2/F_1}{A_2/A_1} \times 100\% \quad (17)$$

22. เครื่องอัดไฮดรอลิกมีลูกสูบเล็กพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางเซนติเมตร ลูกสูบใหญ่มีพื้นที่หน้าตัด 24 ตารางเซนติเมตร ถ้าต้องการให้ลูกสูบใหญ่ยกน้ำหนักได้ 80 นิวตัน ต้องออกแรงกดที่ลูกสูบเล็กกี่นิวตัน

- ก. 10 ข. 20 ค. 40 ง. 80

23. เครื่องอัดไฮดรอลิกเครื่องหนึ่งลูกสูบใหญ่มีรัศมี 1 เมตร และลูกสูบเล็กมีรัศมี 0.1 เมตร ถ้าออกแรงลูกสูบเล็ก 200 นิวตัน จะยกมวลวัตถุได้เท่าใด

- ก. 2,000 กิโลกรัม ข. 2,000 นิวตัน
ค. 20,000 กิโลกรัม ง. 200,000 นิวตัน

24. เครื่องอัดไฮดรอลิกลูกสูบใหญ่เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร และลูกสูบเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ถ้าต้องการให้ลูกสูบใหญ่ยกน้ำหนักได้ 1000 นิวตัน ต้องออกแรงที่ลูกสูบเล็กกี่นิวตัน

- ก. 125 ข. 250 ค. 1,250 ง. 2,500

25. เครื่องอัดไฮดรอลิกใช้สำหรับยกรถยนต์ ใช้น้ำมันที่มีความหนาแน่น 800 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร พื้นที่ของลูกสูบใหญ่และลูกสูบเล็กมี 1,000 และ 25 ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ต้องการยกรถยนต์หนัก 1,000 กิโลกรัม ขณะที่กดลูกสูบเล็กระดับน้ำมันในลูกสูบเล็กอยู่สูงกว่าระดับน้ำมันในลูกสูบใหญ่ 100 เซนติเมตร แรงที่กดลงบนลูกสูบเล็กมีค่าเท่าใด

- ก. 230 นิวตัน ข. 250 นิวตัน ค. 270 นิวตัน ง. 290 นิวตัน

26. เครื่องอัดไฮดรอลิกเครื่องหนึ่งใช้น้ำมันที่มีความหนาแน่น 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พื้นที่ของลูกสูบใหญ่และลูกสูบเล็กมีค่า 0.1 และ 0.02 ตารางเมตรตามลำดับ ระดับน้ำมันในลูกสูบใหญ่นั้นอยู่สูงกว่าระดับน้ำมันในลูกสูบเล็ก 20 เซนติเมตร หากต้องการยกรถยนต์หนัก 2,000 กิโลกรัม จะต้องออกแรงกดบนลูกสูบเล็กกี่นิวตัน

ก. 2,030

ข. 3,250

ค. 4,032

ง. 5,040

27. คานยกในเครื่องอัดไฮดรอลิก ดังรูป มีอัตราส่วนของ $x:y=1:4$ และ $a:A=1:50$

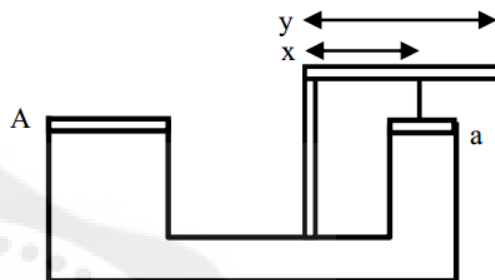
เมื่อจะยกน้ำหนัก 1×10^4 นิวตัน ต้องออกแรงที่ปลายคานโยกเท่าใด

ก. 30 นิวตัน

ข. 40 นิวตัน

ค. 50 นิวตัน

ง. 60 นิวตัน



28. เครื่องอัดไฮดรอลิกสูบใหญ่มีพื้นที่ 10 เท่าของลูกสูบเล็ก ถ้าออกแรงกดที่ลูกสูบเล็ก 5 นิวตัน ปรากฏว่าสามารถยกน้ำหนักที่ลูกสูบใหญ่ได้มากที่สุด 40 นิวตัน จงหา

1. การได้เปรียบเชิงกลทางทฤษฎี
2. การได้เปรียบเชิงกลทางปฏิบัติ
3. ประสิทธิภาพของเครื่องกล

.....

.....

.....

.....

.....

.....

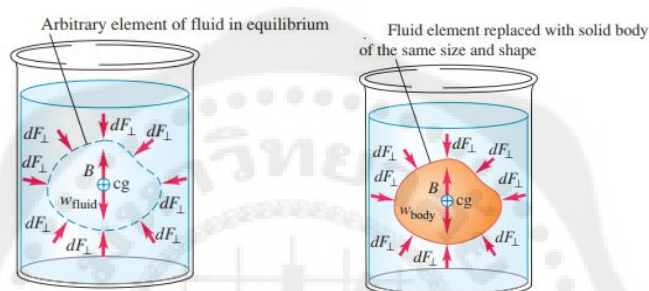
.....

.....

5. การลอยตัว

การลอยตัวเป็นปรากฏการณ์ที่เราคุ้นเคยกัน วัตถุซึ่งจมอยู่ในน้ำดูเหมือนว่าหนักน้อยกว่าเมื่ออยู่ในอากาศ เมื่อวัตถุมีความหนาแน่นน้อยกว่าของไหล วัตถุจะลอย โดยปกติร่างกายมนุษย์จะลอยน้ำ และลูกโป่งบรรจุฮีเลียมจะลอยในอากาศ

หลักของอาร์คิมิดีส กล่าวว่า “เมื่อวัตถุจมในของไหลทั้งก้อนหรือบางส่วน ของไหลจะออกแรงดันขึ้นต่อวัตถุเท่ากับน้ำหนักของไหลซึ่งถูกแทนที่” ในการพิสูจน์หลักการนี้ เราพิจารณาส่วนของไหลใดๆ ที่อยู่นิ่ง ในภาพประกอบ 8(ก) เค้าโครงไม่สม่ำเสมอคือผิวล้อมรอบของไหลส่วนนี้ถูกศรแทนแรงที่ของไหลภายนอกกระทำต่อผิวขอบเขต



ภาพประกอบ 8 (ก) ชิ้นของไหลอยู่ในสมดุลภายใต้น้ำหนักของตัวเองและแรงลอยตัวจากของไหล (ข) ชิ้นของไหลถูกแทนที่ด้วยวัตถุ B ซึ่งมีรูปร่างอย่างเดียวกันทุกประการ แรงลอยตัวมีค่าเดียวกันและเท่ากับน้ำหนักของของไหลที่วัตถุ B แทนที่

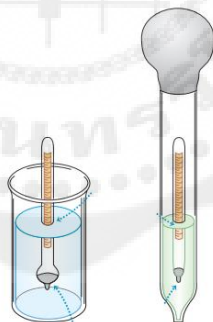
ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 380)

ของไหลทั้งหมดอยู่ในสมดุล ดังนั้นผลบวกขององค์ประกอบตามแกน y ของแรงซึ่งทำต่อของไหลส่วนนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นผลบวกขององค์ประกอบตามแกน y ของแรงซึ่งทำที่ผิวต้องเป็นแรงทิศขึ้น ขนาดเท่ากับน้ำหนัก mg ของของไหลภายในผิว นอกจากนั้นผลบวกของทอร์กซึ่งกระทำต่อของไหลส่วนนี้ต้องเป็นศูนย์ด้วย ดังนั้นแนวแรงองค์ประกอบตามแกน y ของแรงซึ่งทำต่อผิวต้องผ่านจุดศูนย์ถ่วงของของไหลนี้

เมื่อเราเอาของไหลภายในผิวออกและแทนด้วยวัตถุตัน B ซึ่งมีรูปร่างเดียวกัน ภาพประกอบ 8(ข) ความดันที่ทุกจุดเท่าเดิม ดังนั้นแรงทิศขึ้นสุทธิที่ของไหลที่ทำต่อวัตถุมีค่าเท่าเดิมด้วยขนาดเท่าน้ำหนัก mg ของของไหลซึ่งถูกแทนที่ด้วยวัตถุ เราเรียกแรงนี้ว่า **แรงลอยตัว** แนวแรงนี้ผ่านจุดศูนย์ถ่วงของของไหลซึ่งถูกแทนที่ ซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นจุดศูนย์ถ่วงของวัตถุ

เมื่อลูกโป่งลอยสมดุลในอากาศ น้ำหนักลูกโป่ง ต้องมีขนาดเท่าน้ำหนักอากาศซึ่งถูกแทนที่ด้วยลูกโป่ง เมื่อเรื่อดำน้ำซึ่งดำอยู่ในทะเลอยู่ในสภาพสมดุล น้ำหนักทั้งหมดของเรือต้องเท่ากับน้ำหนักน้ำซึ่งเรือแทนที่ วัตถุซึ่งมีความหนาแน่นเฉลี่ยน้อยกว่าของเหลวลอยอยู่บนของเหลวโดยจมบางส่วนได้ ยิ่งของเหลวมีความหนาแน่นมาก วัตถุจะยิ่งจมน้อย เมื่อคุณว่ายน้ำในทะเล ร่างกายของคุณจะลอยพินน้ำมากกว่าในน้ำจืด

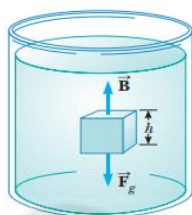
ตัวอย่างที่คุ้นเคยอีกตัวอย่างหนึ่งคือไฮโดรมิเตอร์ซึ่งใช้วัดความหนาแน่นของเหลว ภาพประกอบ 9 (ซ้าย) หลอดซึ่งมีขีดแบ่งสเกลจมลงในของเหลวจนกระทั่งน้ำหนักของเหลวซึ่งถูกแทนที่หนักเท่ากับน้ำหนักของไฮโดรมิเตอร์เอง ไฮโดรมิเตอร์ลอยสูงกว่าในของเหลวที่มีความหนาแน่นสูงเป็นตำแหน่งเสถียร และเราอ่านความหนาแน่นได้โดยตรงจากสเกลในก้านส่วนบน ภาพประกอบ 9 (ขวา) แสดงไฮโดรมิเตอร์ชนิดที่ใช้ทั่วไปสำหรับวัดความหนาแน่นของกรดแบตเตอรี่หรือน้ำยากันแข็งตัว ด้านล่างของท่อใหญ่จมอยู่ในของเหลว กระเปาะถูกบีบเพื่อไล่อากาศออกแล้วปล่อย รูปร่างไฮโดรมิเตอร์นี้เหมือนกับที่หยอดยาขนาดยักษ์ ของเหลวลอยขึ้นไปในท่ออันนอกและไฮโดรมิเตอร์ลอยอยู่ในตัวอย่างของไหลนี้



ภาพประกอบ 9 แสดงไฮโดรมิเตอร์แบบง่าย (ซ้าย) และการใช้ไฮโดรมิเตอร์เป็นตัวทดสอบกรดแบตเตอรี่หรือน้ำยากันแข็งตัว

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 381

เมื่อวัตถุก้อนหนึ่งมีปริมาตร V_c อยู่ในของเหลวที่มีความหนาแน่น ρ_A โดยผิวบนของวัตถุอยู่ลึกจากผิวของของเหลว h ของเหลวจะออกแรงดันวัตถุนี้ในทุกทิศ และตั้งฉากกับผิววัตถุเสมอ แต่ในแนวข้างด้านซ้าย-ขวา และด้านหน้า-หลัง แรงดันจากของเหลวที่กระทำต่อวัตถุจะเท่ากันจึงหักล้างกันหมดไป แต่ในแนวตั้งด้านบน-ล่าง ซึ่งมีระดับความลึกไม่เท่ากัน เพราะวัตถุมีความหนา



ภาพประกอบ 10 วัตถุในของเหลวก้อนหนึ่งมีปริมาตร V ในของเหลวความหนาแน่น ρ

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 382)

แรงดันลงจากด้านบนนั้นจะน้อยกว่าแรงดันขึ้นจากด้านล่างเสมอ ส่งผลให้เกิดแรงที่ของเหลวจะกระทำต่อวัตถุที่อยู่ในของเหลว มีทิศขึ้นในแนวตั้งเสมอ เราเรียกแรงที่ของเหลวจะกระทำต่อวัตถุนี้ว่า แรงลอยตัว (Buoyancy: B) ซึ่งจะมีค่าตามสูตร

$$B = \rho g V \quad (18)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

V คือ ปริมาตรของวัตถุที่จมอยู่ในตัวของเหลว (ลูกบาศก์เมตร)

หมายเหตุ ถ้าวัตถุจมไม่หมด V ในที่นี้จะหมายถึง เฉพาะปริมาตรของวัตถุส่วนที่จมอยู่ในของเหลวเท่านั้น

29. ปล่อยวัตถุทรงกลม 10 กรัม ที่มีปริมาตร 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงไปในน้ำ ขณะที่จมลงไปได้ระยะหนึ่งจะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ แรงลอยตัวนี้มีค่ากี่นิวตัน

ก. 5.0×10^{-2}

ข. 2.5×10^{-3}

ค. 2.0×10^{-4}

ง. 1.5×10^{-5}

30. วัตถุชิ้นหนึ่งมีมวล 2 กิโลกรัม เมื่อนำไปลอยในน้ำซึ่งมีความหนาแน่น 1,000 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร จงหาปริมาตรของวัตถุส่วนที่จมน้ำ

ก. 0.001 ลูกบาศก์เมตร

ข. 0.002 ลูกบาศก์เมตร

ค. 0.1 ลูกบาศก์เมตร

ง. 0.2 ลูกบาศก์เมตร

31. วัตถุชิ้นหนึ่งมีปริมาตร 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่น 900 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร นำวัตถุไปลอยน้ำมีความหนาแน่น 1,000 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร จงหาปริมาตรของวัตถุส่วนที่จมน้ำ

ก. 9 ลูกบาศก์เมตร

ข. 12 ลูกบาศก์เมตร

ค. 15 ลูกบาศก์เมตร

ง. 18 ลูกบาศก์เมตร

32. วัตถุทรงกลมตันลูกหนึ่งลอยอยู่ในของเหลวจมลงไปถึงลูกพอดี ถ้าของเหลวมีความหนาแน่น 1.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จงหาความหนาแน่นของวัตถุนี้ในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ก. 0.6

ข. 0.8

ค. 0.9

ง. 1.0

33. เมื่อนำวัตถุก้อนหนึ่งใส่ลงไปในน้ำ ปรากฏว่าวัตถุลอยน้ำโดยมีปริมาตรส่วนที่จมน้ำในน้ำเป็น 0.6 เท่าของปริมาตรทั้งหมด จงหาความหนาแน่นของวัตถุนี้

ก. 0.6×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ข. 0.8×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ค. 0.9×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ง. 1.0×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

34. ถ้าวัตถุเป็นน้ำแข็งและของเหลวเป็นน้ำที่มีความหนาแน่น 917 และ 1,000 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ปริมาตรส่วนที่จมและลอยคิดเป็นร้อยละเท่าใดตามลำดับ

ก. 80.5 และ 19.5

ข. 85.0 และ 15.0

ค. 88.2 และ 11.8

ง. 91.7 และ 8.3

35. เรือขนาดกว้าง 0.5 เมตร ยาว 1 เมตร สูง 0.5 เมตร จะสามารถบรรทุกทุกคนที่มีน้ำหนักเท่ากับ 60 กิโลกรัมได้มากที่สุดกี่คนเรือจึงไม่จม

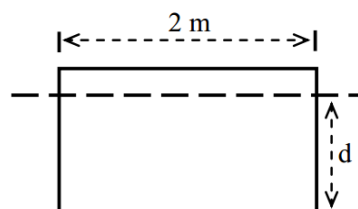
ก. 2 คน

ข. 3 คน

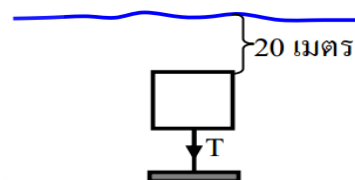
ค. 4 คน

ง. 5 คน

36. โป๊ะรูปสี่เหลี่ยมยาว 4 เมตร กว้าง 2 เมตร มีมวล 12 ตัน ลอยอยู่ในน้ำทะเลที่มีความหนาแน่น 1.03×10^3 กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร จงหาส่วนที่จม

ก. $d = 1.15$ เมตรข. $d = 1.25$ เมตรค. $d = 1.46$ เมตรง. $d = 1.55$ เมตร

37. วัตถุปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร มีมวล 500 กิโลกรัม จมอยู่ในน้ำ โดยมีเชือกตึงติดไว้ดังรูป จงหาแรงตึงเชือก



ก. 3,500 นิวตัน

ข. 4,000 นิวตัน

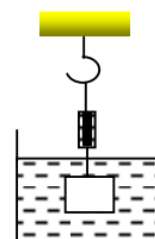
ค. 4,500 นิวตัน

ง. 5,000 นิวตัน

38. เมื่อชั่งวัตถุก้อนหนึ่งในอากาศได้ 50 นิวตัน เมื่อนำวัตถุไปชั่งในน้ำได้ 40 นิวตัน วัตถุนี้มีความหนาแน่นเท่าใด

ก. 2×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรข. 3×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรค. 4×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรง. 5×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

39. โลหะผสมมวล 2 กิโลกรัม มีความหนาแน่น 2.5×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผูกติดกับตาชั่งและจมอยู่ในน้ำดังรูป ตาชั่งจะอ่านค่าได้กี่นิวตัน



ก. 8

ข. 12

ค. 16

ง. 20

40. เมื่อชั่งมงกุฎในอากาศอ่านน้ำหนักได้ 8.5 นิวตัน เมื่อนำไปชั่งในน้ำอ่านน้ำหนักได้ 7.7 นิวตัน มงกุฎนี้ทำด้วยทองคำบริสุทธิ์หรือไม่ กำหนดให้ความหนาแน่นของทองคำบริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 19.3×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ก. บริสุทธิ์

ข. ไม่บริสุทธิ์

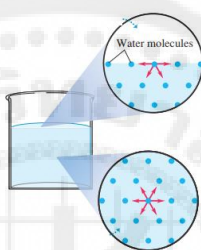
ค. ข้อมูลไม่เพียงพอที่จะหาคำตอบ

ง. เป็นไปได้ทั้งสองอย่างขึ้นกับสภาพแวดล้อม

6. ความตึงผิว

6.1 แรงตึงผิว

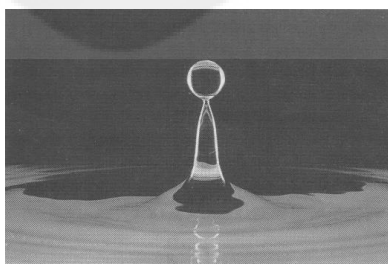
การศึกษาสมบัติของของเหลว นอกจากสมบัติเกี่ยวกับความดัน ของเหลวนั้นยังมีคุณสมบัติอีกชนิดหนึ่ง เป็นสมบัติที่เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของของเหลว โดยเป็นความพยายามที่จะยึดผิวของของเหลวไว้ กล่าวคือ เราพบว่าที่ผิวของของเหลว จะมีแรงยึดเหนี่ยวซึ่งพยายามยึดผิวของของเหลวไว้ไม่ให้ขาด แรงยึดเหนี่ยวนี้เรียกว่า **แรงตึงผิว** เราเรียกสมบัติที่ของเหลวพยายามยึดผิวของเหลวไว้ด้วยกันนี้ว่า **ความตึงผิว** (surface tension) คือ ผิวของเหลวทำจะตัวเหมือนกับเป็นแผ่นเยื่อภายใต้แรงตึง โมเลกุลของเหลวออกแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน แรงสุทธิต่อโมเลกุลซึ่งอยู่ภายในปริมาตรของเหลวเป็นศูนย์ แต่โมเลกุลที่ผิวถูกดึงเข้าหาก่อนของเหลว ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 โมเลกุลของของเหลวถูกดึงดูดด้วยโมเลกุลของเหลวรอบๆ โมเลกุลที่ถูกดึงดูดเข้าหาก่อนของเหลวซึ่งแนวโน้มที่จะลดพื้นที่ผิวของของเหลว

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 382)

ดังนั้น ของเหลวพยายามทำตัวให้มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดเหมือนกับที่แผ่นเยื่อซึ่งถูกยืดพยายามทำ หยดฝนซึ่งตกอย่างเสรีมีรูปทรงกลม เพราะว่าทรงกลมมีพื้นที่ผิวน้อยกว่ารูปร่างอื่นที่มีปริมาตรเดียวกัน ดังภาพประกอบ 12 เป็นตัวอย่างที่สวยงามของการก่อรูปของหยดทรงกลม



ภาพประกอบ 12 การกระจายของหยดน้ำทำให้เกิดลำที่เรียกว่า Rayleigh jet

ที่มา : (ปิยพงษ์ สิริตติง. 2547: 435)

แรงตึงผิวของของเหลวนั้นจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของของเหลวเท่านั้น แรงนี้มีทิศขนานกับผิวของเหลว และตั้งฉากกับแนวเส้นขอบที่ผิวของเหลวสัมผัสเสมอ เราสามารถอธิบายการเกิดขึ้นของแรงตึงผิวว่า เกิดขึ้นจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล คือระหว่างโมเลกุลของสสารจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลนี้จะแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน เรียกว่า **แรงเชื่อมแน่น** (cohesive force) และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลต่างชนิดกัน เรียกว่า **แรงยึดติด** (adhesive force)



ภาพประกอบ 13 แมลงเกาะอยู่บนผิวน้ำ

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 382)

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลนี้ ทำให้เกิดเป็นสมบัติในการรักษาผิวหน้าของของเหลวไว้ไม่ให้ขาด โดยเกิดเป็นแรงตึงผิวในแนวขนานกับผิวหน้าของของเหลวนั่นเอง และเมื่อวัตถุสัมผัสผิวของเหลว ก็จะทำให้เกิดแรงตึงระหว่างผิวของของเหลวกับวัตถุที่สัมผัส สำหรับของเหลวชนิดหนึ่งๆ ค่าอัตราส่วนของแรงตึงผิว F ต่อความยาวของแนวผิวของเหลวที่ขาด (ความยาวผิวของเหลวที่สัมผัสเส้นขอบวัตถุ) l จะมีค่าคงตัวและเรียกอัตราส่วนนี้ว่า ค่าความตึงผิว (surface Tension; γ) ของของเหลว คือ

$$\gamma = \frac{F}{l} \text{ หน่วย N/m} \quad (19)$$

ข้อควรระวัง ความยาวที่ผิวของเหลวสัมผัสวัตถุ l ในกรณีของวงแหวนหรือห่วงวงกลม ความยาวผิวของของเหลวที่สัมผัสจะต้องมีทั้งด้านในและด้านนอก

ความตึงผิวเป็นแรงต่อความยาวหนึ่งหน่วย หน่วย SI คือ นิวตัน/เมตร (N/m) แต่หน่วย cgs (dyn/cm) เป็นหน่วยที่ใช้ทั่วไปมากกว่า

ความตึงผิวของของเหลวชนิดหนึ่งๆ มักจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตารางข้างบนแสดงพฤติกรรมนี้สำหรับน้ำ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นโมเลกุลของของเหลวเคลื่อนเร็วขึ้นอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลมีผลต่อการเคลื่อนที่น้อยลงและความตึงผิวลดลง

ของไหลซึ่งสัมผัส กับอากาศ	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	ความตึงผิว (dyn/cm หรือ mN/m)
เบนซีน	20	28.9
คาร์บอนเตตระคลอไรด์	20	26.8
เอทานอล	20	22.3
กลีเซอริน	20	63.1
ปรอท	20	465.0
น้ำมันมะกอก	20	32.0
น้ำสบู่	20	25.0
น้ำ	0	75.6
น้ำ	20	72.8
น้ำ	60	66.2
น้ำ	100	58.9
ออกซิเจน	-193	15.7
นีออน	-247	5.15
ฮีเลียม	-269	0.12

ตารางที่ 2 ค่าความตึงผิวของของไหลซึ่งสัมผัสกับอากาศจากการทดลอง
ที่มา : (ปิยพงษ์ สิริคัง. 2547: 436)

ตารางที่ 2 แสดงค่าความตึงผิวของของไหลชนิดต่างๆที่ได้จากการทดลอง ค่าต่ำสุดของ เกิดใน ก๊าซเฉื่อยนีออนและฮีเลียมที่กลั่นตัวเป็นของเหลวที่แรงดึงดูดระหว่างอะตอมอ่อนมาก

ความตึงผิวของของเหลวชนิดหนึ่งๆ จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โมเลกุลของของเหลวเคลื่อนที่เร็วขึ้นอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลมีผลต่อการเคลื่อนที่น้อยลงและความตึงผิวลดลง

41. เอาห่วงลวดรัศมี 3.5 เซนติเมตร จุ่มลงในน้ำเมื่อดึงขึ้นมาต้องออกแรงเอาชนะแรงตึงผิวเท่าไร เมื่อกำหนดให้ น้ำมีความตึงผิว 7×10^{-2} นิวตัน/เมตร

- ก. 0.030 นิวตัน ข. 0.0308 นิวตัน
ค. 0.300 นิวตัน ง. 0.308 นิวตัน

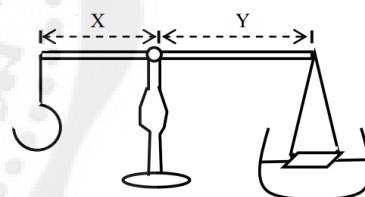
42. แผ่นโลหะรูปวงกลมมีรัศมี 5 เซนติเมตร กำลังตะกั่วน้ำหนักพอดี จงหาแรงที่ดึงแผ่นโลหะนี้ให้หลุดจากผิวน้ำพอดี เมื่อแผ่นโลหะมีมวล 25 กรัม กำหนดให้ความตึงผิวของน้ำเท่ากับ 7×10^{-2} นิวตัน/เมตร

- ก. 0.175 นิวตัน ข. 0.272 นิวตัน
ค. 0.359 นิวตัน ง. 0.598 นิวตัน

43. แผ่นโลหะบางรูปวงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร นำไปลอยอยู่บนผิวน้ำ ถ้าการที่แผ่นโลหะนี้สามารถลอยน้ำอยู่ได้เป็นผลมาจากแรงตึงผิวเพียงอย่างเดียว จงหาว่าโลหะนี้มีมวลอย่างมากที่สุดเท่าใด กำหนดให้ ความตึงผิวของน้ำเท่ากับ 7×10^{-2} นิวตัน/เมตร

- ก. 1.58 กรัม ข. 2.26 กรัม ค. 3.16 กรัม ง. 4.52 กรัม

44. ในการทดลองเพื่อศึกษาความตึงผิวของของเหลวใช้ลวดสี่เหลี่ยมจัตุรัสยาวด้านละ 5.0 เซนติเมตร ดังรูป โดยระยะ $x = 2y$ พบว่ามวลที่ทำให้ลวดหลุดออกจากผิวของของเหลวคือ 0.004 กิโลกรัม ความตึงผิวของของเหลวมีค่าเท่าไร



- ก. 0.05 นิวตัน/เมตร
ข. 0.10 นิวตัน/เมตร
ค. 0.20 นิวตัน/เมตร
ง. 0.40 นิวตัน/เมตร

45. ในการส่งท่อของลำต้นพืช สามารถส่งน้ำจากพื้นดินขึ้นไปสู่ด้านบนลำต้นได้ แสดงว่า แรงยึดติดกับแรงเชื่อมแน่น แรงใดมีค่ามากกว่ากัน

- ก. แรงยึดติด
ข. แรงเชื่อมแน่น
ค. แรงทั้งสองมีค่าเท่ากัน
ง. ข้อมูลไม่เพียงพอที่จะหาคำตอบ

ความดันลบปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความตึงผิว ตามปกติความเค้นในของเหลวเป็นความเค้นอัด แต่ในบางสถานการณ์ของเหลวสามารถรับความเค้นดึงได้ พิจารณาท่อทรงกระบอกซึ่งมีปลายเปิดด้านหนึ่งและมีลูกสูบเปิกให้เต็มท่อ โมเลกุลของเหลวเกาะติดกับทุกผิว ถ้าผิวสะอาดมากและของเหลวบริสุทธิ์ เมื่อเราดึงลูกสูบเราจะสังเกตเห็นความเค้นดึงและปริมาตรเพิ่มขึ้นนิดหน่อย เรากำลังยืดของเหลว แรงยึดติดทำให้ของเหลวนั้นไม่หลุดจากภาชนะ

7. ความหนืด

สมบัติอีกชนิดหนึ่งของของเหลวเกิดจากการที่วัตถุเคลื่อนที่ผ่านในตัวกลางของเหลว ของเหลวจะออกแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุนั้น (คล้ายๆ กับกรณีเคลื่อนวัตถุผ่านผิวสัมผัส ผิวสัมผัสจะออกแรงต้านการเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งเรียกว่า แรงเสียดทาน) สมบัติของของเหลวในการต้านการเคลื่อนที่ผ่านในตัวกลางของเหลว เรียกว่า “**ความหนืด (viscosity)**” และเรียกแรงที่ของเหลวกระทำต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในของเหลวนั้นว่า “**แรงหนืด (viscous force)**”

ความหนืดคือความเสียดทานภายในของไหล แรงหนืดต้านการเคลื่อนที่ของส่วนหนึ่งของของไหลเทียบกับอีกส่วนหนึ่ง ความหนืดทำให้เราต้องใช้ความพยายามในน้ำนิ่ง แต่ก็ก็เป็นเหตุผลว่าทำไมการพายจึงมีผลด้วย ปรากฏการณ์ความหนืดเป็นสิ่งสำคัญในการไหลของของไหลในท่อ การไหลของเลือด การหล่อลื่นส่วนเครื่องยนต์ ฯลฯ



ภาพประกอบ 16 หินละลายเป็นตัวอย่างของของไหลหนืด ความหนืดจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ที่มา : (Young, Hugh D.; & Freedman, Roger A. 2012: 389)

แรงหนืดของของเหลวนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนผ่านตัวของเหลว กล่าวคือ **เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง แรงหนืดของของเหลวที่กระทำต่อวัตถุก็จะมีค่ามาก และแรงหนืดจะขึ้นกับรูปร่างของวัตถุที่เคลื่อนผ่าน วัตถุที่รูปร่างต่างกัน เคลื่อนที่ผ่านของเหลวชนิดเดียวกัน ด้วยขนาดของความเร็วเท่ากัน ก็เกิดแรงหนืดต่างกัน**

แรงหนืดของของเหลวนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนผ่านตัวของเหลว กล่าวคือ เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง แรงหนืดของของเหลวที่กระทำต่อวัตถุก็จะมีค่ามาก และแรงหนืดจะขึ้นกับรูปทรงของวัตถุที่เคลื่อนผ่าน วัตถุที่รูปทรงต่างกัน เคลื่อนที่ผ่านของเหลวชนิดเดียวกัน ด้วยขนาดของความเร็วเท่ากัน ก็เกิดแรงหนืดต่างกัน

ข้อสรุปเกี่ยวกับความหนืดของของเหลว

1. ของเหลวที่มีความหนืดน้อยจะไหลได้เร็วกว่า ของเหลวที่มีความหนืดมาก
2. ของเหลวที่มีความหนืดมากจะมีแรงต้านมากกว่าของเหลวที่มีความหนืดน้อย
3. หากนำวัตถุเล็กๆ หย่อนลงในของเหลว ในของเหลวที่มีความหนืดมากกว่าวัตถุจะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าการเคลื่อนที่ในของเหลวที่มีความหนืดน้อย
4. ปกติแล้ว เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนืดของของเหลวจะลดลง

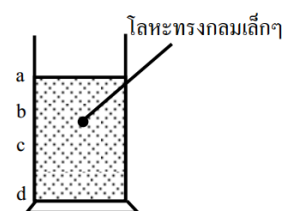
46. ลูกกลมโลหะที่ลักษณะเหมือนกันตกในของเหลวที่มีความหนืดต่างกัน ความเร็วปลายของลูกกลมโลหะทั้งสองจะแตกต่างกันหรือไม่อย่างไร

- ก. ไม่ต่างกัน
- ข. ต่างกัน แต่ความเร็วปลายจะมากหรือน้อยขึ้นกับสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ด้วย
- ค. ต่างกันโดยในของเหลวที่มีความหนืดมากกว่าวัตถุจะมีความเร็วปลายมากกว่า
- ง. ต่างกันโดยในของเหลวที่มีความหนืดมากกว่าวัตถุจะมีความเร็วปลายน้อยกว่า

47. ลูกกลมเหล็กที่มีขนาดเท่ากันสองลูก ถูกปล่อยพร้อมกันลงในหลอดบรรจุน้ำที่มีอุณหภูมิ 10 และ 20 องศาเซลเซียส ลูกกลมเหล็กใดจะถึงพื้นก่อน

- ก. ในหลอดบรรจุน้ำ 10 องศาเซลเซียส ข. ในหลอดบรรจุน้ำ 20 องศาเซลเซียส
- ค. ตกถึงกันหลอดพร้อมกัน ง. ข้อมูลไม่เพียงพอที่จะหาคำตอบ

48. เมื่อหย่อนลูกโลหะทรงกลมเล็ก ๆ ลงในทรงกระบอกที่ทำด้วยแก้ว โดยมีน้ำมัน บรรจุอยู่ ถ้าวระยะ $ab = bc = cd$ การเคลื่อนที่ของลูกโลหะเป็นไปตามข้อใด



- ก. ช่วง a ถึง b มีความเร่ง ต่อจากนั้นจะมีความเร็วคงตัว
- ข. ช่วง a ถึง b มีความหน่วงต่อจากนั้นจะมีความเร็วคงตัว
- ค. ช่วง a ถึง b มีความเร่งคงตัวตลอด
- ง. ช่วง a ถึง d มีความเร่งคงตัวตลอด

7.1 กฎของสโตกส์ (Sir George Stokes)

ในกรณีที่วัตถุที่เคลื่อนในของเหลว เป็นรูปทรงกลม มีรัศมี R เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v แรงหนืดที่ของเหลวจะต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุรูปทรงกลมนั้นจะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$F = 6\pi\eta Rv \quad (21)$$

เมื่อ η คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของของเหลวชนิดนั้น

นอกจากนี้ ความหนืดของของเหลวจะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิของของเหลวนั้นสูงขึ้น

49. จงหาแรงหนืดซึ่งต้านการเคลื่อนที่ของทรงกลมซึ่งมีรัศมี 2 มิลลิเมตร ในกลีเซอรินซึ่งมีความหนาแน่น 3×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ลูกกลมมีอัตราเร็ว 0.2 เมตร/วินาที กำหนดให้ความหนืดของกลีเซอรินมีค่าเท่ากับ 0.84 นิวตัน/ตารางเมตร

- ก. 3.16×10^{-3} นิวตัน
- ข. 4.48×10^{-3} นิวตัน
- ค. 6.33×10^{-3} นิวตัน
- ง. 8.96×10^{-3} นิวตัน

50. ปลอยทรงกลมเหล็กที่มีรัศมี 1 มิลลิเมตร ลงในน้ำ ความเร็วปลายของทรงกลมจะมีค่าเท่าใด

- ก. 11.55 เมตร/วินาที
- ข. 14.81 เมตร/วินาที
- ค. 25.53 เมตร/วินาที
- ง. 30.55 เมตร/วินาที

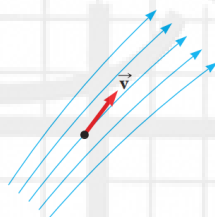
8 พลศาสตร์ของไหล

8.1 คุณสมบัติของไหลอุดมคติมี ดังนี้

- 1) เป็นการไหลโดยไม่หนืด คือ การไหลที่ไม่มีการไหลวนรอบจุดใด ๆ ในของไหล
- 2) เป็นการไหลที่ไม่มีแรงต้านเนื่องจากความหนืด คือ ไม่มีแรงต้านใด ๆ ภายในเนื้อของไหลมากระทำต่ออนุภาคของไหล
- 3) ไม่สามารถอัดได้ คือ ในทุก ๆ ส่วนของของไหลมีความหนาแน่นคงตัว

8.2 การไหลของของไหลอุดมคติ

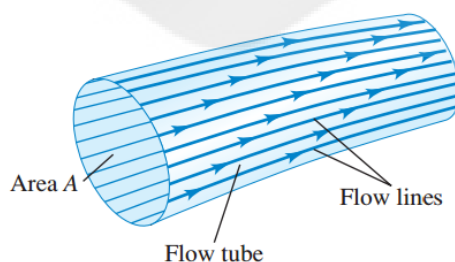
ในของไหลที่ไหลอย่างสม่ำเสมออนุภาคหนึ่ง ๆ ของของไหลจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางเดินเส้นหนึ่งเรียกว่า เส้นกระแส (streamline) โดยความเร็วของอนุภาคนั้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ มีทิศในแนวเส้นสัมผัส ณ ตำแหน่ง ภาพประกอบ 17 และเส้นกระแสของอนุภาคแต่ละเส้นจะไม่ตัดกัน ถ้าเส้นกระแสจำนวนหนึ่งอยู่เรียงกันเป็นมัด ภาพประกอบ 18 เรียกมัดของเส้นกระแสนี้ว่า หลอดของไหล (tube of flow) หลอดการไหลนี้จึงเสมือนท่อที่มีของไหลไหลเข้าทางปลายข้างหนึ่งและไหลออกทางปลายอีกข้างหนึ่ง



ภาพประกอบ 17 แสดงภาพจำลองเส้นกระแสของอนุภาคในของไหล

และความเร็วของอนุภาคที่มีทิศในแนวเส้นสัมผัสกับเส้น

ที่มา: (serway; & Jewett. 2008: 400)

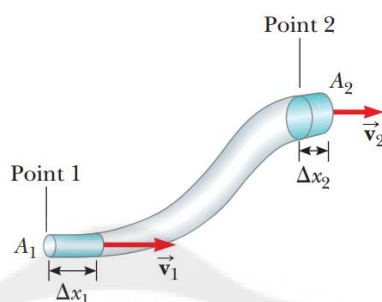


ภาพประกอบ 18 จำลองในหลอดการไหลอนุภาคไม่สามารถไหลออกนอกหลอดการไหลได้

ที่มา: (Young; & Freedman. 2000: 400)

8.3 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

สมการความต่อเนื่องเป็นสมการที่นิยมใช้ในศึกษาการไหลของของไหลภายในท่อ การไหลของของไหลในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอไหลจากจุดที่ 1 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A_1 ไปยังจุดที่ 2 พื้นที่หน้าตัด A_2 ดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 แสดงการไหลในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ

ที่มา: (Serway; & Jewett. 2008: 400)

จากภาพประกอบ 19 แสดงการไหลในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ เมื่อของไหลอุดมคติไหลอย่างสม่ำเสมอผ่านหลอดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน ปริมาตรที่ไหลผ่านพื้นที่ตัดขวาง A_1 ในเวลา Δt จะเท่ากับปริมาตรการไหลที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A_2 ในเวลา Δt ที่เท่ากัน มวลของของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่ A_1 คือ $\Delta m_1 = \rho A_1 v_1 \Delta t$ มวลของของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่ A_2 คือ $\Delta m_2 = \rho A_2 v_2 \Delta t$

ดังนั้น มวลที่ไหลผ่านแต่ละส่วนมีค่าเท่ากัน จะได้

$$\Delta m_1 = \Delta m_2 \quad (22)$$

$$\rho A_1 v_1 \Delta t = \rho A_2 v_2 \Delta t \quad (23)$$

หรือ

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (24)$$

สมการ (24) เรียกว่า สมการความต่อเนื่อง (continuity equation) สรุปได้ว่า ผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดกับอัตราเร็วของของไหลอุดมคติ ไม่ว่าจะอยู่ที่ตำแหน่งใดในท่อจะมีค่าคงตัว

51. ถ้าน้ำในท่อประปาที่ไหลผ่านมาตรวัดเข้าบ้านมีอัตราการไหล 1 ลิตรต่อวินาที จงหาอัตราเร็วของน้ำในท่อประปาเมื่อไหลผ่านท่อที่มีพื้นที่หน้าตัด 10 ตารางเซนติเมตร

ก. 1.00 เมตร/วินาที

ข. 1.414 เมตร/วินาที

ค. 1.732 เมตร/วินาที

ง. 2.12 เมตร/วินาที

52. เครื่องสูบน้ำเครื่องหนึ่งสามารถสูบน้ำได้ 0.01 ลูกบาศก์เมตร ในเวลา 10 วินาที แล้วพ่นออกไปทางท่อซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางเซนติเมตร จงหาความเร็วของน้ำที่พ่นออกไป

ก. 5 เมตร/วินาที

ข. 10 เมตร/วินาที

ค. 15 เมตร/วินาที

ง. 20 เมตร/วินาที

53. เปิดน้ำก๊อกให้ไหลลงในบีกเกอร์ความจุ 1 ลิตร จนเต็มภายในเวลา 10 วินาที ถ้าน้ำไหลออกจากก๊อกเป็นลำด้วยอัตราเร็ว 0.5 เมตร/วินาที จงหารัศมีของปลายก๊อก

ก. 0.4 เซนติเมตร

ข. 0.6 เซนติเมตร

ค. 0.8 เซนติเมตร

ง. 1.3 เซนติเมตร

54. เม็ดเลือดไหลด้วยอัตราเร็ว 10 เซนติเมตร/วินาที ในเส้นเลือดใหญ่ที่มีรัศมี 0.3 เซนติเมตร ไปสู่เส้นเลือดขนาดเล็กลง และมีรัศมี 0.2 เซนติเมตร อัตราเร็วของเม็ดเลือดในเส้นเลือดเล็กเป็นเท่าใด

ก. 15.0 เซนติเมตร/วินาที

ข. 17.5 เซนติเมตร/วินาที

ค. 22.5 เซนติเมตร/วินาที

ง. 28.5 เซนติเมตร/วินาที

55. น้ำไหลลงในแนวดิ่งจากก๊อกน้ำซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วต้น 40 เซนติเมตรต่อวินาที น้ำจะต้องไหลลงมาเป็นระยะทางกี่เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของลำน้ำจะลดลงเหลือ 1.0 เซนติเมตร

.....

.....

.....

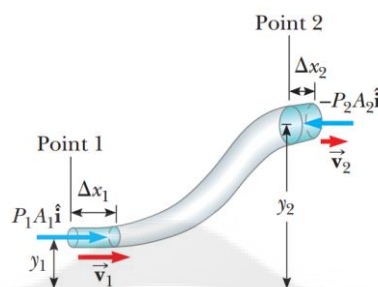
.....

.....

.....

8.4 สมการของแบร์นูลลี (Bernoulli's equation)

พิจารณาหลอดการไหลที่มีระดับต่างกัน โดยบริเวณแรกให้มีพื้นที่หน้าตัด A_1 อยู่สูงจากระดับอ้างอิง y_1 และมีความดันในของไหล P_1 ส่วนบริเวณที่ 2 มีพื้นที่หน้าตัด A_2 อยู่สูงจากระดับอ้างอิง y_2 และมีความดันในของไหล P_2 ภาพประกอบ 20 แสดงการพิจารณาของไหลที่ไหลผ่านท่อ



ภาพประกอบ 20 แสดงการพิจารณาของไหลที่ไหลผ่านท่อ
ที่มา: (serway; & Jewett. 2005: 402)

พิจารณาท่อบริเวณที่ 1 งานที่กระทำโดยแรง F_1 สามารถหาได้จากสมการ (25)

$$W_1 = F_1 \Delta x_1 = P_1 (A_1 \Delta x_1) = P_1 V \quad (25)$$

พลังงานศักย์บริเวณที่ 1 คือ

$$E_{p_1} = mgy_1 \quad (26)$$

พลังงานจลน์บริเวณที่ 1 คือ

$$E_{k_1} = \frac{1}{2} mv_1^2 \quad (27)$$

พิจารณาท่อที่บริเวณที่ 2 งานที่กระทำโดยแรง F_2 (ทิศตรงข้าม) สามารถหาได้จากสมการ (28)

$$W_2 = -F_2 \Delta x_2 = -P_2 (A_2 \Delta x_2) = -P_2 V \quad (28)$$

พลังงานศักย์บริเวณที่ 2 คือ

$$E_{p_2} = mgy_2 \quad (29)$$

พลังงานจลน์บริเวณที่ 2 คือ

$$E_{k_2} = \frac{1}{2} mv_2^2 \quad (30)$$

งานที่เกิดขึ้นจากแรงนั้น มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ จากการเคลื่อนที่ของน้ำจากบริเวณที่ 1 ไปยังบริเวณที่ 2 สามารถอธิบายได้ดังสมการ (31)

$$(P_1 - P_2)V = \left(\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \right) + (mgy_2 - mgy_1) \quad (31)$$

จาก $V = \frac{m}{\rho}$ แทนค่าในสมการ (31) จะได้

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gy_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gy_2 \quad (32)$$

นั่นคือ $P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gy = \text{ค่าคงตัว}$

เมื่อนำความหนาแน่น (ρ) ซึ่งเป็นค่าคงที่มาหารตลอดสมการที่ (32) จะได้

$$\frac{1}{2}v_1^2 + \frac{P_1}{\rho} + gy_1 = \frac{1}{2}v_2^2 + \frac{P_2}{\rho} + gy_2 \quad (33)$$

หมายเหตุ: การห้อย 1 และ 2 หมายถึงจุดที่แตกต่างกันในการไหล ซึ่งจุดที่ 1 เป็นต้นน้ำของจุดที่ 2

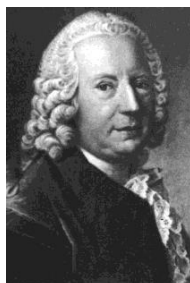
เมื่อ v คือ ความเร็วของของไหล (เมตร/วินาที)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตร/วินาทีกำลังสอง)

P คือ ความดัน (นิวตัน/ตารางเมตร)

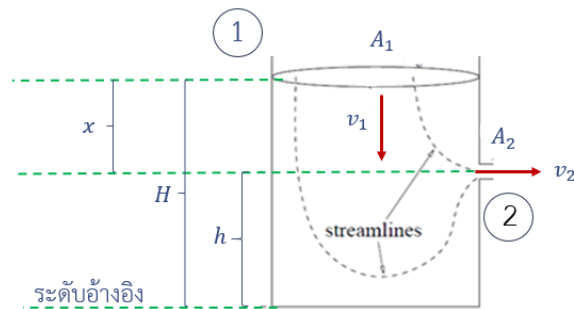
y คือ ความสูงของระดับน้ำในแต่ละจุด เมื่อเทียบกับระดับอ้างอิง (เมตร)

สมการ (33) เรียกว่า สมการของแบร์นูลลี ซึ่งกล่าวว่าผลรวมของความดัน พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และพลังงานศักย์โน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ ภายในท่อที่ของไหลผ่าน มีค่าคงตัว สมการนี้มีบทบาทมากในการแก้ปัญหาทางกลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น ซึ่งชื่อของสมการตั้งให้เป็นเกียรติยศแก่ แดเนียล แบร์นูลลี (Daniel Bernoulli) นักฟิสิกส์ชาวสวิส ผู้สร้างสมการแบร์นูลลีเป็นคนแรก



ภาพประกอบ 21 Daniel Bernoulli

8.5 การหาอัตราเร็วของของเหลวที่พุ่งออกจากรูขนาดเล็ก



ภาพประกอบ 22 การพิจารณาความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดในการทดลองแท่งก้นน้ำของทอร์ริเชลลี
ที่มา: (Eggers. 2015?: n.d.)

จากภาพประกอบ 22 แสดงการพิจารณาความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดในการทดลองแท่งก้นน้ำของทอร์ริเชลลี กำหนดบริเวณที่ 1 คือผิวน้ำในแท่งก้นน้ำ และบริเวณที่ 2 คือรูเปิด

กำหนดให้	A_1	คือ	พื้นที่หน้าตัดของแท่งก้น (ตารางเมตร)
	A_2	คือ	พื้นที่หน้าตัดของรูเปิด (ตารางเมตร)
	v_1	คือ	ความเร็วของน้ำในแท่งก้นน้ำ (เมตรต่อวินาที)
	v_2	คือ	ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิด (เมตรต่อวินาที)
	H	คือ	ความสูงของระดับน้ำเทียบกับพื้น (เมตร)
	h	คือ	ความสูงของระดับของรูเปิดเทียบกับพื้น (เมตร)
	x	คือ	ระยะห่างระหว่างระดับน้ำถึงรูเปิด (เมตร)

จากสมการ (33) สมการของแบร์นูลลี เมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในภาพประกอบ จะได้

$$\frac{1}{2}v_1^2 + \frac{P_1}{\rho} + gH = \frac{1}{2}v_2^2 + \frac{P_2}{\rho} + gh \quad (34)$$

จากสมการ (24) สมการความต่อเนื่อง เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่เพื่อหาค่า v_1 จะได้

$$v_1 = \left(\frac{A_2 v_2}{A_1} \right) \quad (35)$$

แทนค่า v_1 จากสมการ (35) ในสมการ (34) จะได้

$$\frac{1}{2} \left(\frac{A_2 v_2}{A_1} \right)^2 + \frac{P_1}{\rho} + gH = \frac{1}{2}v_2^2 + \frac{P_2}{\rho} + gh \quad (36)$$

ค่าความดัน ณ จุดที่ 1 และจุดที่ 2 คือความดันบรรยากาศ ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (36) ใหม่ได้ดังสมการ (37)

$$\frac{1}{2} \left(\frac{A_2 v_2}{A_1} \right)^2 + gH = \frac{1}{2} v_2^2 + gh \quad (37)$$

จากสมการ (37) จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$gH - gh = \frac{1}{2} v_2^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{A_2 v_2}{A_1} \right)^2 \quad (38)$$

ดึงตัวร่วมทั้งสองข้างของสมการ (38)

$$g(H - h) = \frac{1}{2} v_2^2 \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \quad (39)$$

จะเห็นได้ว่าการทดลองแท่งก้นน้ำของทอริเชลลี พื้นที่หน้าบริเวณที่ 1 (A_1) มีค่ามากกว่า พื้นที่หน้าบริเวณที่ 2 (A_2) มาก ๆ ส่งผลให้กำลังสองของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ 2 และพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ 1 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นจึงเขียนสมการ (39) ได้ใหม่เป็น

$$g(H - h) = \frac{1}{2} v_2^2 \quad (40)$$

จัดรูปสมการ (40) เพื่อหาความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิด จะได้ดังสมการ (41)

$$v_2 = \sqrt{2g(H - h)} \quad (41)$$

สมการ (41) เรียกว่า “สมการของทอริเชลลี”



ภาพประกอบ 23 อีแวนเกลิสตา ทอริเชลลี

ที่มา : (Lorenzo Lippi .1647 :Online)

อีแวนเกลิสตา ทอริเชลลี ชาวอิตาลีผู้มีชีวิตอยู่ในช่วงคริสต์ศักราช 1608-1647 เป็นผู้ประดิษฐ์คิดค้น บารอมิเตอร์ (berometer) อีกทั้งยังค้นพบหลักการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของเหลว (v) ที่ไหลผ่านรูเปิด (orifice) กับระดับความสูงของผิวของของเหลวเทียบกับระดับรูเปิด (h) ตามสมการ $v = \sqrt{2gh}$

56. แรงที่ยกปีกเครื่องบินขึ้นได้นั้นเกิดขึ้นได้อย่างไร

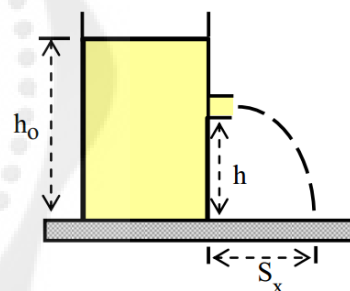
- ก. เกิดจากลมที่วิ่งผ่านปีกเครื่องบินหมุนวนยกปีกเครื่องบินขึ้น
- ข. เกิดจากลมที่พุ่งผ่านใบพัดของปีกเครื่องบินสร้างแรงยกเครื่องบินขึ้น
- ค. เกิดจากลมที่ใบพัดเครื่องบินพ่นออกมาด้านหลังสร้างแรงยกเครื่องบินขึ้น
- ง. เกิดจากความดันใต้ปีกเครื่องบินซึ่งมีค่ามากกว่าความดันเหนือปีกเครื่องบิน

57. ท่อน้ำที่ไม่สม่ำเสมอท่อนหนึ่ง ท่อตอนบนมีพื้นที่หน้าตัด 4 ตารางเซนติเมตร และอยู่สูงจากพื้น 10 เมตร ถ้าน้ำในท่อมีความดัน 1.5×10^5 พาสคัล และไหลด้วยอัตราเร็ว 2 เมตรต่อวินาที ไปยังท่อตอนล่างซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 8 ตารางเซนติเมตร และอยู่สูงจากพื้น 1 เมตร จงหาความดันของน้ำในท่อตอนล่าง

- ก. 1.41×10^5 พาสคัล
- ข. 2.42×10^5 พาสคัล
- ค. 1.41×10^6 พาสคัล
- ง. 2.42×10^6 พาสคัล

58. จากรูป ถังน้ำใบหนึ่งเติมน้ำเต็มสูง h_0 ถ้าเจาะให้มีรูรั่วที่ระดับสูงจากพื้น h จงหาว่าน้ำจะพุ่งไปได้ไกลเท่าใดในแนวนอน

- ก. $\sqrt{2h(h_0 - h)}$
- ข. $\sqrt{2hh_0}$
- ค. $2\sqrt{h_0(h_0 - h)}$
- ง. $2\sqrt{h(h_0 - h)}$



เฉลย แบบฝึกหัด

- | | | | |
|-------|-------|--------|--------------|
| 1. ข | 2. ค | 3. ข | 4. ข |
| 5. ค | 6. ค | 7. ข | 8. 13.6 |
| 9. ข | 10. ค | 11. ค | 12. ง |
| 13. ง | 14. ก | 15. ง | 16. ข |
| 17. ข | 18. ข | 19. ง | 20. ก |
| 21. ข | 22. ก | 23. ก | 24. ข |
| 25. ก | 26. ค | 27. ค | 28. 10,8,80% |
| 29. ก | 30. ข | 31. ง | 32. ก |
| 33. ก | 34. ง | 35. ข | 36. ค. |
| 37. ง | 38. ง | 39. ข | 40. ข |
| 41. ข | 42. ข | 43. ก | 44. ค |
| 45. ก | 46. ข | 47. ข | 48. ก |
| 49. ค | 50. ข | 51. ก | 52. ข |
| 53. ค | 54. ค | 55. 12 | 56. ง |
| 57. ข | 58. ง | | |

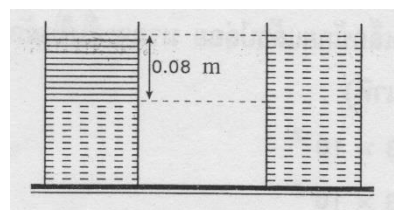
แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

เรื่อง ของไหล

คำชี้แจง : ข้อสอบปรนัย 20 ข้อ เวลา 30 นาที

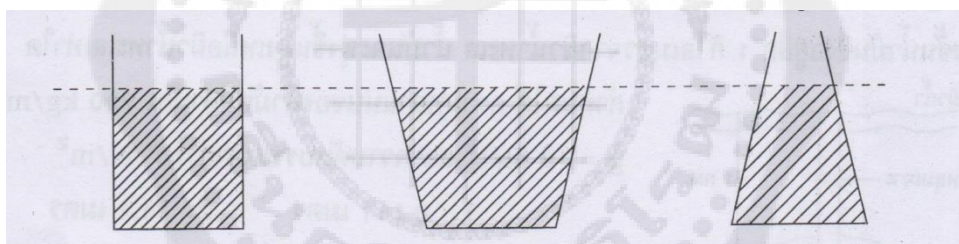
ให้นักเรียนทำเครื่องหมายกากบาท (×) ทับข้อที่ถูกต้องที่สุด

1. ถัง 2 ใบ ใบหนึ่งมีน้ำอย่างเดียว อีกใบหนึ่งมีน้ำและน้ำมัน โดยชั้นของน้ำมันสูง 0.08 เมตร ดังรูปความหนาแน่นของน้ำและน้ำมันเป็น 1,000 และ 850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ จงหาว่าความดันที่ก้นถังทั้งสองใบนั้นจะแตกต่างกันเท่าใด



- | | |
|-------------------|-------------------|
| ก. 15 กิโลพาสคัล | ข. 80 กิโลพาสคัล |
| ค. 120 กิโลพาสคัล | ง. 150 กิโลพาสคัล |

2. พิจารณาภาชนะทั้ง 3 ใบ บรรจุน้ำมันชนิดเดียวกันแต่มีปริมาตรต่างกัน ถ้าความสูงของระดับน้ำในภาชนะทั้ง 3 ใบมีค่าเท่ากัน ข้อความใดต่อไปนี้ข้อความใดถูก



- | |
|---|
| ก. ความดันที่ก้นภาชนะทั้ง 3 ใบ และน้ำหนักของน้ำมันในภาชนะแต่ละใบมีค่าเท่ากัน |
| ข. ความดันที่ก้นภาชนะทั้ง 3 ใบ และน้ำหนักของน้ำมันในภาชนะแต่ละใบมีค่าไม่เท่ากัน |
| ค. ความดันที่ก้นภาชนะทั้ง 3 ใบมีค่าไม่เท่ากัน แต่น้ำหนักของน้ำมันในภาชนะแต่ละใบเท่ากัน |
| ง. ความดันที่ก้นภาชนะทั้ง 3 ใบมีค่าเท่ากัน แต่น้ำหนักของน้ำมันในภาชนะแต่ละใบมีค่าไม่เท่ากัน |

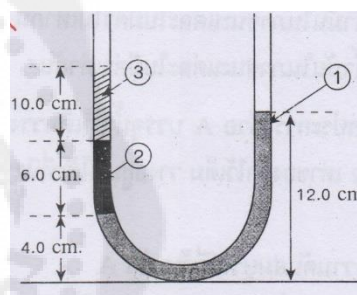
3. ถ้าความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเลเท่ากับ 10^5 พาสคัล จงหาความดันเกจที่ยอดเขาหิมาลัย ซึ่งสูง 10,000 เมตร โดนสมมติว่าอากาศมีความหนาแน่นคงที่เท่ากับ 1 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

- | | |
|-------------------|--------------------|
| ก. 0 กิโลพาสคัล | ข. 100 กิโลพาสคัล |
| ค. 200 กิโลพาสคัล | ง. -100 กิโลพาสคัล |

4. ถ้วยแก้ว 2 ใบ มีลักษณะเหมือนกัน ถ้วย A บรรจุน้ำไว้เต็มวางอยู่บนพื้นห้อง ถ้วย B บรรจุของเหลวที่มีความหนาแน่นเป็น 2 เท่าของน้ำไว้เต็มวางอยู่บนโต๊ะที่มีความสูง H ในพื้นห้องเดียวกันแสดงว่า

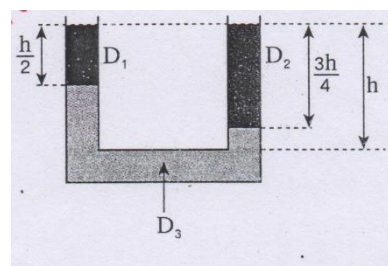
- ความดันเกจที่ก้นแก้ว B เป็น 2 เท่าของความดันเกจที่ก้นแก้ว A
- ความดันสมบูรณ์ที่ก้นแก้ว B เป็น 2 เท่า ของความดันสมบูรณ์ที่ก้นแก้ว A
- ความดันเกจที่ก้นแก้ว B เท่ากับความดันเกจที่ก้นแก้ว A ถ้า H เป็น 2 เท่าของความสูงของแก้วแต่ละใบ
- ความดันสมบูรณ์ที่ก้นแก้ว B เท่ากับความดันสมบูรณ์ที่ก้นแก้ว A ถ้า H เป็น 2 เท่า ของความสูงของแก้วแต่ละใบ

5. ของเหลว 3 ชนิด อยู่ในสภาวะสมดุลในหลอดแก้วรูปตัวยู ดังรูป ความหนาแน่นของของเหลวชนิดที่หนึ่งและที่สองมีค่า 4.0×10^3 และ 3.0×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ จงหาความหนาแน่นของของเหลวชนิดที่สาม



- 1.2×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
- 1.4×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
- 1.6×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
- 2.4×10^3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

6. ของเหลว 3 ชนิด มีความหนาแน่น D_1 , D_2 และ D_3 บรรจุในภาชนะ ดังรูป ถ้า $D_2 = 2D_1$ จงหาว่า D_3 เป็นกี่เท่าของ D_1



- | | |
|------------------|------------------|
| ก. 4 | ข. 2 |
| ค. $\frac{1}{2}$ | ง. $\frac{1}{4}$ |

7. บารอมิเตอร์ปรอทอันหนึ่ง มีความบกพร่อง เพราะมีน้ำอยู่เหนือลำปรอท ลำน้ำสูง 20.4 มิลลิเมตรลำปรอทในบารอมิเตอร์นี้จะต่ำกว่าบารอมิเตอร์ที่ปกติที่มีลิเมตร หากไม่คำนึงถึงความดันไอ น้ำ (กำหนดให้ความหนาแน่นปรอทเท่ากับ 13.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

ก. 1.0

ข. 1.5

ค. 2.0

ง. 3.0

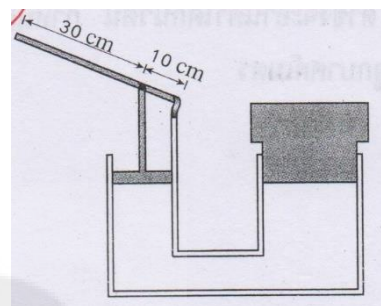
8. จากรูปแม่แรงยกรถเครื่องหนึ่ง ลูกสูบใหญ่มีพื้นที่เป็น 25 เท่าของลูกสูบเล็ก ถ้าต้องการใช้แม่แรงนี้ยกรถมวล 2000 กิโลกรัม จะต้องออกแรง F กดที่ปลายคันโยกของแม่แรงกี่นิวตัน

ก. 200

ข. 270

ค. 500

ง. 800



9. เครื่องอัดไฮดรอลิกใช้สำหรับยกรถยนต์เครื่องหนึ่งใช้น้ำมันที่มีความหนาแน่น 800 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร พื้นที่ของลูกสูบใหญ่และลูกสูบเล็กมีค่า 1000 และ 25 เซนติเมตร ตามลำดับ ถ้าต้องการยกรถยนต์หนัก 1000 กิโลกรัม ขณะที่กดลูกสูบเล็กระดับน้ำมันในลูกสูบเล็กอยู่สูงกว่าระดับน้ำมันในลูกสูบใหญ่ 100 เซนติเมตร แรงที่กดลงบนลูกสูบเล็กมีค่ากี่นิวตัน

ก. 230

ข. 250

ค. 500

ง. 800

10. เรือขนาดกว้าง 0.5 เมตร ยาว 1 เมตร สูง 0.5 เมตร จะสามารถบรรทุกคนที่มีน้ำหนักเท่ากับ 60 กิโลกรัม ได้อย่างมากที่สุดกี่คน จึงไม่ทำให้เรือลำนี้น้จม กำหนดให้มวลของเรือเท่ากับ 40 กิโลกรัม

ก. 2

ข. 3

ค. 4

ง. 5

11. เมื่อกดลูกบอลพลาสติกมีปริมาตร 5 ลิตร ให้จมมิดในของเหลวชนิดหนึ่ง พบว่าต้องใช้แรง 20 นิวตัน ถ้ากดลูกบอลนี้ให้จมมิดในน้ำต้องใช้แรง 35 นิวตัน ของเหลวนี้นี้มีความหนาแน่นกี่กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ก. 500

ข. 600

ค. 700

ง. 900

12. ศีรษะรูป แล้วตอบคำถาม โลหะมวล 2 กิโลกรัม มีความหนาแน่น

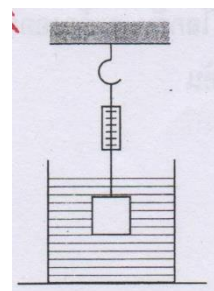
2.5×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผูกติดกับตาชั่งและจมอยู่ในน้ำ ตาชั่งจะอ่านค่าได้กี่นิวตัน

ก. 8

ข. 12

ค. 16

ง. 28



13. แผ่นโลหะบางมากรูปวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร นำไปลอยอยู่บนผิวน้ำ ถ้าการที่แผ่นโลหะนี้สามารถลอยน้ำอยู่ได้เป็นผลมาจากแรงตึงผิวอย่างเดียว จงหาว่าโลหะนี้มีมวลอย่างมากที่สุดเท่าใด กำหนดให้ความตึงผิวของน้ำมีค่าเท่ากับ 0.072 นิวตัน/เมตร

ก. 1.58 กรัม

ข. 2.26 กรัม

ค. 3.16 กรัม

ง. 4.52 กรัม

14. พิจารณาข้อความต่อไปนี้ ข้อใดถูก

1. แรงตึงผิวของของเหลวจะมีทิศขนานกับผิวของของเหลว
2. แรงตึงผิวของของเหลวจะมีทิศตั้งฉากกับผิวของของเหลว
3. ความตึงผิวของของเหลวคืออัตราส่วนของแรงตึงผิวต่อความยาว
4. ความตึงผิวของของเหลวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของของเหลวเพิ่มขึ้น

ก. 1 และ 4

ข. 2 และ 4

ค. 1 และ 3

ง. 2 และ 3 และ 4

15. พิจารณาข้อความต่อไปนี้ ข้อใดถูก

1. เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนืดของของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น
2. เมื่อนำวัตถุกำลังจมลงในของเหลว แรงหนืดมีทิศทางเดียวกันกับแรงลอยตัว
3. เมื่อนำวัตถุกำลังจมลงในของเหลวความเร็วกลายเป็นความเร็วของวัตถุขณะที่แรงหนืดเป็นศูนย์

ก. 1

ข. 1 และ 2

ค. 2 และ 3

ง. 1 และ 3

16. เมื่อทิ้งลูกกลมเหล็กลงในน้ำที่บรรจุอยู่ในภาชนะที่สูงมาก และระดับน้ำในภาชนะก็สูงด้วย ในขณะที่ลูกกลมเคลื่อนที่อยู่ในน้ำ จงพิจารณาข้อความต่อไปนี้ ข้อใดถูก

1. แรงหนืดจะมีค่าลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์
2. แรงหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากที่สุดแล้วคงตัวต่อไป
3. ความเร็วของลูกกลมเหล็กลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์
4. ความเร่งของลูกกลมเหล็กลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์

ก. 1 และ 3

ข. 1 และ 4

ค. 2 และ 4

ง. 1 และ 3 และ 4

17. น้ำไหลลงในแนวดิ่งจากก๊อกน้ำซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง 2.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วต้น 40 เซนติเมตรต่อวินาที น้ำจะไหลลงมาเป็นระยะทางกี่เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของลำน้ำจะลดลงเหลือ 1 เซนติเมตร

ก. 0.12

ข. 0.24

ค. 12

ง. 24

18. สายยางรดน้ำต้นไม้มีพื้นที่หน้าตัดภายในของท่อ 3.5 ตารางเซนติเมตร ที่ปลายท่อข้างหนึ่งต่อกับหัวฉีด ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 0.25 ตารางเซนติเมตร เมื่อเปิดน้ำให้ไหลผ่านท่อ โดยคนสวนยกหัวฉีดสูงจากพื้น 1.50 เมตร น้ำที่ไหลผ่านท่อที่วางอยู่บนพื้นมีความเร็ว 50 เซนติเมตร/วินาที อยากทราบว่าความดันในท่อส่วนที่วางอยู่กับพื้นมีค่าเป็นกี่เท่าของความดัน 1 บรรยากาศ

ก. 1.2

ข. 1.4

ค. 1.8

ง. 2.0

19. ของเหลวชนิดหนึ่งไหลอย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการหมุนไปตามท่อกลมซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอ ตลอดความยาวท่อ ดังรูป ให้หาความสูง d ที่แสดงในรูปในหน่วยของเซนติเมตร

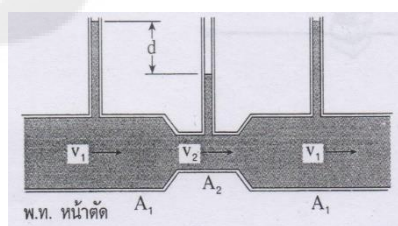
ถ้า $\frac{A_1}{A_2} = \frac{5}{3}$ และ $v_1 = 60$ เซนติเมตร/วินาที

ก. 3.2

ข. 3.0

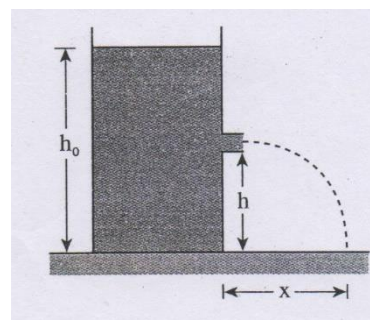
ค. 4.8

ง. 2.8



20. จากรูป ถังน้ำใบหนึ่งเติมน้ำเต็มสูงจากพื้น h_0 ถ้าเจาะให้มีรูรั่วที่ระดับสูงจากพื้น h จงหาว่าน้ำจะพุ่งไปได้ไกลเท่าใดในแนวระดับ

- ก. $\sqrt{2h(h_0 - h)}$
- ข. $\sqrt{2h_0(h_0 - h)}$
- ค. $2\sqrt{h_0(h_0 - h)}$
- ง. $2\sqrt{h(h_0 - h)}$



เฉลย แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

1. เฉลย ข้อ ค. สมมติระดับน้ำให้ถึงใบแรกสูง h และน้ำมันสูง 0.08 เมตร

∴ ระดับน้ำในถังใบที่สองจะสูง $(h + 0.08)$ เมตร

ความดันที่ก้นถังใบแรก ; $P_1 = P_{\text{water}} + P_{\text{oil}}$

$$P_1 = \rho_w gh + \rho_o g(0.08)$$

ความดันที่ก้นถังใบที่สอง; $P_2 = \rho_w g(h + 0.08)$

ผลต่างความดันก้นถังสองใบ

$$\Delta P = P_2 - P_1 = (\rho_{\text{water}} - \rho_{\text{oil}}) g(0.08)$$

แทนค่า; $\Delta P = (1000 - 850)(10)(0.08)$

$$\Delta P = 120 \text{ พาสคัล}$$

2. เฉลย ข้อ ง.

ความดันของของเหลว $P = \rho gh + P_a$

∴ เมื่อระดับน้ำ (h) ในภาชนะทั้ง 3 เท่ากัน จะให้ความดันที่ก้นภาชนะทั้ง 3 เท่ากัน แต่น้ำหนัก $W = mg$ โดยมวล $m = \rho V$ ในถังทั้ง 3 ใบ มีปริมาตร V ไม่เท่ากัน จึงมีมวลไม่เท่ากัน น้ำหนักของน้ำในภาชนะแต่ละใบจึงมีค่าไม่เท่ากัน

3. เฉลย ข้อ ง. สมมติความดันที่ระดับน้ำทะเลเกิดจากล้าอากาศสูง h เกิดความดัน 10^5 Pa

จากสูตรความดัน ; $P = \rho gh$

แทนค่า $10^5 = (1)(10)h$

∴ ความสูงของล้าอากาศที่กดระดับน้ำทะเล ; $h = 10^4 = 10000$ เมตร

ความดันที่ยอดเขาจะเกิดจากล้าอากาศสูง ;

$$h' = h - 10000 = 10000 - 10000 = 0$$

∴ ความดันที่ยอดเขาเท่ากับ 0 เพราะไม่มีอากาศกดเลย

จากความดันเกจ ; $P_g = P - P_a$

∴ ที่ยอดเขาจะมีความดันเกจ ; $P_g = 0 - P_a = -10^5 \text{ Pa}$

$$P_g = -100 \text{ kPa}$$

4. เฉลย ข้อ ก. ความดันสมบูรณ์ = ความดันเกจ + ความดันอากาศ

$$P = P_g + P_a$$

ความดันเนื่องจากของเหลวเองจะเป็นความดันเกจ

$$P_g = P_w = \rho gh \text{ เมื่อ } h \text{ คือความลึกจากผิวของเหลว}$$

ถ้วย 2 ใบ เหมือนกัน และบรรจุน้ำเต็ม $h_A = h_B = h$

ความหนาแน่นในถ้วย A = ρ ดังนั้น $P_g(A) = \rho gh$

ความหนาแน่นในถ้วย B = 2ρ ดังนั้น $P_g(B) = (2\rho)gh$

$\therefore$ ความดันเกจที่ก้นถ้วย B เป็น 2 เท่าของความดันเกจที่ก้นถ้วย A

5. เฉลย ข้อ ข. ของเหลวในหลอดทั้ง 2 ข้างจะดันซึ่งกันและกันจนสมดุล (เท่ากัน) แต่กันหลอด 2 ข้างมีของเหลวชนิดเดียวกันสูง 4 เซนติเมตร เหมือนกันจึงหักล้างกัน สามารถคิดความดันแต่ละข้างที่ระดับ 0

$$P_{\text{ซ้าย}} = P_{\text{ขวา}}$$

$$\rho_3 gh_3 + \rho_2 gh_2 + P_a = \rho_1 gh_1 + P_a$$

$$\text{แทนค่า ; } \rho_3(10)(0.1) + (3 \times 10^3)(10)(0.06) = (4 \times 10^3)(10)(0.08)$$

ความหนาแน่นชนิดที่ 3 ; $\rho_3 = 1.4 \times 10^3$ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

6. เฉลย ข้อ ก. ของเหลวในหลอด 2 ข้าง จะดันซึ่งกันและกันจะสมดุล แต่กันหลอด 2 ข้าง มีของเหลวเดียวกันที่สูงเท่ากัน จะหักล้างกัน

$$P_{\text{ซ้าย}} = P_{\text{ขวา}}$$

$$\rho_d gh_d + \rho_3 gh_3 + P_a = \rho_2 gh_2 + P_a$$

$$\text{แทนค่า ; } D_1 g \left(\frac{h}{2} \right) + D_3 g \left[\frac{3h}{4} - \frac{h}{2} \right] = D_2 g \left(\frac{3h}{4} \right)$$

$$D_1 \left(\frac{h}{2} \right) + D_3 \left(\frac{h}{4} \right) = D_2 \left(\frac{3h}{4} \right)$$

$$\text{แต่ } D_2 = 2D_1 ; \frac{D_1}{2} + \frac{D_3}{4} = (2D_1) \left(\frac{3}{4} \right)$$

$$D_3 = 6D_1 - 2D_1$$

$$D_3 = 4D_1$$

7. เฉลย ข้อ ข. ให้บารอมิเตอร์อันปกติซึ่งมีปรอทอย่างเดียวนั้น มีความสูงของลำปรอทเท่ากับ H มิลลิเมตร ให้บารอมิเตอร์อันที่บกพร่องมีลำปรอทสูงเท่ากับ h มิลลิเมตร โดยมีน้ำเป็นลำสูง 20.4 มิลลิเมตร จากสมดุล; ความดันปรอท + ความดันน้ำ = ความดันบรรยากาศ = บารอมิเตอร์ปกติ

$$\text{จะได้ ; } \rho_{\text{ปรอท}} gh + \rho_{\text{น้ำ}} gh = \rho_{\text{ปรอท}} gH$$

$$\text{แทนค่า ; } (13.6)h + (1)(20.4) = (13.6)H$$

$$1.5 = H - h$$

$\therefore$ ลำปรอทในบารอมิเตอร์นี้จะต่ำกว่าลำปรอทในบารอมิเตอร์ปกติ คือ

$$H - h = 1.5 \text{ มิลลิเมตร}$$

8. เฉลย ข้อ ก. พิจารณาที่ลูกสูบเล็กและลูกสูบใหญ่ (หลอดตัวชู)

$$\text{สมมติแรงกดลูกสูบเล็ก} = F'$$

$$\text{จากกฎของพาสคัล } P_{\text{ซ้าย}} = P_{\text{ขวา}}$$

$$\text{แต่ } P = \frac{F}{A}; \quad \frac{F'}{a} = \frac{W}{A}$$

$$\text{จากโจทย์ ; } A = 25a \text{ และ } W = mg = 2000(10)$$

$$\text{แทนค่า } \frac{F'}{a} = \frac{20000}{25a}$$

$$F' = 800$$

พิจารณาที่คาน ; จากสมดุลต่อการหมุน

$$M_{\text{พวงห้อย}} = M_{\text{ตามเข็ม}}$$

$$\text{จะได้ ; } F(40) = F'(10)$$

$$F(40) = (800)(10)$$

$\therefore$ ต้องออกแรงกดที่คานโยก ; $F = 200$ นิวตัน

9. เฉลย ข้อ ก. จากโจทย์ $A = 1000$ ตารางเซนติเมตร

$$a = 25 \quad \text{ตารางเซนติเมตร}$$

$$\text{ต้องการยก } W = mg = 1000(10) = 10000 \text{ N}$$

$$\text{สมมติออกแรงดัน } F \text{ กดลูกสูบเล็ก จะเกิดความดันที่กด ; } P = \frac{F}{a}$$

จากสมดุลของความดันที่ระดับเดียวกันของของเหลวในหลอดตัวยู

$$P_{\text{ซ้าย}} = P_{\text{ขวา}}$$

จะได้
$$\frac{F}{a} + \rho gh = \frac{W}{A}$$

แทนค่า ;
$$\frac{F}{25 \times 10^{-4}} + 800(10)(1) = \frac{10000}{1000 \times 10^{-4}}$$

$$\frac{F}{25 \times 10^{-4}} = 10 \times 10^4 - 8000$$

$$F = 92000 \times 25 \times 10^{-4}$$

ต้องออกแรงกดลูกสูบเล็ก ; $F = 230$ นิวตัน

10. เฉลย ข้อ ข. สมมติ บรรทุกคนได้ทั้งหมด x คน

∴ มวลรวมของเรือและคน ; $m = 40 + 60x$

ทำให้เรือปริ่มน้ำพอดี (ยังไม่จม)

จะได้ว่า แรงลอยตัวของน้ำ = น้ำหนักของเรือและคน

$$\rho g V_c = mg$$

แทนค่า ; $10^3(10)[0.5 \times 1 \times 0.5] = (40 + 60x)(10)$

$$250 = 40 + 60x$$

$$x = \frac{210}{60} = 3.5$$

∴ จำนวนคนบรรทุกได้มากที่สุดที่เรือไม่จมคือ 3 คน

11. เฉลย ข้อ ค. สมมติ ลูกบอลพลาสติกมีมวล m

จากสมดุล ; แรงกด + น้ำหนัก = แรงลอยตัว

จากแรงลอยตัว $B = \rho_A g V_c$

จะได้
$$F + mg = \rho_A g V_c$$

แทนค่าในน้ำ ;
$$35 + mg = 10^3(10)(5 \times 10^{-3})$$

$$mg = 15$$

แทนค่าในของเหลว
$$F + mg = \rho_A g V_c$$

$$20 + 15 = \rho_A(10)(5 \times 10^{-3})$$

ความหนาแน่นของของเหลว $\rho_A = 700 \text{ kg/m}^3$

หมายเหตุ 1 ลิตร = 1 ลูกบาศก์เมตร = $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

12. เฉลย ข้อ ข. สมมติ ตาซึ่งอ่านค่า = T

แรงที่กระทำต่อวัตถุเป็นดังรูป ; จากสมดุลจะได้

$$T + B = mg \quad (1)$$

แต่ $B = \rho_A g V_C$ จะได้ ; $T + \rho_A g V_C = mg$

จาก $m = \rho_C V_C$ จะได้ ; $V_C = \frac{m}{\rho_C}$ แทนในสมการ (1)

$$T + \rho_A g \left(\frac{m}{\rho_C} \right) = mg$$

แทนค่า ; $T + 10^3 (10) \left(\frac{2}{2.5 \times 10^3} \right) = (2)(10)$

$$T + 8 = 20$$

$\therefore$ ตาซึ่งจะอ่านได้

$$T = 12 \text{ นิวตัน}$$

13. เฉลย ข้อ ก . จากแรงตึงผิว $F = \gamma l = \gamma (2\pi R)$

แผ่นโลหะลอยอยู่ได้ แสดงว่าสมดุล ; $\sum F = 0$

$$mg = \gamma (2\pi R)$$

แทนค่า ; $m(10) = (0.072) \left(2 \times \frac{22}{7} \times \frac{0.07}{2} \right)$

$$m = 1.58 \times 10^{-3} \text{ กิโลกรัม} = 1.58 \text{ กรัม}$$

14. เฉลย ข้อ ง. แรงตึงผิวมีทิศขนานกับผิวของของเหลว อัตราส่วนของแรงตึงผิวต่อความยาวผิวที่สัมผัสคือ ความตึงผิว และความตึงผิวจะลดลงเมื่อของเหลวมีอุณหภูมิสูงขึ้น

15. เฉลย ข้อ ก. ข้อ 1 ถูก เพราะแรงลอยตัวมีทิศขึ้นในแนวตั้ง และแรงหนืดมีทิศต้านการเคลื่อนที่เมื่อวัตถุ

กำลังจุมแรงหนืดจึงมีทิศขึ้นตามแนวดิ่ง ทิศเดียวกับแรงลอยตัว

ข้อ 2 ผิด เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดของของเหลวจะลดลง

ข้อ 3 ผิด เพราะความเร็วปลายเป็นความเร็วเมื่อวัตถุอยู่ในสภาพสมดุล คือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อแรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุเป็นศูนย์ โดยขณะนั้นแรงหนืดก็จะมีค่าคงที่

16. เฉลย ข้อ ง. เมื่อทิ้งลูกเหล็กลงในน้ำ ความเร็วต้นของลูกเหล็กคือศูนย์ แต่เนื่องจากน้ำหนักของลูกเหล็กจะมากกว่าแรงลอยตัวของน้ำ แรงลัพธ์จึงมีทิศลง ทำให้ลูกเหล็กมีความเร่ง ความเร็วของลูกเหล็กจึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น น้ำจะออกแรงหนืดต้านการเคลื่อนที่ของลูกเหล็ก ซึ่งแรงหนืดนี้จะแปรตามความเร็ว ทำให้แรงลัพธ์มีค่าน้อยลง ความเร่งของลูกเหล็กจึงค่อยๆ ลดลง แต่ความเร็วของลูกเหล็กยังเพิ่มขึ้น แรงลัพธ์จึงน้อยลงอีกจนในที่สุดแรงหนืดจะเพิ่มขึ้นจนทำให้แรงลัพธ์เป็นศูนย์ ทำให้ความเร่งเป็นศูนย์ ลูกเหล็กจะเคลื่อนที่ต่อไปด้วยความเร็วคงที่ แรงหนืดจึงคงที่ด้วย

∴ คำตอบที่ถูกต้อง คือ ง. ข้อ 2 และ 4 ถูก

17. เฉลย ข้อ ค. จากสูตรอัตราการไหลของของเหลวคงที่

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

แต่ $A = \pi R^2 = \frac{\pi d^2}{4}$ เมื่อ d คือเส้นผ่านศูนย์กลาง

$$\text{จะได้ ; } \left(\frac{\pi d_1^2}{4} \right) v_1 = \left(\frac{\pi d_2^2}{4} \right) v_2$$

$$d_1^2 v_1 = d_2^2 v_2$$

$$\text{แทนค่า ; } (2)^2 v_1 = (1)^2 v_2$$

$$4v_1 = v_2$$

แสดงว่าลำนํ้าจะลดลงจาก $d_1 = 2\text{cm}$ เป็น $d_2 = 1\text{cm}$

นํ้าจะต้องมีความเร็วเป็น $v_2 = 4v_1 = 4(0.4) = 1.6\text{m/s}$

จากสูตรในการตกของวัตถุ ; $v^2 = u^2 + 2as$ โดย $a = g = 10\text{m/s}^2$

$$\text{แทนค่า ; } (1.6)^2 = (0.4)^2 + 2(10)s$$

$$s = \frac{2.56 - 0.16}{20}$$

∴ น้ำต้องตกลงมาเป็นระยะ $s = 0.12m = 12cm$

18. เฉลย ข้อ ข. หาความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านหัวฉีด จากสมการอัตราการไหลคงที่

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

แทนค่า ; $(3.5 \times 10^{-4})(0.5) = (0.25 \times 10^{-4})v_2$

∴ อัตราเร็วของน้ำที่หัวฉีด $v_2 = 7m/s$

ความสัมพันธ์ของความเร็วกับความดัน จะเป็นไปตามสมการแบร์นูลลี คือ

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2$$

แทนค่า

$$P_1 + \frac{1}{2} (1 \times 10^3) (0.5)^2 + 0 = (1 \times 10^5) + \frac{1}{2} (1 \times 10^3) (7)^2 + (1 \times 10^3) (10) (1.5)$$

$$P_1 + 0.125 \times 10^3 = (1 \times 10^5) + (24.5 \times 10^3) + (15 \times 10^3)$$

$$P_1 = 1.39 \times 10^5$$

∴ ความดันในท่อส่วนที่วางอยู่บนพื้น จะมีความดันเป็น $P_1 = 1.39$ เท่าของความดันบรรยากาศ

19. เฉลย ข้อ ก. จากสูตรอัตราการไหลของเหลว $A_1 v_1 = A_2 v_2$

$$\therefore v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1$$

แทนค่า ; $v_2 = \frac{5}{3} (60) = 100cm/s = 1m/s$

จากสมการแบร์นูลลี ; $P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2$

แต่ $h_1 = h_2$ จะได้ $P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$ (1)

เมื่อเทียบเป็นความสูงของของเหลว จะเขียนได้ว่า $P = \rho g h$

$$\therefore P_1 - P_2 = \rho g h_1 - \rho g h_2 = \rho g d$$

แทนในสมการ (1); $\rho g d = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$

$$10d = \frac{1}{2}(1^2 - 0.6^2)$$

$$d = \frac{0.32}{10} = 3.2 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$d = 3.2 \text{ cm}$$

20. เฉลย ข้อ ง. หาความเร็วของน้ำที่พุ่งออกจากรูรั่ว (สมมติเป็น v) จากสูตรแบร์นูลลี

$$\left[P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 \right]_{\text{ที่ผิว}} = \left[P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2 \right]_{\text{ที่รูรั่ว}}$$

$$\text{แทนค่า ; } \left[P_a + 0 + \rho g h_0 \right] = \left[P_a + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h \right]$$

$$\rho g (h_0 - h) = \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$\therefore \text{ความเร็วที่รูรั่ว ; } v = \sqrt{2g(h_0 - h)}$$

เมื่อน้ำพุ่งออกจากรูรั่วจะเคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์ โดยมี

$$u_x = v = \sqrt{2g(h_0 - h)} \text{ และ } u_y = 0$$

พิจารณาการเคลื่อนที่ในแกน y ; จากสูตร $s = ut + \frac{1}{2}at^2$; $a_y = g$

$$\text{แทนค่า ; } h = 0 + \frac{1}{2}gt^2$$

$$\therefore \text{เวลาที่ตกถึงพื้น ; } t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

พิจารณาการเคลื่อนที่ในแกน x ; ซึ่งใช้เวลาเดียวกัน แต่ $a_x = 0$

$$\text{จากสูตร } s = ut + \frac{1}{2}at^2$$

$$\text{แทนค่า } x = \sqrt{2g(h_0 - h)} \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

$$\therefore \text{ระยะที่ตกพื้นจะไกล ; } x = 2\sqrt{h(h_0 - h)}$$

บทปฏิบัติการฟิสิกส์
การทดลองแท่งก้ำน้ำของทอรรี่เซลล์



คำนำ

บทปฏิบัติการฟิสิกส์เรื่อง การทดลองแท่งก้ำน้ำของทอร์ริเชลลี จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอรูปแบบการใช้งานชุดการทดลองของแท่งก้ำน้ำทอร์ริเชลลี สำหรับนิสิตระดับอุดมศึกษา โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเปิดโอกาสให้ผู้เรียนได้ทำการทดลองและเกิดการเรียนรู้ด้วยตนเอง ซึ่งจะทำให้ผู้เรียนสามารถเข้าใจเนื้อหาของกลศาสตร์ของไหลได้ง่ายขึ้น

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ รวมไปถึงผู้เชี่ยวชาญที่มีส่วนร่วมทำให้คู่มือปฏิบัติการเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวสุทธี อภิวันท์

ผู้จัดทำ



การทดลองแท่งก้น้ำของทอริเชลลี

วัตถุประสงค์

ศึกษาสัมประสิทธิ์ความเร็วในการทดลองแท่งก้น้ำของทอริเชลลี

ผลที่คาดว่าจะได้รับการทดลอง

หลังจากที่ได้ศึกษาและทำการทดลอง เรื่อง แท่งก้น้ำของทอริเชลลีแล้ว นิสิตต้องปฏิบัติได้ ในข้อต่อไปนี้เป็นอย่างดี

1. วิเคราะห์และเปรียบเทียบสมการทอริเชลลีสำหรับของไหลในอุดมคติและของไหลจริง
2. ทดลองและคำนวณสัมประสิทธิ์ความเร็วในการทดลองแท่งก้น้ำของทอริเชลลีได้

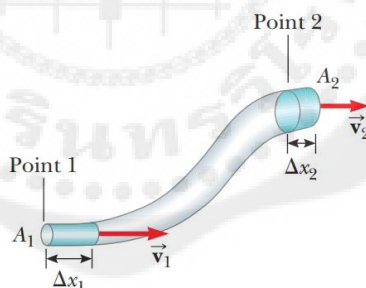
อุปกรณ์

1. ชุดการทดลองแท่งก้น้ำของทอริเชลลี

ทฤษฎี

สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

สมการความต่อเนื่องเป็นสมการที่นิยมใช้ในศึกษาการไหลของของไหลภายในท่อ การไหลของของไหลในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอไหลจากจุดที่ 1 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A_1 ไปยังจุดที่ 2 พื้นที่หน้าตัด A_2 ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 แสดงการไหลในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ

ที่มา : (Serway; & Jewett .2008 :400)

จากภาพประกอบ 1 แสดงการไหลในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ เมื่อของไหลอุดมคติไหลอย่างสม่ำเสมอผ่านหลอดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน ปริมาตรที่ไหลผ่านพื้นที่ตัดขวาง A_1 ในเวลา Δt จะเท่ากับปริมาตรการไหลที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A_2 ในเวลา Δt ที่เท่ากัน มวลของของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่ A_1 คือ $\Delta m_1 = \rho A_1 v_1 \Delta t$ มวลของของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่ A_2 คือ $\Delta m_2 = \rho A_2 v_2 \Delta t$

ดังนั้น มวลที่ไหลผ่านแต่ละส่วนมีค่าเท่ากัน จะได้

$$\Delta m_1 = \Delta m_2 \quad (1)$$

$$\rho A_1 v_1 \Delta t = \rho A_2 v_2 \Delta t \quad (2)$$

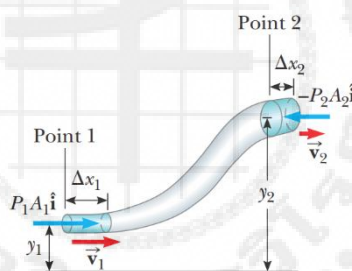
หรือ

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (3)$$

สมการ (3) เรียกว่า สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) สรุปได้ว่า ผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดกับอัตราเร็วของของไหลอุดมคติ ไม่ว่าจะอยู่ที่ตำแหน่งใดในท่อจะมีค่าคงตัว

สมการของแบร์นูลลี (Bernoulli's equation)

พิจารณาหลอดการไหลที่มีระดับต่างกัน โดยบริเวณแรกให้มีพื้นที่หน้าตัด A_1 อยู่สูงจากระดับอ้างอิง y_1 และมีความดันในของไหล P_1 ส่วนบริเวณที่ 2 มีพื้นที่หน้าตัด A_2 อยู่สูงจากระดับอ้างอิง y_2 และมีความดันในของไหล P_2 ภาพประกอบ 2 แสดงการพิจารณาของไหลที่ไหลผ่านท่อ



ภาพประกอบ 2 แสดงการพิจารณาของไหลที่ไหลผ่านท่อ
ที่มา : (serway; & Jewett .2005 :402)

พิจารณาที่บริเวณที่ 1 งานที่กระทำโดยแรง F_1 สามารถหาได้จากสมการ (4)

$$W_1 = F_1 \Delta x_1 = P_1 (A_1 \Delta x_1) = P_1 V \quad (4)$$

พลังงานศักย์บริเวณที่ 1 คือ

$$E_{p_1} = mgy_1 \quad (5)$$

พลังงานจลน์บริเวณที่ 1 คือ

$$E_{k_1} = \frac{1}{2} mv_1^2 \quad (6)$$

พิจารณาท่อที่บริเวณที่ 2 งานที่กระทำโดยแรง F_2

$$W_2 = -F_2 \Delta x_2 = -P_2 (A_2 \Delta x_2) = -P_2 V \quad (7)$$

พลังงานศักย์บริเวณที่ 2 คือ

$$E_{P_2} = mgy_2 \quad (8)$$

พลังงานจลน์บริเวณที่ 2 คือ

$$E_{K_2} = \frac{1}{2} mv_2^2 \quad (9)$$

งานที่เกิดขึ้นจากแรงนั้น มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ จากการเคลื่อนที่ของน้ำจากบริเวณที่ 1 ไปยังบริเวณที่ 2 สามารถอธิบายได้ดังสมการ (10)

$$(P_1 - P_2)V = \left(\frac{1}{2} mv_2^2 - \frac{1}{2} mv_1^2 \right) + (mgy_2 - mgy_1) \quad (10)$$

จาก $V = \frac{m}{\rho}$ แทนค่าในสมการ (10) จะได้

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho gy_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho gy_2 \quad (11)$$

นั่นคือ

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gy = \text{ค่าคงตัว}$$

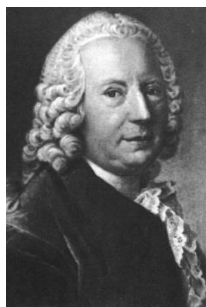
เมื่อนำความหนาแน่น (ρ) ซึ่งเป็นค่าคงที่มาหารตลอดสมการ (11) จะได้

$$\frac{1}{2} v_1^2 + \frac{P_1}{\rho} + gy_1 = \frac{1}{2} v_2^2 + \frac{P_2}{\rho} + gy_2 \quad (12)$$

หมายเหตุ การห้อย : 1 และ 2 หมายถึงจุดที่แตกต่างกันในการไหล ซึ่งจุดที่ 1 เป็นต้นน้ำของจุดที่ 2

เมื่อ	v	คือ	ความเร็วของของเหลว (วินาที/เมตร)
	g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตร/วินาที ²)
	P	คือ	ความดัน (ตารางเมตร/นิวตัน)
	y	คือ	ความสูงของของไหลในแต่ละจุด เมื่อเทียบกับระดับอ้างอิง(เมตร)

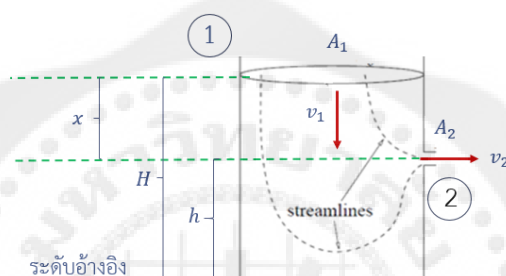
สมการ (12) เรียกว่า สมการของแบร์นูลลี ซึ่งกล่าวว่าผลรวมของความดัน พลังงานจลน์ ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และพลังงานศักย์โน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ ภายในท่อที่ของไหลผ่านมีค่าคงตัว สมการนี้มีบทบาทมากในการแก้ปัญหาทางกลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น ชื่อของสมการตั้งให้เป็นเกียรติยศแก่ แดเนียล แบร์นูลลี (Daniel Bernoulli)



ภาพประกอบ 3 Daniel Bernoulli

ที่มา : (Groningen. 1700: online)

การหาอัตราเร็วของของเหลวที่พุ่งออกจากรูขนาดเล็ก



ภาพประกอบ 4 การพิจารณาความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิด
ในการทดลองแท่งก้น้ำของทอริเชลลี

จากภาพประกอบ 4 แสดงการพิจารณาความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดในการทดลองแท่งก้น้ำของทอริเชลลี กำหนดบริเวณที่ 1 คือผิวน้ำในแท่งก้น้ำ และบริเวณที่ 2 คือรูเปิด

กำหนดให้	A_1	คือ	(ตารางเมตร) พื้นที่หน้าตัดของแท่งก้น้ำ
	A_2	คือ	(ตารางเมตร) พื้นที่หน้าตัดของรูเปิด
	v_1	คือ	(เมตร) ความเร็วของน้ำในแท่งก้น้ำ/วินาที
	v_2	คือ	(เมตร) ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิด/วินาที
	H	คือ	(เมตร) ความสูงของระดับน้ำเทียบกับระดับอ้างอิง
	h	คือ	(เมตร) ความสูงของระดับของรูเปิดเทียบกับระดับอ้างอิง
	x	คือ	(เมตร) ระยะห่างระหว่างระดับน้ำถึงรูเปิด

จากสมการ (12) สมการแบร์นูลลี เมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในภาพประกอบ (4) จะได้

$$\frac{1}{2}v_1^2 + \frac{P_1}{\rho} + gH = \frac{1}{2}v_2^2 + \frac{P_2}{\rho} + gh \quad (13)$$

จากสมการที่ (3) สมการความต่อเนื่อง เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่เพื่อหาค่า v_1 จะได้

$$v_1 = \left(\frac{A_2 v_2}{A_1} \right) \quad (14)$$

แทนค่า v_1 จากสมการที่ (14) ในสมการที่ (13)

$$\frac{1}{2} \left(\frac{A_2 v_2}{A_1} \right)^2 + \frac{P_1}{\rho} + gH = \frac{1}{2} v_2^2 + \frac{P_2}{\rho} + gh \quad (15)$$

ค่าความดัน ณ จุดที่ 1 และจุดที่ 2 คือความดันบรรยากาศ ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (15)

$$\frac{1}{2} \left(\frac{A_2 v_2}{A_1} \right)^2 + gH = \frac{1}{2} v_2^2 + gh \quad (16)$$

จากสมการ (16) จัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$gH - gh = \frac{1}{2} v_2^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{A_2 v_2}{A_1} \right)^2 \quad (17)$$

ดึงตัวร่วมทั้งสองข้างของสมการ (17)

$$g(H - h) = \frac{1}{2} v_2^2 \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \quad (18)$$

จะเห็นว่าในการทดลองแท็งก์น้ำของทอริเชลลี พื้นที่หน้าบริเวณที่ 1 (A_1) มีค่ามากกว่า พื้นที่หน้าบริเวณที่ 2 (A_2) มาก ๆ ส่งผลให้กำลังสองของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ 2 และพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ 1 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นจึงเขียนสมการ (18) ใหม่เป็น

$$g(H - h) = \frac{1}{2} v_2^2 \quad (19)$$

จัดรูปสมการ (19) เพื่อหาความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิด จะได้ดังสมการ (20)

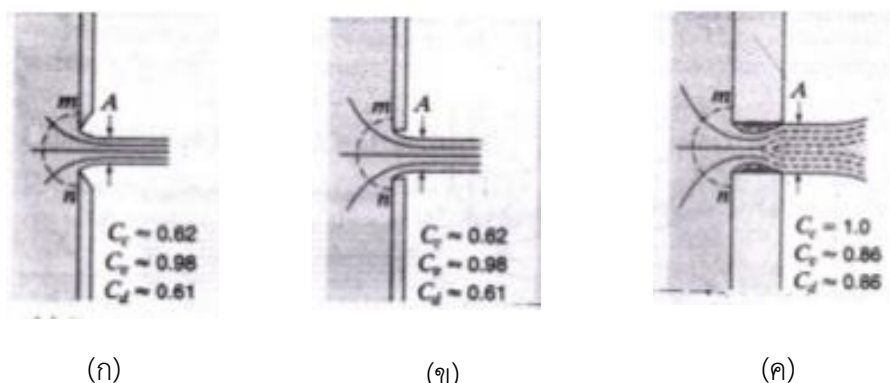
$$v_2 = \sqrt{2g(H - h)} \quad (20)$$

สมการ (20) เรียกว่า “สมการทอริเชลลี” ในกรณีของไหลในอุดมคติ ความเร็วของน้ำที่พุ่งออกจากรูเปิดจะมีค่าน้อยกว่าความเร็วที่ทำนายโดยสมการทอริเชลลี ดังนั้นในการอธิบายการไหลของของไหลจริง จึงนิยามสัมประสิทธิ์ความเร็วโดยสมการ (21)

$$u_2 = c_v \sqrt{2g(H - h)} \quad (21)$$

เมื่อ u_2 คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหลจริงที่พุ่งออกจากรูเปิด

รูเปิดต่างชนิดกันจะส่งผลให้เส้นกระแสของน้ำที่ไหลผ่านรูเปิดนั้นต่างกันไปด้วย ซึ่งการทดลองแท็งก์น้ำของทอริเชลลี



ภาพประกอบ 5 การไหลของของไหลผ่านรูเปิดประเภทต่าง ๆ (ก) ขอบกึ่งคม

(ข) ขอบคม (ค) ขอบเหลี่ยมพร้อมทั้งแสดงค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 3 ชนิด

ที่มา : (Siddique .2015 :Online)

จากภาพประกอบ 5 จะเป็นได้อีกว่านอกจากสัมประสิทธิ์ความเร็ว ยังมีสัมประสิทธิ์ที่สำคัญอีก 2 ประเภท ซึ่งนิยามดังนี้

$$\text{สัมประสิทธิ์การหดตัว } (C_c) = \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดของลำของไหล}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของรูเปิด}}$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การจ่าย } (C_d) = \frac{\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ได้จากการทดลอง}}{\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรตามทฤษฎีของของไหลอุดมคติ}}$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็ว

เนื่องจากการหาสัมประสิทธิ์ความเร็วจากสมการ (21) ต้องทราบความเร็วก่อน ซึ่งสามารถหาความเร็ว โดยใช้การเคลื่อนที่แบบวิถีโค้งของน้ำ จากสมการการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง

$$h = u_y t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (22)$$

เมื่อ $u_y = 0$ สามารถหาค่าเวลา t ได้เป็น

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (23)$$

จากสมการการเคลื่อนที่ในแนวนอน ซึ่งมีความเร็วคงที่

$$u_2 = \frac{s}{t} \quad (24)$$

แทนค่าความเร็วจากสมการ (21) และเวลาจากสมการ (23) ลงในสมการ (24) จะได้

$$s = C_v \sqrt{2g \cdot (H - h)} \cdot \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (25)$$

จัดรูปสมการ (25) ใหม่เป็น

$$s = 2C_v \sqrt{(Hh - h^2)} \quad (26)$$

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็ว คือ

$$C_v = \frac{S}{2\sqrt{(Hh-h^2)}} \quad (27)$$

กำหนดให้ x คือระยะห่างระหว่างระดับน้ำกับรูเปิด นั่นคือ

$$x = H - h \quad (28)$$

แทนค่า x ในสมการ (27) ลงในสมการ (28) จะได้

$$C_v = \frac{S}{2\sqrt{(H-x)x}} \quad (29)$$

นำระยะทางการตกของน้ำ (S) ที่วัดทั้ง 10 ครั้ง สำหรับแต่ละค่าระดับน้ำ (H) มาหาค่าเฉลี่ย และนำมาแทนค่าในสมการ (29) เพื่อสัมประสิทธิ์ความเร็ว พร้อมทั้งพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเร็ว (C_v) และระยะห่างระหว่างรูเปิดและระดับน้ำ (x)

วิธีการทดลอง

การเก็บผลการทดลอง

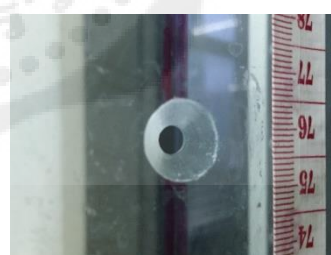
ในการทดลองแท็งก์น้ำของทอรัลเซลล์ ผู้จัดทำได้แบ่งการทดลองแท็งก์น้ำของทอรัลเซลล์ออกเป็น 2 ตอน ตามประเภทของรูเปิด ภาพประกอบ 6 แสดงประเภทรูเปิดในการทดลองแท็งก์น้ำของทอรัลเซลล์

ตอนที่ 1 รูเปิดประเภทขอบกึ่งคม

ตอนที่ 2 รูเปิดประเภทขอบคม



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 6 ประเภทของรูเปิดในการทดลองแท็งก์น้ำของทอรัลเซลล์

(ก) ขอบกึ่งคม (ข) ขอบคม

โดยการทดลองทั้ง 2 ตอนมีการขั้นตอนการทดลองดังนี้

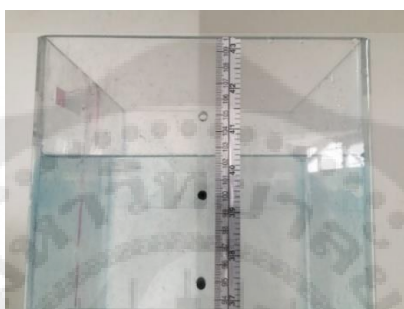
1. ใช้ระดับน้ำตั้งชุดทดลองให้อยู่ในแนวตั้ง ก่อนที่จะเติมน้ำในแท็งก์เก็บน้ำ



ภาพประกอบ 7 การติดตั้งระดับน้ำในชุดการทดลองทอริริเซลล์

2. ใส่น้ำในแท็งก์เก็บน้ำของชุดการทดลองให้เกินระยะ 100 เซนติเมตร รอจนน้ำในแท็งก์

นิ่ง



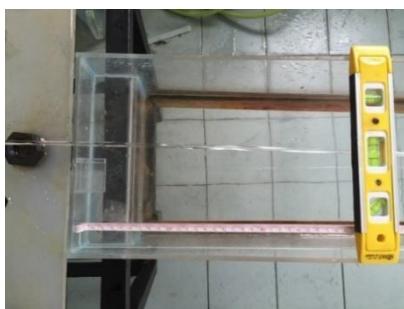
ภาพประกอบ 8 ระดับน้ำนิ่งที่ระยะเกิน 100 เซนติเมตร

3. เปิดจุกที่ต้องการปล่อยน้ำ



ภาพประกอบ 9 การเปิดรูที่ระดับรูเปิด 5 เซนติเมตร

4. วัดระยะทางการตกของน้ำ (s) เมื่อระดับน้ำ (H) ถึงระยะต่าง ๆ ทุก 5 เซนติเมตร



ภาพประกอบ 10 แสดงการวัดระยะตกของน้ำ

5. บันทึกผลในตารางบันทึกการทดลอง ซึ่งแต่ละระยะรูเปิด (h) ทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง
6. หาค่าเฉลี่ยระยะการตกของน้ำทั้ง 10 ครั้ง
7. แทนค่าในสมการ (29) เพื่อสัมพันธ์ความเร็ว
8. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมพันธ์ความเร็ว (c_v) และระยะห่างระหว่างรูเปิดและระดับน้ำ (x)



**ค.2 ผลการประเมินความเหมาะสมขององค์ประกอบ 6 ด้านของคู่มือการทดลองแท้งก์น้ำ
ของทอริเชลลีโดยผู้เชี่ยวชาญ 3 คน**

รายการประเมิน	ผู้เชี่ยวชาญคนที่			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	รวม
ด้านที่ 1 การพิมพ์และรูปเล่ม				
1. พิมพ์ได้ถูกต้องตามหลักเกณฑ์การจัดทำเอกสาร	1	1	1	1
2. ตัวอักษร แผนภูมิ รูปภาพ สวยงาม ชัดเจน	1	1	1	1
3. เว้นวรรคตอนได้ถูกต้อง	0	1	1	0.67
4. พิมพ์ไม่ผิด ไม่ตก ไม่มีรอยขูดลบ ขีดฆ่า	0	1	1	0.67
5. รูปเล่มสวยงาม ขนาดพอเหมาะแก่การนำไปใช้	1	1	1	1
รวมค่าเฉลี่ยด้านการพิมพ์และรูปเล่ม	0.6	1	1	0.86
ด้านที่ 2 คู่มือครู				
6. คู่มือสอดคล้องกับจุดประสงค์ในการจัดทำ	1	1	1	1
7. คำชี้แจงมีความชัดเจน เข้าใจได้ง่าย	1	1	1	1
8. สารการเรียนรู้ครอบคลุมหน่วยการเรียนรู้	1	1	1	1
รวมค่าเฉลี่ยด้านคู่มือครู	1	1	1	1
ด้านที่ 3 แผนการจัดการเรียนรู้				
9. สารการเรียนรู้ มาตรฐานการเรียนรู้ ตรงตามหลักสูตร แกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551	1	1	0	0.67
10. สารการเรียนรู้ และจุดประสงค์สอดคล้องกัน	1	1	0	0.67
11. การทดลองเหมาะสมกับจุดประสงค์ และสารการเรียนรู้	1	1	0	0.67
12. เนื้อหาเหมาะสมกับวัย และความสนใจของผู้เรียน	1	1	1	1
13. กิจกรรมการจัดการเรียนรู้ครอบคลุมสารการเรียนรู้	1	1	1	1
รวมค่าเฉลี่ยด้านแผนการจัดการเรียนรู้	1	1	0.4	0.80
ด้านที่ 4 เอกสารประกอบการเรียน				
14. คำแนะนำในการใช้มีความชัดเจน เข้าใจง่าย	1	1	1	1
15. สอดคล้องกับจุดประสงค์การเรียนรู้	1	1	1	1
16. สอดคล้องกับกิจกรรมการเรียนรู้	1	1	1	1
17. ครอบคลุมสารการเรียนรู้	1	1	1	1
18. เหมาะสมกับผู้เรียน	1	1	1	1

**ค.2 ผลการประเมินความเหมาะสมขององค์ประกอบ 6 ด้านของคู่มือการทดลองแท่งก้น้ำ
ของทอริเชลลีโดยผู้เชี่ยวชาญ 3 คน (ต่อ)**

รายการประเมิน	ผู้เชี่ยวชาญคนที่			ค่าเฉลี่ย รวม
	1	2	3	
ด้านที่ 4 เอกสารประกอบการเรียน (ต่อ)				
19. ช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจ เกิดความคิดรวบยอด และสรุปองค์ความรู้ได้ด้วยตนเอง	1	1	1	1
20. ช่วยให้ผู้เรียนสามารถพัฒนาความรู้ ทักษะกระบวนการ และคุณลักษณะอันพึงประสงค์	1	1	1	1
21. ช่วยให้ผู้เรียนรู้วิธีการใช้สื่อจากแหล่งข้อมูลต่างๆ เพื่อศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม	1	1	1	1
22. ข้อปฏิบัติในการใช้เอกสารประกอบการเรียน มีความชัดเจน เข้าใจได้ง่าย	1	1	1	1
รวมค่าเฉลี่ยด้านเอกสารประกอบการเรียนรู้	1	1	1	1
ด้านที่ 5 แบบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน				
23. ข้อคำถามสอดคล้องกับจุดประสงค์	1	1	1	1
24. ข้อคำถามสอดคล้องกับสาระการเรียนรู้	1	1	1	1
25. ข้อคำถามมีความยาก/ง่าย เหมาะสมกับวัย	1	1	1	1
26. ข้อคำถามมีความชัดเจน	1	1	1	1
27. ตัวเลือกของข้อคำถามมีความเหมาะสม	1	1	1	1
28. ข้อคำถามทำให้ผู้ตอบใช้ทักษะการคิด	1	1	1	1
รวมค่าเฉลี่ยด้านแบบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน	1	1	1	1
ด้านที่ 6 บทปฏิบัติการฟิสิกส์				
29. สอดคล้องกับผลที่คาดว่าจะได้รับ	1	1	1	1
30. สอดคล้องกับวิธีการทดลอง	1	1	1	1
31. ครอบคลุมทฤษฎี	1	1	1	1
32. เหมาะสมกับผู้เรียน	1	1	1	1
33. ช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจ เกิดความคิดรวบยอด และสรุปองค์ความรู้ได้ด้วยตนเอง	1	1	1	1
34. ช่วยให้ผู้เรียนสามารถพัฒนาความรู้ ทักษะกระบวนการ และคุณลักษณะอันพึงประสงค์	1	1	1	1

ค.2 ผลการประเมินความเหมาะสมขององค์ประกอบ 6 ด้านของคู่มือการทดลองแท่งก้น้ำ
ของทอริเชลลีโดยผู้เชี่ยวชาญ 3 คน (ต่อ)

รายการประเมิน	ผู้เชี่ยวชาญคนที่			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	รวม
ด้านที่ 4 เอกสารประกอบการเรียน (ต่อ)				
35. ข้อปฏิบัติในการใช้บทปฏิบัติการ มีความชัดเจน เข้าใจได้ง่าย	1	1	1	1
รวมค่าเฉลี่ยด้านบทปฏิบัติการฟิสิกส์	1	1	1	1



ภาคผนวก ง

ง.1 รายนามผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอรรีเซลล์

ง.1 รายนามผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบคู่มือการทดลองแท็งก์น้ำของทอริเชลลี

1. อาจารย์ ดร.สุรุष्มิ วิจารณ์
2. อาจารย์ ดร. สุวรรณ พลายพิชิต
3. รองศาสตราจารย์มณฑิ ภูฎาการ



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล นางสาวสุทธินี อภิวัฒน์
 วันเดือนปีเกิด 3 มกราคม 2535
 สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร
 สถานที่อยู่ปัจจุบัน 2/1 ม.6 หมู่บ้านชุมชนมอญแดงชะโมก
 ถนนปู่เจ้าสมิงพราย ต. บางหญ้าแพรก
 อ.พระประแดง จ.สมุทรปราการ 10130

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2549 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น
 จาก โรงเรียนวัดทรงธรรม จ.สมุทรปราการ
 พ.ศ. 2552 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น
 จาก โรงเรียนวัดทรงธรรม จ.สมุทรปราการ
 พ.ศ. 2556 จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต
 (ฟิสิกส์ประยุกต์) จาก สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง กทม.
 พ.ศ. 2561 จบการศึกษาระดับปริญญาโท การศึกษามหาบัณฑิต
 (ฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กทม.