

การศึกษาปัจจัยที่ผลต่อการเหนี่ยวนำการไหลในท่ออากาศที่ดัดแปลงสำหรับระบบไซฟอน

ปริญญานิพนธ์

ของ

วันชัย ชัยประเศียร

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เมษายน 2551

การศึกษาปัจจัยที่ผลต่อการเหนี่ยวนำการไหลในท่ออากาศที่ดัดแปลงสำหรับระบบไซฟอน

ปริญญานิพนธ์

ของ

วันชัย ชัยประเศียร

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เมษายน 2551

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาปัจจัยที่ผลต่อการเหนี่ยวนำการไหลในท่ออากาศที่ดัดแปลงสำหรับระบบไซฟอน

บทคัดย่อ

ของ

วันชัย ชัยประเสริฐ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เมษายน 2551

วันชัย ชัยประเสริฐ. (2551). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเหนี่ยวนำการไหลในท่ออากาศที่ดัดแปลง

สำหรับระบบไซฟอน. ปรินูญานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ :

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม:

พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง, ดร.ไพศาล นามผล

ปรินูญานิพนธ์นี้ได้เสนอการศึกษา เกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการเหนี่ยวนำการไหล ในท่อลมที่ได้ทำการเจาะที่ด้านบนของไซฟอน เพื่อนำพลังงานลมที่ได้จากระบบไซฟอนนี้มาใช้ประโยชน์ จากการศึกษาที่ผ่านมาในเรื่องความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำและลม พบว่าในกรณีที่อัตราการไหลของลมในไซฟอนมีมากเกินไปจะทำให้ไซฟอนหยุดการทำงาน จากการทดสอบใช้ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22.10 มิลลิเมตร เจาะช่องลมที่ด้านผิวท่อนบนสุดของท่อไซฟอน พบว่าระบบไซฟอนสามารถทำงานได้ที่ช่องเจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดไม่เกิน 4 มิลลิเมตร แต่เมื่อเจาะช่องลมใหญ่ขึ้นและสอดท่อลมลงมาตามแนวท่อไซฟอน ไซฟอนก็ยังสามารถทำงานได้ที่ขนาดท่อลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมากกว่า 4 มิลลิเมตร ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดสอบครั้งนี้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความลึกของการสอดท่อลม เพื่อให้ได้อัตราการไหลของลมสูงสุด

การทดสอบทำที่ค่าเฮด 3.78 เมตร และทดสอบกับท่อไซฟอน 4 ขนาดดังนี้คือ 22.10, 30.51, 38.10 และ 44.35 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนขนาดท่อลมที่ใช้มี 4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนี้คือ 4.02, 4.98, 6.51 และ 7.99 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยในการทดสอบได้สอดท่อลมลงตามความยาวด้านข้างของไซฟอนที่ระดับความลึกต่างๆดังนี้ (-20), (-10), (0), (10), (20) และ (30) เซนติเมตร

การทดสอบพบว่าความเร็วของน้ำสูงสุดมีค่าเป็น 3.671 เมตรต่อวินาที และค่าสัดส่วนของปริมาตรลมต่อปริมาตรทั้งหมด (Void fraction) สำหรับท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22.10 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.48 และท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30.51 มิลลิเมตรมีค่า Void fraction สูงสุดเท่ากับ 0.38 และค่ากำลังที่ได้จากพลังงานลมของระบบท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22.10 มิลลิเมตรเมื่อทดสอบกับท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6.51 มิลลิเมตรที่ระดับความลึก (-20)เซนติเมตร มีค่า 0.14 วัตต์

คำสำคัญ : ไซฟอน, พลังงานน้ำ

The Study of Parameters Affecting the Induced Flow in
Modified Air Duct for Siphon System

AN ABSTRACT

BY

WANCHAI CHAIPRASIAN

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering Degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

April 2008

Wanchai Chaiprasian. (2008). *The Study of Parameters Affecting the Induced Flow in Modified Air Duct for Siphon System*. Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Lt. Col. Asst. Prof. Dr. Anotai Suksangpanomrung, Dr. Paisam Naphon.

This research is to study the parameter that affecting the induced air in air duct on the top side of siphon system. From the previous study of the relation between the water and air flow rate in siphon system, it found that in case of higher air flow rate, the siphon will break down. The preliminary study was done with PVC with the internal diameter of 22.10 mm. It was found that the largest diameter for air inlet was 4 mm. However, if the hole of air induced was guided by small duct with different depth the siphon is still worked. So the purpose of this research is to study the parameters that affect the depth of the guided air duct.

An experiment is set at 3.78 m. of static elevation head with siphon pipe 4 sizes of inner diameter of 22.10, 30.51, 38.10 and 44.35 mm. respectively. For air duct there are 4 sizes of inner diameter of 4.02, 4.98, 6.51 and 7.99 mm. respectively. And the difference depth of (-20), (-10), (0), (10), (20) and (30) cm. respectively. The point of (0) means that it on the same level of water level in siphon tank.

From the experiment, found that the average of velocity from 4 pipes is 3.671 m/s and maximum void fraction for 22.10 mm. inside diameter of pipe is 0.48 and maximum void fraction for pipe with inner diameter of 30.51mm. is 0.38 The power obtained from the siphon with 22.10 mm. inside diameter and air duct of 6.51 mm. at (-20) cm. is 0.14 watts.

Keywords: Siphon, Hydropower

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาปัจจัยที่ผลต่อการเหนี่ยวนำการไหลในท่ออากาศที่ดัดแปลงสำหรับระบบไซฟอน

ของ

วันชัย ชัยประเศียร

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญสิริ จีระเดชากุล)

วันที่ เดือน พ.ศ. 2550

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

..... ประธาน

(พันโท ผศ. ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ไพศาล นาผล)

..... กรรมการ

(พันโท ผศ. ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

..... กรรมการ

(.....)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ไพศาล นาผล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย อัมมมงคล)

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณพันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง ประธานกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ไพศาล นาผล กรรมการผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ ที่ให้โอกาสในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ท่านทั้งสองได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อแนะนำให้ความรู้ คำปรึกษา และแนวคิดในการวิเคราะห์อันเป็นประโยชน์ตลอดการทำวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมิต์ เอี่ยมสะอาด ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ คุรุเจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย อัสภูมิมงคล กรรมการการสอบปริญญานิพนธ์ ในครั้งนี้ ที่กรุณาแนะนำเพิ่มเติมทำปริญญานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์จากกองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า และคณาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างดี ตลอดจนให้ยืมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบอันเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ พี่และน้อง ที่ได้ให้กำลังใจและสนับสนุนด้านการศึกษาของผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา และขอขอบคุณ เพื่อนๆ ที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการทำวิจัยนี้

วันชัย ชัยประเศียร

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่วิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	4
2 ผลงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
การแบ่งประเภทของการไหล.....	7
การไหลของของไหลหนืดภายในท่อ.....	11
สมการควบคุมการไหล.....	16
การสูญเสียสำหรับการไหลภายในท่อที่มีความเสียดทาน.....	22
หลักการทำงานของไซฟอน.....	34
3 การออกแบบและวิธีดำเนินการ.....	37
ข้อมูลของการออกแบบ.....	37
อุปกรณ์การทดสอบของระบบไซฟอน.....	37
การติดตั้งระบบไซฟอน.....	42
กรณีของการทดสอบ.....	44
4 การสอบเทียบเครื่องมือ.....	50
ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและข้อกำหนดการออกแบบ.....	50
การออกแบบชุดสอบเทียบ.....	57
ขั้นตอนการทดสอบเทียบ.....	61
ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล.....	64

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	67
ผลการทดสอบระบบไซฟอนเมื่อยังไม่มีภาระช่องลมที่ท่อไซฟอน.....	67
ผลการทดสอบระบบไซฟอนเมื่อมีการเจาะช่องลมขนาดต่างๆ ที่ด้านบนของท่อไซฟอนแต่ละขนาด.....	69
ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมกับพารามิเตอร์ต่างๆ.....	71
พลังงานที่ได้จากระบบไซฟอน.....	81
6 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	83
สรุปผลการทดสอบ.....	83
ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย.....	84
บรรณานุกรม.....	85
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก.....	88
ภาคผนวก ข.....	91
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	95
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	98

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ค่าความขรุขระสมบูรณ์ (ε) สำหรับท่อใหม่.....	28
2 ตัวประกอบสำหรับหาค่าการสูญเสียพลังงานในข้อต่อ.....	32
3 ข้อมูลการออกแบบชุดทดสอบอริฟิซ	53
4 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลจากอุปกรณ์ทั้งสามชนิด.....	65
5 ความเร็วเฉลี่ยในการไหลของน้ำจากท่อไซฟอนแต่ละขนาด.....	67
6 ผลการทดสอบระบบไซฟอนด้วยการเจาะช่องลมที่ด้านบนของท่อไซฟอน.....	70
7 ผลการทดสอบระบบไซฟอนที่แต่ละความลึกในการสอดท่อลมเทียบกับขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อไซฟอน เมื่อใช้ท่อลมขนาด 4.02 มิลลิเมตร.....	89
8 ผลการทดสอบระบบไซฟอนที่แต่ละความลึกในการสอดท่อลมเทียบกับขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อไซฟอน เมื่อใช้ท่อลมขนาด 4.98 มิลลิเมตร.....	89
9 ผลการทดสอบระบบไซฟอนที่แต่ละความลึกในการสอดท่อลมเทียบกับขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อไซฟอน เมื่อใช้ท่อลมขนาด 6.51 มิลลิเมตร.....	90
10 ผลการทดสอบระบบไซฟอนที่แต่ละความลึกในการสอดท่อลมเทียบกับขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อไซฟอน เมื่อใช้ท่อลมขนาด 7.99 มิลลิเมตร.....	90

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหันแต่ละชนิด.....	6
2 ของไหลในจินตนาการที่ไหลแบบสองมิติและสามมิติ.....	8
3 การทดลองของเรย์โนลด์แสดงรูปแบบของการไหล.....	12
4 ลักษณะของเส้นสีในการไหลของของไหล.....	12
5 การไหลของของไหลผ่านท่อกลมที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดต่างกัน.....	16
6 เส้น HGL และเส้น EGL ของของไหลในจินตนาการ.....	18
7 ตำแหน่งในการวัดค่า HGL และ EGL ของของไหล.....	19
8 องค์ประกอบการไหลในท่อที่มีความเสียดทาน.....	23
9 แผนภาพมุติ้ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการไหลในท่อ.....	27
10 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานที่ปากทางเข้าของท่อ.....	30
11 การสูญเสียจากการที่ลดขนาดท่อโดยทันทีทันใด.....	31
12 การสูญเสียเนื่องจากการขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดแบบค่อยๆขยายโตขึ้นหรือการลด ขนาดพื้นที่หน้าตัดแบบค่อยๆลด.....	32
13 การหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียในท่อโค้งและข้ออ.....	33
14 ส่วนประกอบของระบบไซฟอน.....	34
15 ถังจ่ายน้ำที่ใช้ในการทดสอบขนาด 1000 ลิตร.....	38
16 ท่อไซฟอนพลาสติกขนาดต่างๆ.....	38
17 ถังรับน้ำจากไซฟอนพร้อมอุปกรณ์.....	39
18 อุปกรณ์ลูกกลอยพลาสติกและสวิทช์อัตโนมัติ.....	40
19 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตารีเมตร.....	41
20 เครื่องสูบน้ำ.....	41
21 นาฬิกาจับเวลาแบบละเอียด.....	42
22 แผนภาพระบบไซฟอนที่ใช้ทดสอบ.....	43
23 การเจาะช่องลมที่ด้านบนของท่อไซฟอน.....	45
24 ตำแหน่งปลายท่อลมที่ใช้ในการทดสอบ.....	47
25 อุปกรณ์วัดอัตราเร็วลมชนิดใบพัดแสดงผลเป็นตัวเลข.....	51
26 พารามิเตอร์ต่างๆของชุดทดสอบอัตราการไหลของลมชนิดแผ่นออร์ฟิท.....	52

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
27 ชุดทดสอบเทียบอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลม.....	58
28 ถังลมพร้อมอุปกรณ์อัดลม.....	58
29 ชุดเรียงกระแสลม.....	59
30 การเจาะช่องลม (Tapping).....	60
31 ชุดทดสอบเทียบอุปกรณ์วัดอัตราเร็วลม.....	61
32 ผลการสอบเทียบอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมสามชนิด.....	65
33 อัตราการไหลของน้ำที่ท่อไซฟอนขนาดต่างๆ.....	68
34 ลักษณะการเจาะรูที่ผิวของท่อไซฟอน.....	69
35 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมเมื่อเทียบกับขนาดท่อลมที่ระดับความลึก ต่างกันที่ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30.51 มิลลิเมตร.....	72
36 ผลการเปรียบเทียบค่า Void fraction เมื่อเทียบกับขนาดท่อลมที่ระดับความลึก ต่างกันที่ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30.51 มิลลิเมตร.....	73
37 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมเมื่อเทียบกับขนาดท่อลมที่ขนาด ไซฟอนต่างกันที่ระดับความลึก (10) เซนติเมตร.....	74
38 ผลการเปรียบเทียบค่า Void fraction เมื่อเทียบกับขนาดท่อลมของแต่ละ ท่อไซฟอนที่ตำแหน่งความลึก (10) เซนติเมตร.....	75
39 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมเมื่อเทียบกับระดับความลึกที่ขนาด ท่อไซฟอนต่างกันที่ขนาดท่อลม 4.02 มม.....	76
40 ผลการเปรียบเทียบค่า Void fraction เมื่อเทียบกับความตำแหน่งความลึกที่ ท่อไซฟอนต่างกันที่ขนาดท่อลม 4.02 มม.....	77
41 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของน้ำและ ขนาดท่อลม ที่ระดับความลึกต่างๆ.....	78
42 ผลการเปรียบเทียบค่า Void fraction กับอัตราการไหลของน้ำและขนาดท่อลม ที่ระดับความลึกต่างๆ.....	80
43 ส่วนประกอบของระบบไซฟอนที่ระดับความลึกต่างๆ.....	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่วิจัย

ในปัจจุบันทรัพยากรธรรมชาติเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาประเทศและยังเป็นตัวแปรสำคัญในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ประเทศไทยเราประสบกับปัญหาทางด้านพลังงานอย่างต่อเนื่องซึ่งนับว่าเป็นเรื่องที่สำคัญโดยเฉพาะพลังงานที่เป็นเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ซึ่งประเทศไทยเราต้องนำเข้ามามูลค่าหลายหมื่นล้านบาทต่อปี⁽³⁾ และจากการที่ราคาน้ำมันมีการปรับตัวขึ้นอย่างต่อเนื่องในขณะนี้ทำให้ปัญหานี้ทวีความรุนแรงมากขึ้น จากปัญหาดังกล่าวนี้ทำให้ภาครัฐบาลหันมาส่งเสริมเกี่ยวกับการแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนอย่างอื่นเพิ่ม อาทิเช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ ฯลฯ โดยเน้นกับพลังงานที่สามารถผลิตได้เองภายในประเทศเพื่อเป็นการทดแทนการนำเข้าพลังงานได้ในส่วนหนึ่ง

การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยกังหันน้ำ (Hydro turbine) ซึ่งมีขนาดใหญ่ และราคาแพง กังหันน้ำที่นิยมใช้ได้แก่กังหันประเภท Kaplan กังหันประเภทไหลสวนทาง (Cross flow turbine) และกังหันประเภท Ossberger ซึ่งจะหมุนที่ความเร็วรอบต่ำจำเป็นต้องมีชุดทดความเร็วรอบ (Gear box) เพื่อช่วยทดรอบให้กับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า ได้มีการประมาณการโดยสมาคมพลังงานจากแหล่งน้ำขนาดเล็กแห่งยุโรป (European Small Hydropower Associations) พบว่าเฉพาะงานโครงสร้างเพื่อทำการติดตั้งกังหันน้ำและอุปกรณ์จะต้องใช้เงินประมาณครึ่งหนึ่งของโครงการทั้งหมด⁽²⁾ ซึ่งจะเห็นว่าการนำพลังงานน้ำที่มีความแตกต่างความสูงไม่มากมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีนี้มีความสิ้นเปลืองอย่างมาก พลังงานทดแทนอื่นๆ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ก็มีต้นทุนในการผลิตเป็นไฟฟ้าที่สูงคือประมาณ 6-9 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงทั่วไป ส่วนพลังงานจากลมนั้นพบว่าคุณภาพพลังงานลมในประเทศไทยมีน้อยมากเนื่องจากความเร็วลมในประเทศอยู่ในระดับปานกลางถึงต่ำ โดยทั่วไปต่ำกว่า 4 เมตรต่อวินาที ซึ่งไม่สามารถใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างกว้างขวาง⁽²⁾

ปัจจุบันมีการสร้างฝายน้ำเป็นอย่างมาก โดยการสร้างฝายมีจุดประสงค์เพื่อใช้เป็นอาคารกักน้ำที่ไหลตามลำน้ำให้มีระดับสูงเพียงพอก่อนที่จะไหลเข้าสู่คลองส่งน้ำทางด้านหน้าฝายไปตามพื้นที่ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการอุปโภคและบริโภค โดยน้ำที่ล้นจะไหลข้ามฝายไปเอง และในช่วงฤดูน้ำน้อยฝายจะทำหน้าที่เก็บกักน้ำในลำน้ำไว้ เพื่อให้เกิดความชุ่มชื้นแก่ธรรมชาติ ดังนั้นการออกแบบฝายนั้นจะต้องมีการดำเนินงานอย่างละเอียดรอบคอบเพื่อให้เกิดประโยชน์ในการใช้มากที่สุดและมีความประหยัดเป็นหลักเสมอ ซึ่งในแถบชนบทห่างไกลในภาคเหนือของไทยมีลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาสูง พื้นที่มี

ความลาดเอียงจากทิศเหนือสู่ทิศใต้ตามแนวเขา มีแหล่งน้ำไหลผ่านมาก ดังนั้นจึงมีการสร้างฝายกั้นน้ำจำนวนมาก ในพื้นที่ชนบทหลายแห่งโดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่ห่างไกลยังไม่มีไฟฟ้าใช้ ทั้งนี้เนื่องจากการลากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเข้าไปในหมู่บ้านห่างไกล มีความไม่คุ้มค่าหลายประการ ทั้งระยะทางที่ไกลและจำนวนครัวเรือนก็มีไม่มาก ดังนั้นจึงมีโครงการการผลิตกระแสไฟฟ้าใช้เองในท้องถิ่น โดยอาศัยแหล่งพลังงานทดแทนซึ่งมีอยู่อย่างมหาศาลภายในชุมชนคือ พลังงานชีวมวลและพลังงานจากน้ำ ด้วยเหตุผลทางสิ่งแวดล้อม พลังงานจากน้ำเป็นพลังงานที่ถูกพิจารณาในอันดับต้นๆ เนื่องจากเป็นพลังงานจากธรรมชาติ จากกฎแรงโน้มถ่วงของโลกในขณะที่น้ำในฝายไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ ได้มีการสูญเสียพลังงานศักย์ปริมาณมากโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งพลังงานน้ำเหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ โดยทั่วไปพลังงานศักย์จากความต่างระดับความสูงของน้ำที่ไม่มากนัก สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ใหม่ โดยการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าหากมีแหล่งน้ำตามธรรมชาติที่มีอัตราการไหล 100 ลิตรต่อวินาที โดยความสูงของน้ำประมาณ 10 เมตรก็สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 10 กิโลวัตต์ ซึ่งเพียงพอสำหรับครอบครัว ในชนบทได้ประมาณ 30-40 ครัวเรือน (2)

ดังนั้นจึงมีแนวความคิดที่จะหาแนวทางหรือวิธีการในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากน้ำมาเป็นพลังงานลมหรือความดันอากาศเพื่อนำมาใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทน ซึ่งการออกแบบจะใช้ความสูงของระดับน้ำประมาณ 3-5 เมตร ซึ่งเป็นระดับความสูงจริงของฝายน้ำที่มีอยู่มากในแถบภาคเหนือของประเทศไทยซึ่งน่าจะมีศักยภาพพอในการใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกได้ โดยการทดสอบนี้ จะใช้เทคนิควิธีการกักน้ำหรือไซฟอน (Siphon) มาเป็นแนวทางการทำวิจัย โดยจะมีการออกแบบท่อลมดูดลมที่ด้านบนของท่อไซฟอน เมื่อมีน้ำไหลผ่านท่อไซฟอนหลัก จะมีการเหนี่ยวนำให้ลมไหลผ่านท่อลม ส่งผลให้เกิดอัตราการไหลของลมในท่อ การไหลของลมนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการขับเคลื่อนกังหันขนาดเล็ก ให้ลมไหลผ่านกังหันขนาดเล็กเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป สำหรับแนวทางการผลิตพลังงานด้วยวิธีไซฟอนนี้มีข้อดีหลายประการอาทิเช่น

1. กังหันลม (Wind turbine) มีขนาดเล็ก ไม่เปลืองเนื้อที่ในการติดตั้ง
2. กังหันลมไม่ต้องใช้ชุดทดความเร็วรอบทำให้ประหยัดต้นทุน
3. การแปลงพลังงานน้ำเป็นพลังงานลมโดยใช้ไซฟอนไม่ต้องใช้อุปกรณ์สูบน้ำทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้
4. อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการแปลงพลังงานน้ำเป็นพลังงานลมนี้มีขนาดเล็กไม่ต้องใช้โครงสร้างที่แข็งแรงมากนัก จึงประหยัดงบประมาณงานก่อสร้าง

5. หากมีโครงสร้างอาคารกักเก็บน้ำอยู่แล้วสามารถติดตั้งอุปกรณ์ระบบไซฟอนได้โดยไม่ต้องมีการขุดเพิ่มเติม

6. เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อทำการศึกษากำหนดพลังงานน้ำจากฝายมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีไซฟอน

1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความลึกในการสอดท่อลมเพื่อให้ได้อัตราการไหลของลมสูงสุด ขณะที่ไซฟอนทำงาน

1.2.3 เพื่อหาค่าสมรรถนะของไซฟอนจากอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ไซฟอนที่ออกแบบและทำการทดลองสำหรับขนถ่ายน้ำที่มีความแตกต่างระดับความสูง 3-5 เมตร

1.3.2 พิจารณาน้ำที่ไหลภายในท่อของไซฟอนเป็นแบบการไหลในสภาวะคงตัว และเป็นแบบอัดตัวไม่ได้

1.3.3 การเปลี่ยนแปลงความดันไอของน้ำมีค่าน้อยมากไม่มีผลต่อการไหลในไซฟอน

1.3.4 ค่าตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราการไหลของน้ำ อัตราการไหลของลม และระดับความลึกในการสอดท่อลม

1.3.5 ขนาดท่อไซฟอนที่ทำการทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็น 22.10, 30.51, 38.10 และ 44.35 มิลลิเมตร

1.3.6 ขนาดท่อลมที่ทำการทดสอบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.02, 4.98, 6.51 และ 7.99 มิลลิเมตร

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ทำการค้นคว้าและศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ทำการออกแบบระบบและสร้างชุดทดสอบ

1.4.3 ทำการทดสอบการทำงานของระบบและเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

1.4.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบของระบบ

1.4.5 ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง

1.4.6 สรุปผลการทดสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1.5.1 ได้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการนำพลังงานลมที่เกิดจากการเหวี่ยงน้ำของกระแสน้ำ ซึ่งได้จากฝายมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีไซฟอน

1.5.2 ทำให้ทราบสมรรถนะของอุปกรณ์ในการนำพลังงานลมน้ำที่เกิดจากการเหวี่ยงน้ำของกระแสน้ำ ซึ่งได้จากฝายมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีไซฟอน

1.5.3 สามารถประยุกต์นำพลังงานน้ำจากฝายมาใช้ประโยชน์ ด้วยไซฟอนเพื่อนำมาใช้เป็น แหล่งพลังงานทางเลือกได้

บทที่ 2

ผลงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะทำการทบทวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์นำเอาพลังงานน้ำจากฝายมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีไฮดรอน และ นำเสนอทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบไฮดรอน โดยแบ่งเป็นหัวข้อดังนี้

หัวข้อ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อ 2.2 การแบ่งประเภทของการไหล

หัวข้อ 2.3 การไหลของของไหลหนืดภายในท่อ

หัวข้อ 2.4 สมการควบคุมการไหล

หัวข้อ 2.5 การสูญเสียสำหรับการไหลภายในท่อที่มีความเสียดทาน

หัวข้อ 2.6 หลักการทำงานของไฮดรอน

2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษา ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

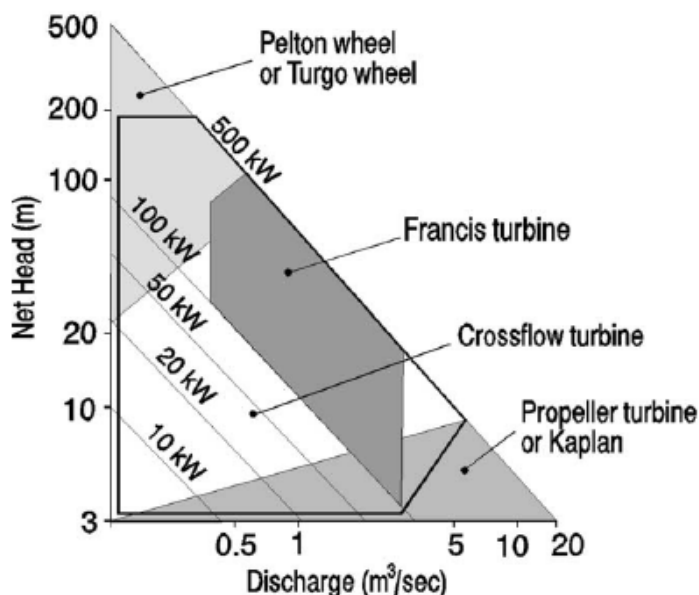
Wallis(2512)⁽¹²⁾ ทำการทดลองเรื่องกาลักน้ำหรือไฮดรอน และให้ Z เป็นระดับความแตกต่างของระดับความสูงของแหล่งน้ำ และพลังงานศักย์ของน้ำบางส่วนจะพาน้ำไหลผ่านไฮดรอนลงสู่แหล่งน้ำที่ระดับต่ำกว่า ขณะที่บางส่วนเสียพลังงานไปให้กับความเสียดทานในท่อ เมื่อทำการเจาะช่องลมด้านบนไฮดรอน จะมีลมเข้าสู่ระบบ ทำให้น้ำมีความหนาแน่นลดลง แรงต้านเนื่องจากลมที่เข้าสู่ระบบนี้เรียกว่าเฮดการลอยตัว (Buoyancy head, B_h) พลังงานหลักที่ใช้ในการขับเคลื่อนน้ำในระบบตอนนี้ คือ $Z - B_h$ โดยค่า B นั้นมีผลโดยตรงต่อค่าอัตราส่วนโดยปริมาตรของลมต่อปริมาตรทั้งหมด หรือเรียกว่า Void fraction ค่า Void fraction สูงสุดที่คำนวณได้คือ 0.3

Hasan (2533)⁽⁹⁾ ทำการทดลองเรื่องไฮดรอนในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 150 มิลลิเมตร พบว่าที่ค่า Void fraction สูงๆ จะทำให้ไฮดรอนหยุดทำงานง่าย เขาได้ทำการทดสอบระบบไฮดรอนที่ Void fraction เท่ากับ 0.23 แล้วสังเกตการไหลของฟองอากาศพบว่ามีความใกล้เคียงกันมาก จากนั้นได้ทำการทดสอบ ซ้ำจนได้ค่า Void fraction สูงสุดเท่ากับ 0.25 ซึ่งเป็นสถานะที่ทำให้ฟองอากาศในท่อมีเสถียรภาพ และมีขนาดเท่ากัน

M.B. Widden; et al. (2542)⁽¹⁰⁾ ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับระบบไซฟอนที่ฝ่ายริเวอร์เคนท์ (River Kent) ทางตอนเหนือของแม่น้ำเคนเดล (Kendal) โดยใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 250 มิลลิเมตรทำการเจาะช่องลมที่ด้านข้างไซฟอนช่วงกลาง วัดความเร็วลมด้วยอุปกรณ์วัดอัตราเร็วลมชนิดแผ่นออร์พิช จากการทดสอบสังเกตเห็นการเกิดฟองอากาศ มีขนาดเล็กวิ่งลงเป็นสายและท่อลมถูกต่อเข้าไปในไซฟอนและยึดด้วยสายรัดโลหะ จากการทดสอบพบว่าควรขยับปลายท่อลมในแนวนอนห่างจากศูนย์กลางท่อออกไปประมาณ 62.50 มิลลิเมตรหรือ $D/4$ เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อของไซฟอน เพื่อป้องกันการเกิดกระแสการไหลวน (Vertices forming)

French; et al. (2544) ⁽⁸⁾ ได้ทำการทดลองเรื่องไซฟอนและพบว่า ถ้าความดันที่ปลายท่อด้านออกของไซฟอนมีค่า 1.00 บาร์ ได้ค่าเฮดการลอยตัวเท่ากับ 1.25 เมตร และค่า Void fraction เท่ากับ 0.25 เมตร ถ้าใช้ค่า Void fraction สูงสุดที่เป็นไปได้ ซึ่งเท่ากับ 3.00 และจะได้ค่า Buoyancy head สูงสุดที่เป็นไปได้คือ 1.61 เมตร 6

Paish (2545) ⁽¹¹⁾ ได้ศึกษาเทคโนโลยีที่จะนำพลังงานขนาดเล็กมาใช้ผลิตไฟฟ้า ซึ่งได้จำแนกการใช้ชนิดกังหันที่เหมาะสมสำหรับระดับความสูงของเฮดน้ำและอัตราการไหลที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 1 รวมถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหันแต่ละชนิด จากการศึกษาของ Paish ในครั้งนั้นพบว่ากังหันแบบไหลสวนทาง (Cross flow turbine) นั้นเหมาะสำหรับใช้ผลิตกำลังกระแสไฟฟ้า



ภาพประกอบ 1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหันแต่ละชนิด⁽¹¹⁾

จากแหล่งพลังน้ำขนาดเล็กมากที่สุด และที่ระดับความสูงเฮดน้ำ 4 เมตร สามารถให้กำลังได้ถึง 5 กิโลวัตต์ และพบว่าประสิทธิภาพของกังหันแบบไหลสวนทางสำหรับพลังน้ำขนาดเล็กส่วนมากนั้น จะอยู่ในช่วงประมาณ 60 –80%

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็นการทดสอบ ที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนรูปพลังงานจากน้ำมาเป็นพลังงานลมด้วยวิธีไซฟอน โดยการเจาะช่องทางเข้าของลมที่ด้านบนและด้านข้าง(ข้าง) ของท่อไซฟอน จะเห็นได้ว่ายังมีแนวทางอื่นๆ อีกหลายวิธีการที่เป็นไปได้ในการเพิ่มสมรรถนะและประสิทธิภาพ ของการเหนี่ยวนำในการเพิ่มอัตราการไหลของลมในท่อของระบบไซฟอน สำหรับการทดสอบนี้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพไซฟอนด้วยการสอดท่อลมในท่อไซฟอนด้านข้างลึกตามแนวดิ่ง เพื่อให้ได้อัตราการไหลของลมสูงสุดและจะได้นำพลังงานลมจากระบบไซฟอนนี้ไปใช้หมุนกังหันขนาดเล็ก เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกต่อไป

2.2 การแบ่งประเภทของการไหล (Type of flow)

ลักษณะการไหลของของไหลอาจจะจำแนกออกได้โดยพิจารณาจากคุณสมบัติเฉพาะของตัวสสารเองหรืออาจพิจารณาจากองค์ประกอบภายนอกที่มีผลกับการไหล ซึ่งอาจจะจำแนกประเภทของการไหลจากเกณฑ์ต่างๆ ได้ดังนี้

2.2.1 กรณีที่ใช้มิติเป็นเกณฑ์พิจารณาการแบ่งประเภทของการไหล

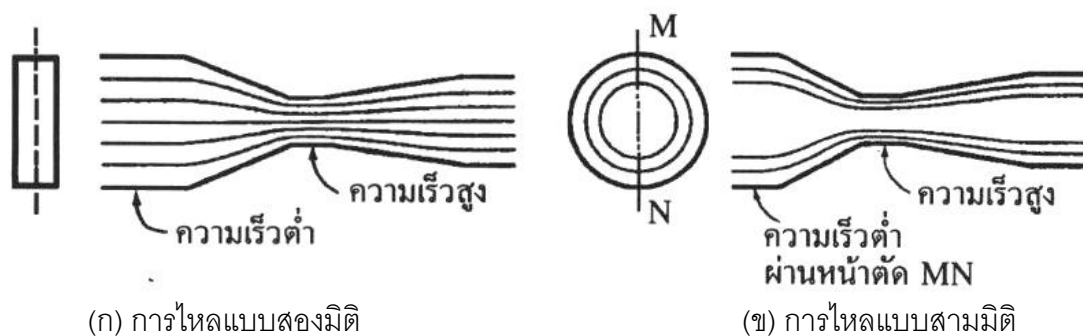
การใช้มิติเป็นเกณฑ์พิจารณาในการแบ่งประเภทการไหลจะแบ่งตามจำนวนมิติของการไหล โดยพิจารณาควบคู่ไปกับลักษณะของเส้นสายธารการไหลสามารถแบ่งประเภทการไหลได้ดังนี้

2.2.1.1 การไหลแบบหนึ่งมิติ

การไหลแบบหนึ่งมิติที่แท้จริงนั้นความเร็วที่จุดต่างๆ จะต้องมีทิศทางเหมือนกันและมีขนาดเท่ากัน การไหลแบบนี้ในสภาพจริงจะพบเห็นได้ยากมาก อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์เกี่ยวกับการไหลในเส้นกำหนดขอบเขต (Boundary) ต่างๆ นั้น ถือว่าการไหลนั้นเป็นการไหลในหนึ่งมิติ ทั้งนี้ที่ความจริงเป็นการไหลแบบสามมิติ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการไหลในหนึ่งมิติในที่นี้เป็นมิติที่วัดไปตามเส้นสายธารการไหล (Streamlines) โดยนำค่าเฉลี่ยของความเร็ว ความดันและระดับความสูง ตลอดพื้นที่หน้าตัดของการไหลนั้นมาใช้

2.2.1.2 การไหลแบบสองมิติ

พิจารณาเส้นสายธารการไหลดังแสดงในภาพประกอบ 2 (ก) เส้นสายธารการไหลทุกเส้นเป็นเส้นโค้งที่อยู่ในระนาบเดียวกันและเส้นสายธารการไหลแต่ละระนาบที่ขนานกันนั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกัน จะเรียกการไหลนั้นว่าการไหลแบบสองมิติ แสดงให้เห็นว่าขนาดของช่องการไหลในทุกหน้าตัดและระยะห่างระหว่างเส้นสายธารการไหลมีขนาดเท่ากัน ซึ่งจะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อเป็นของไหลในจินตนาการ



ภาพประกอบ 2 ของไหลในจินตนาการที่ไหลแบบสองมิติและสามมิติ

2.2.1.3 การไหลแบบสามมิติ

พิจารณาเส้นสายธารการไหลดังแสดงในภาพประกอบ 2 (ข) จะเห็นว่าหน้าตัดของการไหลเป็นรูปวงกลม ส่วนหน้าตัดตามแนวยาวจะตัดผ่านเส้นผ่านศูนย์กลาง MN ในกรณีนี้เส้นสายธารการไหลในหน้าตัดตามแนวยาวจะเป็นเส้นโค้ง ซึ่งถ้าไม่มีแรงย่อยในแนวที่ตั้งฉากกับเส้นสายธารการไหลระยะห่างระหว่างเส้นสายธารการไหลจะเท่ากัน ถ้าระยะห่างระหว่างเส้นสายธารการไหลไม่เท่ากันแสดงว่ามีแรงมากระทำทำให้การเคลื่อนที่มีมิติมากขึ้นเป็นสามมิติ

2.2.2 กรณีที่ใช้เวลาเป็นเกณฑ์พิจารณาการแบ่งประเภทของการไหล

เมื่อนำค่าความเร็วของการไหลที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งมาพิจารณาและพบว่าไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา การไหลนั้นเรียกว่าการไหลแบบสภาวะคงตัว (Steady flow) ถ้าค่าความเร็วเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจะเรียกว่าการไหลแบบสภาวะไม่คงตัว (Unsteady flow) แต่อย่างไรก็ตามความเร็วของของไหลแต่ละตำแหน่งไม่จำเป็นจะต้องเท่ากันในทุกตำแหน่ง

2.2.3 กรณีที่ใช้ตำแหน่งเป็นเกณฑ์พิจารณาการแบ่งประเภทของการไหล

ถ้าความเร็วของการไหลในขณะใดขณะหนึ่งไม่เปลี่ยนทั้งขนาดและทิศทาง ตลอดระยะทางหรือตำแหน่งการไหลนั้นเรียกว่าการไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform flow) ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามระยะทางหรือตำแหน่งก็เรียกว่าการไหลแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform flow) จากสภาพการไหลต่างๆ ไปแล้วการไหลที่เกิดขึ้นจะเป็นการผนวกกันของประเภทการไหลมากกว่าหนึ่งประเภท เช่น กรณีที่ใช้เวลาพิจารณาและกรณีที่ใช้ตำแหน่งในการพิจารณาสามารถแบ่งสภาพการไหลออกได้เป็น 4 แบบดังนี้

2.2.3.1 การไหลแบบสม่ำเสมอในสภาวะคงตัว (Steady uniform flow) เช่น การไหลด้วย อัตราการไหลคงที่ผ่านท่อตรงที่มีความยาวมาก

2.2.3.2 การไหลแบบไม่สม่ำเสมอในสภาวะคงตัว (Steady non-uniform flow) เช่น การไหลด้วยอัตราการไหลคงที่ผ่านท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ค่อยๆ ขยายใหญ่ขึ้น

2.2.3.3 การไหลแบบสม่ำเสมอในสภาวะไม่คงตัว (Unsteady uniform flow) เช่นการไหลในท่อตรงที่มีอัตราการไหลไม่คงที่

2.2.3.4 การไหลแบบไม่สม่ำเสมอในสภาวะไม่คงตัว (Unsteady non-uniform flow) เช่น การไหลด้วยอัตราการไหลไม่คงที่ผ่านท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ค่อยๆ ขยายใหญ่ขึ้น

2.2.4 กรณีที่ใช้ความเป็นระเบียบเป็นเกณฑ์พิจารณาการแบ่งประเภทของการไหล

ความเป็นระเบียบของของไหลสามารถวัดได้ด้วยค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์ในรูปของอัตราส่วนของแรงเฉื่อยของของไหลต่อความหนืดของของไหล ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เป็นค่าที่ไม่มีหน่วยแต่สามารถใช้เป็นเกณฑ์แบ่งประเภทการไหลได้ดังนี้

2.2.4.1 การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) เป็นการไหลที่เส้นสายธารการไหลของของไหลมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ สำหรับการไหลในท่อด้านค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าน้อยกว่า 3,000 ส่วนการไหลในช่องเปิด (Open channel) ค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าน้อยกว่า 500 ถือว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ(3)

2.2.4.2 การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) เป็นการไหลที่เส้นสายธารการไหลมีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ สำหรับการไหลในท่อด้านค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่ามากกว่า 10,000 ส่วนการไหลในช่องเปิดค่าตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 2,500 ถือว่าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (3)

2.2.5 กรณีที่ใช้ความหนาแน่นเป็นเกณฑ์พิจารณาการแบ่งประเภทของการไหล

ความหนาแน่นเป็นลักษณะเฉพาะของของไหลแต่ละชนิดและค่าความหนาแน่นนี้สามารถจะเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ของไหลนั้นถูกความดันภายนอกกระทำ สามารถแบ่งประเภทการไหลโดยใช้การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหลเป็นเกณฑ์พิจารณาได้ดังนี้

2.2.5.1 การไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow) เป็นการไหลที่ไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของของไหล เนื่องจากของเหลวต่างๆ นั้นอัดตัวได้น้อยมาก ดังนั้นจึงถือว่าของเหลวทุกชนิดเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ ตัวอย่างการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ เช่น การไหลของน้ำภายในท่อ เป็นต้น

2.2.5.2 การไหลแบบอัดตัวได้ (Compressible flow) เป็นการไหลที่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของของไหล เช่น การไหลของลมภายในท่อ เป็นต้น

2.2.6 กรณีที่ใช้การหมุนเป็นเกณฑ์พิจารณาการแบ่งประเภทของการไหล

มีค่าพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่ใช้ในการระบุสภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลว่ามีการเคลื่อนที่แบบหมุนหรือแบบไม่หมุนค่าดังกล่าวคือค่าอัตราเร็วเชิงมุม (ω) ค่าอัตราเร็วเชิงมุมเป็นอัตราส่วนของความเร็วเชิงเส้นต่อรัศมี นอกจากนี้ยังมีความเร็วเชิงมุม (ξ) ซึ่งความเร็วเชิงมุมนี้ถูกนิยามว่ามีค่าเป็นสองเท่าของค่าอัตราเร็วเชิงมุม ดังนั้นการระบุว่าการไหลมีการเคลื่อนที่แบบหมุนหรือไม่จึงใช้ค่าอัตราเร็วเชิงมุมหรือความเร็วเชิงมุมก็ได้ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข) โดยความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุมจะอยู่ในรูป

$$\omega = \frac{1}{2}(\text{curl } V) \quad (2.1)$$

$$\omega = \frac{1}{2}(\nabla \times V) \quad (2.2)$$

การไหลที่ค่า $\omega = 0$ จะเป็นการไหลแบบไม่หมุน (Irrotational flow) ส่วนการไหลที่ค่า $\omega \neq 0$ จะเป็นการไหลแบบหมุน (Rotational flow) และเมื่อนิยามความเร็วเชิงมุม (ξ) ว่าเป็นสองเท่าของความเร็วเชิงมุม ดังนั้นความเร็วเชิงมุม (ξ) จึงมีค่าเป็น

$$\xi = \nabla \times V \quad (2.3)$$

นอกจากนี้ลักษณะของการไหลแบบหมุนยังสามารถแบ่งเป็นการไหลหมุนแบบบังคับ (Forced rotational vortex) เป็นการไหลแบบหมุนที่มีการใช้แรงจากภายนอกมากระทำให้เกิดแรงบิดแก่ของไหลนั้น ตัวอย่างของการไหลหมุนแบบบังคับได้แก่การหมุนของของเหลวที่อยู่ในช่องว่างระหว่างครีบบพัดของเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง หรือการหมุนของแก๊สในเครื่องอัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ส่วนการไหลแบบหมุนอีกประเภทหนึ่งคือการไหลหมุนแบบอิสระ (Free rotational vortex) ในกรณีของการไหลหมุนอิสระนั้น ไม่ต้องใช้พลังงานใดๆ จากแหล่งภายนอกมาทำให้ของไหลนั้นหมุนเลย ของไหลนั้นสามารถหมุนได้โดยอาศัยการหมุนตัวที่มีมาแต่ดั้งเดิม หรือจากพฤติกรรมภายในของของไหลเอง ตัวอย่างการไหลหมุนอิสระได้แก่ น้ำวน (Whirl pool) ในแม่น้ำ เป็นต้น

2.2.7 กรณีที่ใช้ลักษณะของวัตถุที่ไหลผ่านเป็นเกณฑ์พิจารณาการแบ่งประเภทของการไหล เป็นการใช้ลักษณะที่ของไหลไหลผ่านวัตถุที่สัมผัสกับของไหลนั้น เป็นความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างผิวของของไหลกับผิวของวัตถุที่ของไหลนั้นไหลผ่าน ซึ่งสามารถแบ่งประเภทการไหลได้เป็น

2.2.7.1 การไหลแบบภายใน (Internal flow) เป็นการไหลที่ผิวด้านข้างของของไหลถูกห่อหุ้มด้วยผนังทอที่เป็นของแข็งทั้งหมด

2.2.7.2 การไหลแบบภายนอก (External flow) เป็นการไหลที่ของแข็งที่เป็นผิวของอุปกรณ์ถูกห่อหุ้มด้วยของไหลทั้งหมด ตัวอย่างของไหลภายนอกได้แก่ การไหลผ่านเครื่องบิน รถยนต์ ปีกกังหันเทอร์ไบน์

2.2.7.3 การไหลแบบเปิด (Open channel flow) เป็นการไหลโดยที่ผิวด้านข้างของของไหลบางส่วนถูกห่อหุ้มด้วยผิวทอซึ่งเป็นของแข็ง แต่บางส่วนเปิดออกสู่บรรยากาศ และการไหลนี้จำกัดอยู่เฉพาะของเหลวเท่านั้นเนื่องจากแก๊สมีลักษณะฟุ้งกระจายจึงไม่อาจมีการไหลแบบเปิดออกสู่บรรยากาศได้ การที่ผิวของของไหลเปิดสู่บรรยากาศทำให้เกิดพื้นผิวอิสระ (Free surface) ซึ่งเป็นผลดีต่อการวิเคราะห์คือ ทำให้ผิวของของไหลมีค่าคงที่เท่ากับความดันบรรยากาศตลอดแนวการไหลในท่อเปิด

การบอกลักษณะการไหลของของไหลในท่อที่สมบูรณ์แบบจะต้องบอกให้ครบอย่างน้อยสามประเภทการไหล เช่น การไหลเป็นแบบราบเรียบ สม่าเสมอในสภาวะคงตัว (Steady, Uniform and Laminar) หรือการไหลเป็นแบบปั่นป่วน ไม่สม่าเสมอในสภาวะไม่คงตัว (Unsteady, Uniform and Turbulent) เป็นต้น ส่วนการกำหนดสภาวะการไหลเป็นการกำหนดขอบเขตและเงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์

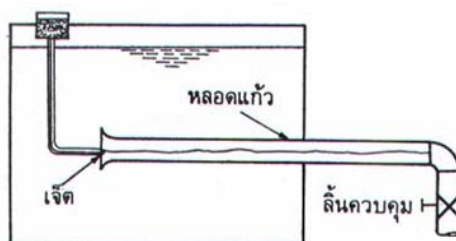
2.3 การไหลของของไหลหนืดภายในท่อ (Viscous flow in ducts)

การไหลภายในท่อของของไหลที่มีความหนืดเป็นการตั้งเกณฑ์พิจารณาถึงคุณสมบัติของของไหลในท่อที่ว่าของไหลมีความหนืด ซึ่งผลที่ตามมาก็คือท่อที่ของไหลไหลผ่านก็มีความเสียดทานเกิดขึ้นกับของไหลด้วยเช่นกัน ความความเสียดทานเกิดขึ้นที่ผิวทอกับชั้นของของไหลจะเป็นผลทำให้สภาพการไหลเปลี่ยนไป

2.3.1 การทดลองของเรย์โนลด์ (Reynold's experiment)

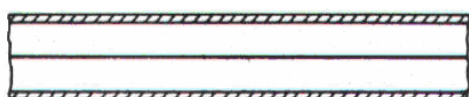
ในปี พ.ศ.2426 ออสบอร์น เรย์โนลด์ได้ทำการทดลองพบว่า การไหลของของไหลแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบราบเรียบ และแบบปั่นป่วน โดยใช้ชุดทดลองที่ประกอบด้วยถังบรรจุน้ำชนิดให้เกิดเสถียรภาพ ดันคงที่ และมีถังเล็กๆ บรรจุสีอยู่ด้านบนที่บริเวณกลางถังมีหลอดแก้ววางในแนวนอน ปลายข้างหนึ่งผายออก ปลายอีกข้างหนึ่งยื่นออกมานอกถัง และมีลิ้นควบคุมติดอยู่ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.3 น้ำ

จะไหลออกจากถังผ่านหลอดแก้วสู่บรรยากาศ โดยปรับความเร็วในการไหลด้วยลิ้นควบคุมที่ปลายทางที่ปากทางเข้าหลอดแก้วจะมีท่อเล็กๆ ต่อจากถังสีเพื่อปล่อยสีให้ผสมไปกับน้ำ สีที่ใช้จะมีน้ำหนักจำเพาะเท่ากับน้ำ

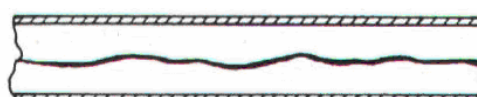


ภาพประกอบ 3 การทดลองของเรย์โนลด์แสดงรูปแบบของการไหล

การทดลองของเรย์โนลด์ แสดงดังภาพประกอบ 3 พบว่าเมื่อการไหลมีความเร็วต่ำ ลักษณะของเส้นของสีที่ปรากฏจะราบเรียบ เป็นเส้นตรงนิ่ง เหมือนไม่มีการเคลื่อนไหวดังภาพประกอบ 4 (ก) แต่เมื่อเพิ่มความเร็วของการไหลขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงค่าหนึ่งเส้นสีที่ปรากฏก็จะมีแกว่งของแถบน้ำสีและเมื่อมีการปรับค่าความเร็วให้มากขึ้น แถบสีก็จะมีอาการกระจายทั่วภายในท่อ ดังภาพประกอบ 4 (ข) และกระจายไปทั่วหน้าตัดของท่อดังภาพประกอบ 4 (ค) และจากนั้นนำสภาวะต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการทดลองมาพิจารณาและวิเคราะห์ตามลักษณะของเส้นสี เมื่อความเร็วของการไหลมีการเปลี่ยนแปลง



(ก) การไหลแบบราบเรียบ



(ข) ช่วงการเปลี่ยนแปลง



(ค) การไหลแบบปั่นป่วน.

ภาพประกอบ 4 ลักษณะของเส้นสีในการไหลของของไหล

เรย์โนลด์ได้สรุปผลการทดลองนี้ว่า เมื่อความเร็วในการไหลมีค่าต่ำ อนุภาคของของไหลจะไม่แตกกระจายและเคลื่อนที่ในแนวขนานเป็นชั้นๆ ไม่ปะปนกัน ซึ่งเป็นลักษณะของการไหลแบบราบเรียบ แต่ที่ความเร็วสูงๆ เส้นสีจะแตกกระจาย แสดงว่าอนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ปะปนกัน ไม่เป็นระเบียบอันเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ส่วนช่วงของความเร็ววิกฤต (Critical velocity) นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของของ

ไหล อุณหภูมิและลักษณะของท่อ สำหรับสภาวะการไหลที่เกิดขึ้นระหว่างการไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วน เรียกว่า “Transitional state” คือสภาพที่การไหลมีการเปลี่ยนแปลง

จากการทดลองดังกล่าว เรย์โนลด์ได้พบว่าสาเหตุของการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนนี้ เป็นผลมาจากแรงเฉื่อยและความหนืด กล่าวคือที่ความเร็วต่ำแม้ว่าของไหลมีความหนืดน้อย แต่แรงอันเกิดจากความหนืดจะมีค่ามากกว่าแรงอื่นๆ แต่ที่ความเร็วสูงๆ แรงเฉื่อยจะมีค่ามากกว่าแรงอันเกิดจากความหนืด เรย์โนลด์ได้แสดงความสัมพันธ์ของแรงเฉื่อยและแรงอันเกิดจากความหนืดไว้ ซึ่งเรียกว่า ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ค่าตัวเลขเรย์โนลด์จะไม่มีหน่วย ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Re = \frac{\text{แรงเฉื่อย}}{\text{แรงจากความหนืด}} = \frac{F_i}{F_v} \quad (2.4)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล
 μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล
 V คือ ความเร็วในการไหล
 D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ

2.3.2 กฎความหนืดของนิวตัน (Newton's laws of viscosity)

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law)

$$F = ma \quad (2.5)$$

$$= \rho \forall a$$

จากการวิเคราะห์มิติจะได้ว่า

$$= \rho \times L^3 \times L \times T^{-2}$$

$$= \rho \times L^2 V^2$$

และจากกฎของนิวตันที่เกี่ยวข้องกับความหนืด

$$F_v = \tau A \quad (2.6)$$

$$= \mu \frac{dV}{dy} A$$

จากการวิเคราะห์มิติ:

$$= \mu \times V \times L^{-1} \times L^2$$

$$= \mu V A$$

ดังนั้นจะได้

$$Re = \rho \frac{L^2 V^2}{\mu V L}$$

$$= \rho \frac{LV}{\mu}$$

$$\text{Re} = \rho \frac{VD}{\mu} \quad (2.7)$$

เมื่อ	ρ	คือ	ความหนาแน่นของของไหล
	μ	คือ	ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล
	L	คือ	มิติของขนาด
	T	คือ	มิติของเวลา
	V	คือ	ความเร็วในการไหล
	D	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ

สำหรับการไหลในท่อกลมความเร็วในการไหลจะเป็นค่าเฉลี่ยของความเร็ว และ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ ให้ $\nu = \mu/\rho$ คือค่าความหนืดจลน์ศาสตร์ของของไหล (Kinematics viscosity of fluid) ดังนั้นจะได้

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \quad (2.8)$$

ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เป็นค่าที่สำคัญมากในการระบุว่าการไหลของของไหลในท่อจะเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน ดังนั้นสำหรับการไหลในท่อ ในทางปฏิบัติเราอาจคาดการณ์ได้ว่าการไหลนั้นจะเป็นแบบราบเรียบถ้าค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่า 3,000 และการไหลเป็นแบบปั่นป่วนถ้าค่าตัวเลขเรย์โนลด์ มากกว่าประมาณ 10,000

อย่างไรก็ตามค่าตัวเลขเรย์โนลด์นี้ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมทางเรขาคณิตด้วย เช่นการไหลระหว่างแผ่นราบนั้นค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ที่คำนวณโดยใช้ค่าความเร็วเฉลี่ยและระยะห่างระหว่างระนาบนั้นจะมีค่าประมาณ 1,000 ในกรณีการไหลในช่องทางเปิด (Open channel) ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่คำนวณจากค่าความเร็วเฉลี่ย และความลึกของการไหลนั้นจะมีค่าประมาณ 500 สำหรับการไหลรอบๆ ทรงกลม ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่คำนวณจากค่าความเร็วที่เข้าหาทรงกลมและเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมจะมีค่าประมาณ 1

2.3.3 กฎของความเสียดทานของของไหล (Law of fluid friction)

ความเสียดทานในการไหลขึ้นอยู่กับชนิดของการไหลจากการทดลองสามารถสรุปกฎของความเสียดทานของการไหลทั้ง 2 แบบ ได้ดังต่อไปนี้

2.3.3.1 กฎของความเสียดทานในการไหลแบบราบเรียบ ความเสียดทานในกรณีของการไหลแบบราบเรียบ จะมีลักษณะดังนี้

- ก) เป็นสัดส่วนกับความเร็วในการไหล
- ข) ไม่ขึ้นกับความดัน
- ค) เป็นสัดส่วนกับพื้นที่ของผิวสัมผัส
- ง) ไม่ขึ้นกับลักษณะผิวสัมผัส
- จ) ถ้าอุณหภูมิของไหลเปลี่ยนไปจะมีผลต่อความเสียดทานมาก

จากที่กล่าวว่าความเสียดทานในการไหลไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะผิวสัมผัสนั้นเนื่องจากการไหลแบบราบเรียบ ความเร็วในการไหลจะต่ำกว่าความเร็ววิกฤต จะเกิดฟิล์มของของไหลปกคลุมผิวสัมผัส ฟิล์มนี้จะติดอยู่กับผิวเสมอ ดังนั้นจึงกันไม่ให้ของไหลได้สัมผัสกับผิวโดยตรง และในการไหลแบบราบเรียบ ความเสียดทานจะเกิดจากค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืดเท่านั้น และค่าความหนืดของของไหลก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของของไหลเอง

2.3.3.2 กฎของความเสียดทานในการไหลแบบปั่นป่วนความเสียดทานในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วนจะมีลักษณะดังนี้

- ก) ความเสียดทานจะแปรผันตามค่าความเร็วยกกำลังสอง
- ข) ไม่ขึ้นกับความดัน
- ค) เป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของของไหล
- ง) ถ้าอุณหภูมิของของไหลเปลี่ยนไปจะมีผลต่อความเสียดทานเพียงเล็กน้อย
- จ) เป็นสัดส่วนกับพื้นที่ของผิวสัมผัส
- ฉ) ขึ้นกับลักษณะผิวสัมผัส

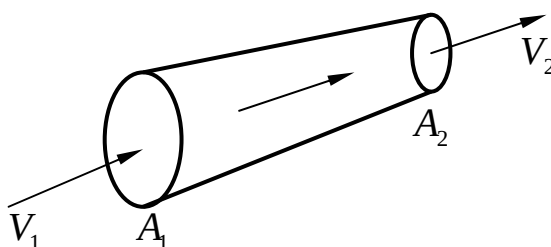
2.4 สมการควบคุมการไหล (Governing equation)

เป็นสมการกำหนดสำหรับใช้ในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล ในทางกลศาสตร์ได้จัดแบ่งสมการควบคุมออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือสมการควบคุมแบบอนุพันธ์ (Differential) และแบบปริพันธ์ (Integral) ในรูปแบบอนุพันธ์นั้นสมการควบคุมจะเป็นสมการอนุพันธ์แบบพาเซี่ยล ซึ่งแสดงการอนุรักษ์คุณสมบัติการไหล ณ จุดใดๆ ในสนาม (Field) และพิกัด (Coordinate) คำตอบที่

ได้มีความละเอียดมาก เพราะจะได้คำตอบเป็นฟังก์ชันของพิกัด สำหรับสมการในรูปแบบปริพันธ์นั้น ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสมการพีชคณิตซึ่งค่าที่ใช้เฉลี่ยในการสร้างสมการอนุพันธ์ต่างๆ คำตอบที่ได้มีความหยابกว่าคำตอบจากสมการแบบอนุพันธ์ แต่อย่างไรก็ตามคำตอบนี้มักคำนวณหาได้ง่ายและค่าที่ได้ถึงแม้ไม่ถูกต้องมากนักแต่ก็เป็นแนวทางในการออกแบบได้ สมการที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นแบบปริพันธ์ทั้งหมด

2.4.1 สมการความต่อเนื่อง (Equation of continuity)

สมการความต่อเนื่อง ใช้ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของของไหลโดยใช้กฎการอนุรักษ์ของมวล



ภาพประกอบ 5 การไหลของของไหลผ่านท่อกลมที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดต่างกัน

พิจารณาจากภาพประกอบ 5 ของไหลไม่สามารถไหลเข้ามาออกมาจากท่อการไหล (Steam tube) ได้ ดังนั้นของไหลที่ไหลเข้าทางหน้าตัด A_1 ด้วยความเร็ว V_1 จะไหลออกมาทางหน้าตัด A_2 ด้วยความเร็ว V_2 เมื่อเป็นการไหลแบบสภาวะคงตัว มวลของของไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา สำหรับของไหลประเภทเดียวกัน ที่มีค่าความหนาแน่นคงที่ สมการอัตราการไหลเขียนได้เป็น

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = Q \quad (2.9)$$

โดยที่ Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหล
 V คือ ความเร็วเฉลี่ยของกระแสไหล
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อทางการไหลในทิศทางตั้งฉากกับกระแสการไหล

2.4.2 สมการการอนุรักษ์ของโมเมนตัม (Conservation of momentum equation)

จากคำนิยามที่ว่าอัตราการเปลี่ยนโมเมนตัมในปริมาตรควบคุมย่อมเท่ากับแรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมบวกกับอัตราสุทธิของการไหลเข้าปริมาตรควบคุมของโมเมนตัม สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ว่า

$$\frac{d(m\mathbf{V})_{CV}}{dt} = F_{CV} + \dot{m}_{in}V_{in} - \dot{m}_{out}V_{out} \quad (2.10)$$

โดยที่ $\dot{m}$ คือ มวลของของไหล
 $\mathbf{V}$ คือ ปริมาตรภายในปริมาตรควบคุม
 F_{CV} คือ แรงภายนอกที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม
 V คือ ความเร็วของของไหล

ซึ่งการไหลเข้ามาของปริมาตรควบคุมของโมเมนตัมนั้นเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $(\dot{m}_{in}V_{in})$ โดยเวกเตอร์ความเร็ว นั้น คือโมเมนตัมต่อหน่วยมวล เมื่อคูณกับอัตราไหลของมวลที่กำลังวิ่งเข้าปริมาตรควบคุม จึงเป็นอัตราของโมเมนตัมที่กำลังวิ่งเข้าสู่ปริมาตรควบคุม ส่วนการวิ่งออกจากปริมาตรควบคุม $(\dot{m}_{out}V_{out})$ ก็เป็นในลักษณะเดียวกัน สมการโมเมนตัมเป็นการรวมกันของพจน์ต่างๆ ในรูปสมการของเวกเตอร์ซึ่งมีทั้งขนาดและทิศทาง การบวกกันของเวกเตอร์ในระนาบสามมิติต้องแบ่งเป็นองค์ประกอบตามแนวแกน x, y และ z

สมการการอนุรักษ์โมเมนตัมดังกล่าวเป็นสมการของเวกเตอร์ การจะนำพจน์ต่างๆมารวมกันจะต้องแตกสมการเวกเตอร์เป็นสมการพีชคณิตถึงสามสมการในทิศทางพื้นฐาน โดยใช้พิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinates) หรือพิกัดฉากจะสามารถเขียนสมการทั้งสามในรูปแกน x, y และ z ได้ดังนี้

$$\frac{d(mV_x)_{CV}}{dt} = F_{x,CV} + \dot{m}_{in}V_{x,in} - \dot{m}_{out}V_{x,out} \quad (2.11)$$

$$\frac{d(mV_y)_{CV}}{dt} = F_{y,CV} + \dot{m}_{in}V_{y,in} - \dot{m}_{out}V_{y,out} \quad (2.12)$$

$$\frac{d(mV_z)_{CV}}{dt} = F_{z,CV} + \dot{m}_{in}V_{z,in} - \dot{m}_{out}V_{z,out} \quad (2.13)$$

จะเห็นได้ว่ารูปสมการเป็นรูปเดิมเพียงแต่เปลี่ยนเวกเตอร์ความเร็ว (V) เป็นองค์ประกอบเวกเตอร์ทางแกน xyz เท่านั้น องค์ประกอบเวกเตอร์และแรงประกอบเหล่านี้ต้องมีเครื่องหมายบวกหรือลบแล้วแต่ทิศทางไปทางแกนบวกหรือแกนลบ เมื่อคำนวณค่าองค์ประกอบทั้งเวกเตอร์ทั้งสามได้แล้วจึงนำผลลัพธ์สุดท้ายมารวมกันเป็นเวกเตอร์อีกครั้งซึ่งเป็นคำตอบสุดท้าย ถ้าไม่ได้คำนึงถึงจุดนี้จะได้ผลการคำนวณที่ได้ไม่ถูกต้อง

หากการไหลเข้าและออกปริมาตรควบคุมมีองค์ประกอบในทิศทางเดียวและการไหลเป็นแบบคงตัว พจน์ซ้ายมือของสมการ (2.13) จะมีค่าเป็นศูนย์ สามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ว่า

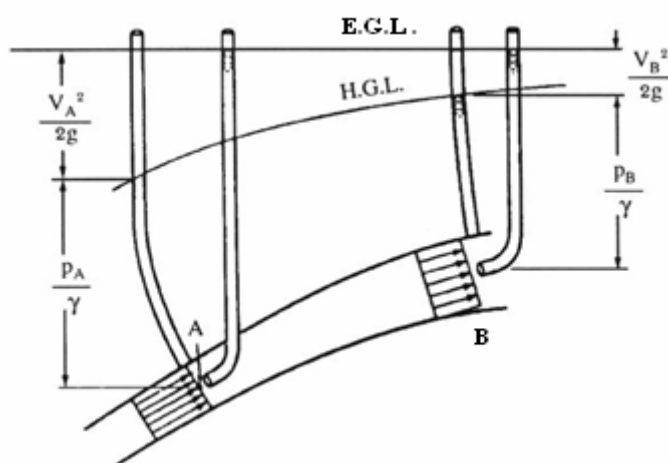
$$F_{CV} = \dot{m}_{in} V_{in} - \dot{m}_{out} V_{out} \quad (2.14)$$

และแรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมที่สำคัญประกอบด้วย แรงจากความดัน (F_p) แรงเนื่องจากความเสียดทาน (F_f) และแรงเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก (F_g)

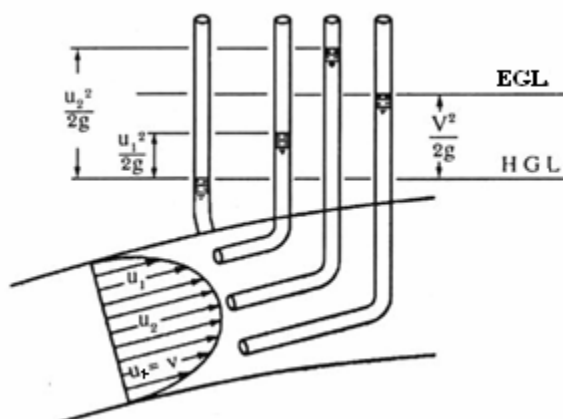
$$F_{CV} = F_p + F_f + F_g \quad (2.15)$$

2.4.3 สมการการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy equation)

เป็นการกล่าวถึงความสัมพันธ์ของความร้อน งานและอัตราการไหลของพลังงานเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่ายจึงขอกกล่าวเส้นระดับของของไหล (Hydraulics Grade Line; HGL) และเส้นระดับพลังงานของของไหล (Energy Grade Line; EGL)



ภาพประกอบ 6 เส้น HGL และ EGL ของของไหลในจินตนาการ



ภาพประกอบ 7 ตำแหน่งในการวัดหาค่า HGL และ EGL ของของไหล

2.4.3.1 เส้น Hydraulics Grade Line (HGL) และ Energy Grade Line (EGL)

จากระดับของเหลวในหลอดดังแสดงในภาพประกอบ 6 เส้นที่ลากผ่านระดับความสูงของน้ำในหลอดปิโตมิเตอร์ที่ต่อมาจากผิวด้านข้างของ Stream tube เรียกเส้นความชันของของไหลนั้นว่า HGL ระดับความสูงของของไหลนั้นมีค่าเป็น $Z + \frac{P}{\gamma}$ ส่วนเส้น EGL เป็นเส้นที่ลากผ่านระดับน้ำในหลอดพิทอต (Pitot tube) ที่หันด้านปลายท่อไปทางต้นน้ำจะกีดขวางเส้นทางการไหลของพลังงานจลน์ ดังนั้นระดับของของไหลในหลอดพิทอตจึงเป็นค่าของพลังงานรวม (Total energy head) ระดับความสูงของของไหลในท่อพิทอตจึงมีค่าเป็น $Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}$ จากภาพประกอบ 6 แสดงให้เห็นการไหลของของไหลในจินตนาการเนื่องจากเส้น EGL จะอยู่ในแนวระดับ ทั้งนี้เพราะในกรณีของของไหลในจินตนาการนั้นจะไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้น หลอดพิทอตนี้เป็นตัวกีดขวางเส้นทางการไหลของพลังงานจลน์ของของไหลที่อยู่ในตำแหน่งที่ติดตั้งหลอดพิทอตนั้น ดังนั้นระดับของเหลวในหลอดพิทอต ที่อยู่นิ่งจุดที่วัดจึงมีค่าเป็น $Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{u_x^2}{2g}$ เมื่อ u_x เป็นความเร็วของของไหลตรงจุดที่วัด ถ้าต้องการให้หลอดพิทอต แสดงเส้น EGL ที่ถูกต้องแล้วก็ต้องใช้หลอดพิทอตนี้วัดความเร็วของของไหลตรงจุดที่มีความเร็ว $\frac{u_x^2}{2g} = \phi \left(\frac{V^2}{2g} \right)$ แต่ถ้าหากต้องการค่า EGL ที่มีค่า ϕ เท่ากับ 1 ก็จะต้องเอาหลอดพิทอตไปวัดตรงจุดที่มีความเร็ว $u_x = V$ จึงจะได้ค่าที่ถูกต้อง

2.4.3.2 สมการการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation equation)

จากคำกล่าวที่ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในปริมาตรควบคุมย่อมเท่ากับ อัตราการถ่ายโอนความร้อนและงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าปริมาตรควบคุม บวกกับอัตราสุทธิของการไหลเข้าของพลังงานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุมสมการพลังงาน หากกำหนดให้ e เป็นพลังงานต่อหน่วยมวลของของไหลจะสามารถเขียนสมการพลังงานตามที่ได้กล่าวไว้ได้ดังนี้

$$\frac{d(Me)_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_{in} e_{in} - \sum \dot{m}_{out} e_{out} \quad (2.16)$$

เมื่อ M คือ มวลของของไหล

$\dot{Q}$ คือ การถ่ายเทความร้อนระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม

$\dot{W}$ คือ การถ่ายเทงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลของมวลที่เข้าออกปริมาตรควบคุม

และจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์เกี่ยวกับการอนุรักษ์พลังงานในระบบปิด ที่ว่าพลังงานย่อมไม่สูญหายหรือสร้างขึ้นใหม่ได้ ดังนั้นทำให้พจน์ทางซ้ายของสมการ (2.16) มีค่าเป็น 0 และในกรณีที่การไหลเป็นแบบคงตัวและทางออกทางเดียวสมการจะลดรูปได้เป็น

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(e_{in} - e_{out}) \quad (2.17)$$

เมื่อนำค่า $\dot{m}$ มาหารตลอดจะได้สมการใหม่ในรูปของพลังงานต่อหน่วยมวล

$$q - w = m(e_{in} - e_{out}) \quad (2.18)$$

โดยพลังงานต่อหน่วยมวล (e) สามารถแจกแจงได้เป็นองค์ประกอบสามประการคือ พลังงานความร้อนหรือพลังงานภายใน (u) พลังงานจลน์ ($\frac{V^2}{2g}$) และพลังงานศักย์ (gz) ดังนั้นจึงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการพลังงานได้ดังนี้

$$e = u + \frac{V^2}{2g} + gz \quad (2.19)$$

พจน์ q จากสมการ (2.18) เป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างปริมาตรควบคุมกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีอยู่สามรูปคือ การนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อน โดยทั่วไปในเรื่องกลศาสตร์ของไหลจะกล่าวถึงพลังงานส่วนนี้ภายในลักษณะภาพรวม ส่วนพจน์ w เป็นงานต่อหน่วยมวลมีสามรูปแบบคือ งานเนื่องจากเพลา (w_s) งานเนื่องจากความเสียดทาน (w_{fr}) และงานเนื่องจากการไหล (w_{fl}) ดังนั้นจะได้

$$w = w_s + w_{fr} + w_{fl} \quad (2.20)$$

$$\text{และจากงานเนื่องจากการไหล} \quad w_{fl} = (PAV)_{in} - (PAV)_{out} \quad (2.21)$$

$$\text{และ} \quad \dot{m} = (\rho AV)_{in} - (\rho AV)_{out} \quad (2.22)$$

ดังนั้นงานเนื่องจากการไหลต่อหน่วยมวลคือ

$$w_{fl} = \left(\frac{PAV}{\rho AV} \right)_{out} - \left(\frac{PAV}{\rho AV} \right)_{in} \quad (2.23)$$

$$w_{fl} = \left(\frac{P}{\rho} \right)_{out} - \left(\frac{P}{\rho} \right)_{in} \quad (2.24)$$

เมื่อนำพลังงานและงานต่อหนึ่งหน่วยมวลทั้งหมดมาแทนค่าในสมการ (2.18) แล้วจัดรูปสมการเสียใหม่จะได้

$$q - (w_s - w_{fr}) = \left(u + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2g} + gz \right)_{out} - \left(u + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2g} + gz \right)_{in} \quad (2.25)$$

พิจารณาสมการที่ตำแหน่ง 1 และ 2 ในปริมาตรควบคุม เมื่อระบบทำงานที่อุณหภูมิคงที่ ดังนั้น ($u_1 = u_2$) เมื่อไม่มีงานเข้าออกปริมาตรควบคุม ($w_s = 0$) และเมื่อไม่พิจารณาแรงเสียดทาน ($w_{fr} = 0$) ดังนั้นจะได้สมการใหม่ในรูป

$$\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (2.26)$$

เรียกสมการ (2.26) ว่าสมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's equation) เพื่อเป็นเกียรติแก่ Daniel Bernoulli ผู้คิดค้นสมการนี้ได้ เมื่อปี พ.ศ. 2281 สมการเบอร์นูลลี ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง จากสมการเบอร์นูลลี หากพิจารณาแต่ละเทอมสามารถแยกได้เป็น

$\frac{P}{\gamma}$ เรียกว่า เฮดความดัน แทนพลังงานความดันต่อหน่วยน้ำหนักของของไหลอันเนื่องมาจากความดันในของไหล

$\frac{V^2}{2g}$ เรียกว่า เฮดความเร็ว แทนพลังงานจลน์ต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล เนื่องจากความเร็วของของไหล

z เรียกว่า เฮดความสูง แทนพลังงานศักย์ต่อหน่วยน้ำหนักของของไหลเนื่องจากระดับความสูงของของไหล

สมการเบอร์นูลลีนี้สามารถสร้างได้จากสามกรณีวิธีคือ หนึ่งได้จากการบัญญัติขึ้นมาเป็นกฎธรรมชาติโดยเริ่มวิเคราะห์จากกระบวนการที่อุณหภูมิกคงตัว ทำให้กระบวนการดังกล่าวไม่มีการพิจารณาความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้น ก็จะเหลือส่วนที่พิจารณาคือพลังงานทางกล เมื่อนำมารวมกับกฎการอนุรักษ์พลังงานจึงสามารถสร้างเป็นสมการได้ กรณีวิธีที่สองเกิดจากการอินทิเกรตโมเมนต์เชิงเส้นไปบนเส้นทางการไหล ส่วนกรณีวิธีที่สาม ได้จากการลดรูปของสมการพลังงานตามกฎเทอร์โมไดนามิกส์ อย่างไรก็ตามการนำสมการเบอร์นูลลีไปใช้จะต้องทราบเงื่อนไขของข้อกำหนดเกี่ยวกับของไหลดังนี้

- ก. การไหลเป็นแบบสภาวะคงตัว(Steady flow)
- ข. เป็นการไหลที่ไม่คิดค่าความหนืด(Frictionless flow or viscosity flow)
- ค. เป็นการไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้(Incompressible flow)
- ง. ไม่มีงานเข้าและออกจากระบบ(No shaft work)
- จ. ไม่มีความร้อนเข้าและออกจากระบบ(No heat transfer)
- ฉ. เป็นการไหลที่เส้นสายธารการไหลเชื่อมต่อกัน(Flow along streamline)

2.5 การสูญเสียสำหรับการไหลภายในท่อที่มีความเสียดทาน (Loss in friction pipe)

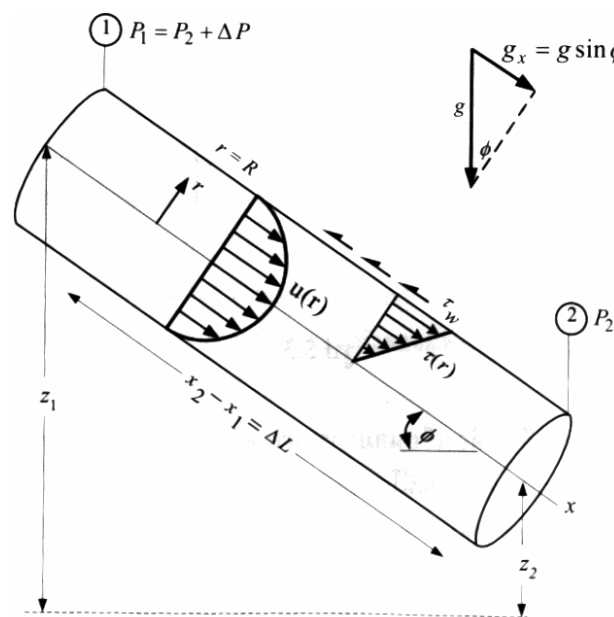
การไหลในท่อเป็นการไหลที่มีการใช้มากในงานวิศวกรรม เช่นการไหลของน้ำในระบบประปา การไหลของไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม การไหลของน้ำมันดิบจากแหล่งเจาะไปยังโรงกลั่น เป็นต้น สำหรับการไหลภายในท่อนี้โดยทั่วไปเป็นการขนส่งของไหลที่อยู่ภายในท่อ แต่บางครั้งก็มีการคำนึงถึงงานที่ทำให้เกิดการไหลหรืองานที่ได้รับเนื่องจากการไหลด้วย เช่นงานของเครื่องสูบน้ำและกังหันเทอร์ไบน์ที่อยู่ในระบบ การสูญเสียศักยภาพในการไหลเป็นผลเนื่องจากความเสียดทานภายในท่อ ซึ่งสามารถแบ่งการพิจารณาได้เป็นการสูญเสียหลักและการสูญเสียรอง

2.5.1 การสูญเสียหลัก (Major loss)

เมื่อของไหลไหลในท่อจะเกิดความต้านทานการไหลเกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นจึงเกิดการสูญเสียพลังงานของของไหลขึ้น การสูญเสียหลักที่เกิดขึ้นภายในท่อนั้นเนื่องจากความหนืดของของไหลและความเสียดทานระหว่างของไหลกับผนังท่อ โดยทั่วไปค่าการสูญเสียหลักจะเกิดเนื่องจากระบบท่อ มีความยาวมากๆ หากระบบท่อมีความยาวน้อยค่าการสูญเสียรองอาจจะมากกว่าการสูญเสียหลักได้

พิจารณาของไหลในท่อซึ่งอยู่ในท่อที่ไหลด้วยความเร็ว V ท่อมีพื้นที่หน้าตัด A ถ้าให้หน้าตัด 1 และหน้าตัด 2 ซึ่งอยู่ห่างกัน ΔL และที่หน้าตัด 1 มีความดันเป็น P_1 ส่วนที่หน้าตัด 2 มีความดันเป็น P_2 สามารถเขียนสมการอนุรักษ์พลังงานที่มีค่าการสูญเสีย (h_L) สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_L \quad (2.27)$$



ภาพประกอบ 8 องค์ประกอบการไหลในท่อที่มีความเสียดทาน

จากกฎการอนุรักษ์ของมวลที่ของไหลประเภทเดียวกันจะได้ $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ เมื่อพิจารณาที่หน้าตัดการไหลจะได้ $A_1 = A_2 = A$ ดังนั้น $V_1 = V_2 = V$ ดังนั้นการสูญเสียเฮดหรือการสูญเสียพลังงานของของไหล (h_L) มีค่าเท่ากับ

$$h_L = \frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} \quad (2.28)$$

สมการ (2.28) เป็นสมการการสูญเสียเฮดในระบบ พบว่าข้อมูลที่ต้องการทราบคือค่าความต่างความสูง และความดันแตกต่างระหว่างตำแหน่งทั้งสอง ค่าทั้งสองสามารถหาได้จากการทดลองซึ่งต้องทำเป็นกรณีต่างๆ หลายกรณีจึงไม่สะดวกในการหาค่าการสูญเสียหลักด้วยวิธีนี้ ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีการใหม่ในการหาค่าการสูญเสีย โดยพิจารณาจากสมการการอนุรักษ์ของโมเมนตัมดังนั้นจะได้สมการใหม่ในรูป

$$m(V_2 - V_1) = P_1 A_1 - P_2 A_2 - \tau_w A_w + \rho g V_{CV} \sin \phi \quad (2.29)$$

เนื่องจากเป็นการไหลในท่อกลมด้วยความเร็วคงที่ จะได้

$$0 = (P_1 - P_2)A - \tau_w A_w + \rho g V_{CV} \sin \phi$$

ให้ $\Delta P = P_1 - P_2$

จะได้

$$0 = \Delta P \cdot A - \tau_w A_w + \rho g V_{CV} \sin \phi$$

ให้ $L \sin \phi = \Delta Z$ และหารตลอดด้วย $A \rho g$ จะได้

$$\Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho g} = \frac{4 \tau_w}{\rho g} \frac{L}{D} \quad (2.30)$$

พจน์ทางซ้ายของสมการเป็นผลรวมของเฮดความดันและความสูง จากนั้นนำค่า ΔP ที่ได้จากสมการ (2.30) แทนลงในสมการ (2.28) แล้วจะเขียนสมการให้อยู่ในรูปการสูญเสียได้เป็น

$$h_L = \frac{4 \tau_w}{\rho g} \frac{L}{D} \quad (2.31)$$

จากสมการดังกล่าวจะเห็นว่าไม่มีตัวไม่ทราบค่าอยู่เพียงตัวเดียวคือ τ_w หากเป็นการไหลแบบราบเรียบค่า τ_w สามารถหาได้จากสมการควบคุมการไหล แต่ถ้าการไหลในท่อเป็นแบบปั่นป่วนค่า τ_w จะหาได้จากการทดลอง เนื่องจากค่า τ_w ไม่สะดวกในการคำนวณหาค่าเฮดการสูญเสีย ดังนั้นจึงได้หาแนวทางใหม่ในการวิเคราะห์ โดยอาศัยความสัมพันธ์พื้นฐานของค่า τ_w ซึ่งจะได้ว่า

$$\tau_w = f^n(\rho, D, V, \mu, \varepsilon) \quad (2.32)$$

เมื่อค่า ε เป็นค่าความขรุขระของผิวท่อโดยเฉลี่ย และกำหนดให้ ρ, V และ D เป็นตัวแปรซ้ำจากการวิเคราะห์มิติจะได้ว่า

$$\frac{8\tau_w}{\rho V^2} = f = f^n \left(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{D} \right) \quad (2.33)$$

เมื่อ f คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และเมื่อแทนค่า τ_w จากสมการ (2.33) ลงในสมการ (2.31) และให้ $h_L = h_f$ จะได้ว่า

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.34)$$

สมการที่ (2.34) นี้เรียกว่าสมการความสัมพันธ์ของ Darcy-Weisbach เป็นที่นิยมและมีการนำไปใช้สำหรับคำนวณหาการสูญเสียเฮดอันเกิดจากความเสียดทานภายในท่อและสังเกตได้ว่า การสูญเสียเฮดอันเกิดจากความเสียดทานนี้ สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของเฮดความเร็ว $\left(\frac{V^2}{2g} \right)$ ได้โดยค่าความเร็วที่ใช้เป็นความเร็วเฉลี่ย แต่ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานเป็นค่าไม่คงที่ และจะขึ้นอยู่กับความขรุขระสัมพัทธ์ของผิวท่อและค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหล ในกรณีที่มีการไหลเป็นแบบราบเรียบที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าน้อยกว่า 3,000 ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานดังกล่าวอาจหาได้จากสมการ

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (2.35)$$

จากสมการที่ (2.35) จะสังเกตได้ว่าในกรณีที่การไหลเป็นแบบราบเรียบ การสูญเสียจะขึ้นอยู่กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์เพียงอย่างเดียว ไม่ขึ้นอยู่กับความขรุขระของผนังท่อ เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่ามากกว่าประมาณ 10,000 การไหลจะถือว่าเป็นการไหลแบบปั่นป่วนเสมอ ไม่ว่าผนังท่อจะเรียบสม่ำเสมอเท่าใดก็ตาม ในกรณีนี้สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานจะขึ้นอยู่กับทั้ง ค่าตัวเลขเรย์โนลด์และความขรุขระสัมพัทธ์ $\left(\frac{\varepsilon}{D} \right)$ จากการทดลองโดยให้น้ำไหลผ่านท่อพบว่า ถึงแม้การไหลจะเป็นแบบปั่นป่วนก็ตาม แต่ก็จะมีชั้นบางๆ ติดกับผนังท่อที่การไหลเป็นแบบราบเรียบ ความหนาของชั้นนี้จะลดลงเมื่อ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ถ้าหากว่าความสูงของความขรุขระที่ยื่นออกมาจากผนังท่อน้อยกว่าชั้นความหนา ค่าความขรุขระสัมพัทธ์ก็จะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และถือว่าการไหลนั้นเป็นท่อเรียบทางชลศาสตร์ (Hydraulically smooth pipe)

ในทางตรงกันข้ามถ้าความสูงของความขรุขระที่ผนังท่อสูงกว่าชั้นที่การไหลเป็นแบบราบเรียบ ส่วนที่สูงกว่าก็จะก่อให้เกิดความปั่นป่วนในการไหลมากขึ้น และจะมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้นโดยตรง และถ้าผนังท่อขรุขระมากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ก็จะขึ้นอยู่กับค่าความขรุขระสัมพัทธ์เพียงอย่างเดียว ไม่ขึ้นกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของทั้งสองกรณีนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ

2.5.1.1 เมื่อผนังท่อเรียบ (Hydraulically smooth)⁽⁴⁾

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log \frac{\text{Re} \sqrt{f}}{2.51} \quad (2.36)$$

2.5.1.2 เมื่อผนังท่อขรุขระมากจนทำให้การไหลเป็นแบบปั่นป่วนอย่างแท้จริง⁽⁴⁾

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log 3.71 \frac{D}{\varepsilon} \quad (2.37)$$

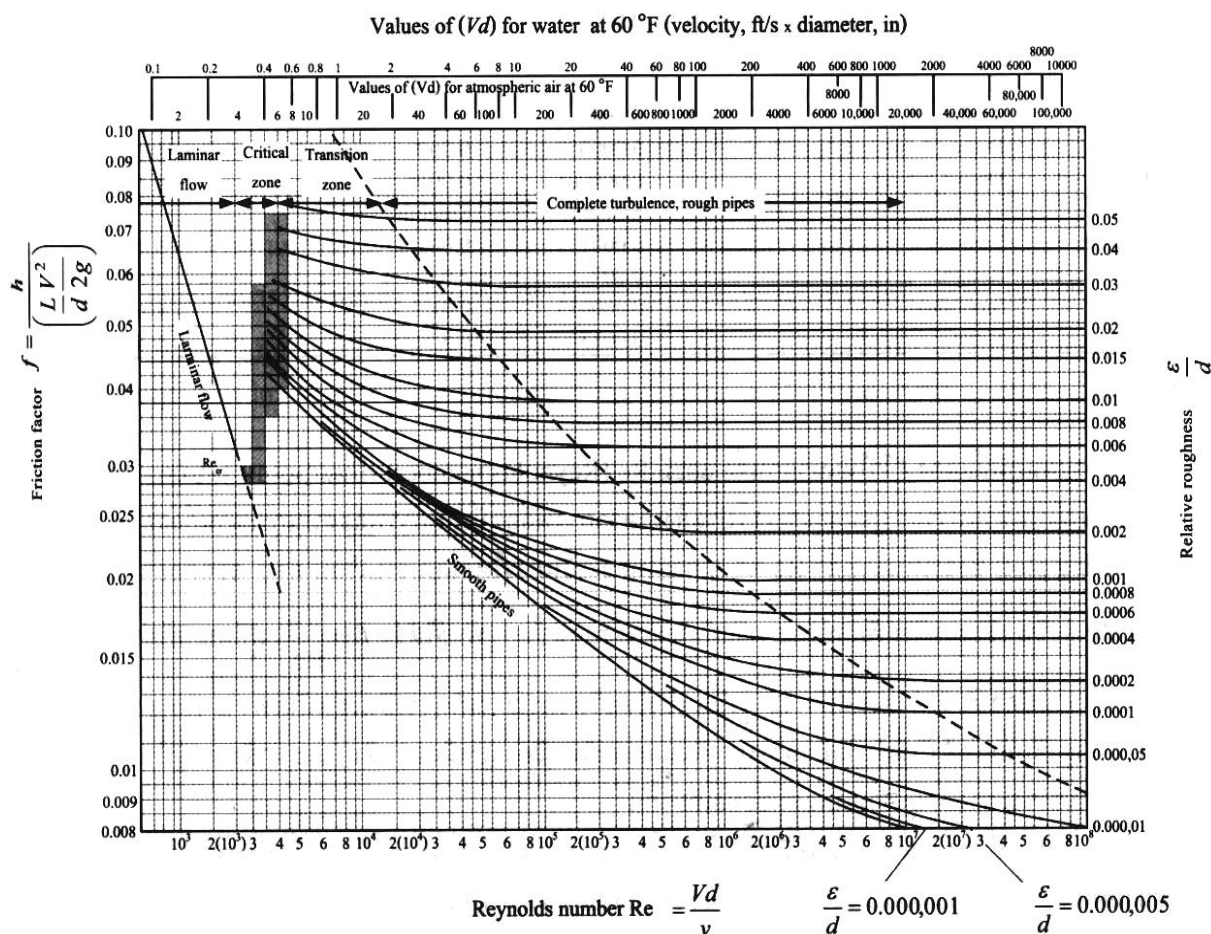
2.5.1.3 ในกรณีที่การไหลเป็นแบบปั่นป่วนแต่ความขรุขระของผนังท่ออยู่ระหว่างสองกรณีที่กล่าวข้างต้นค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน จะขึ้นอยู่กับทั้งค่าตัวเลขเรย์โนลด์และความขรุขระสัมพัทธ์⁽⁴⁾

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log \frac{\varepsilon}{3.1D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \quad (2.38)$$

จะเห็นได้ว่าในกรณีที่การไหลเป็นแบบปั่นป่วนจะต้องมีสมการสำหรับคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ ความเสียดทานถึงสามสมการ คือ ในกรณีที่ผนังท่อเรียบ ผนังท่อขรุขระมาก และผนังท่ออยู่ระหว่างสองกรณีข้างต้น นอกจากนั้นสมการที่ใช้คำนวณก็ค่อนข้างยุ่งยาก ในทางปฏิบัตินิยมอ่านค่าจากแผนภาพมูดี้ (Moody diagram) ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสำหรับการไหลทุกประเภทและทุกค่าความขรุขระสัมพัทธ์

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานนั้น ตามปกติจะกำหนดขึ้นมาก่อน แต่ในทางปฏิบัติ เราไม่สามารถทราบได้ล่วงหน้า อีกประการหนึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ก็จะไม่คงที่ด้วย เนื่องจากจะแปรผันกับความเร็วในการไหล การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน จากสมการต่างๆ ที่กล่าวมานั้นอาจจะไม่สะดวกมากนัก ดังนั้นจึงมักจะหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากแผนภาพ โดยได้มีผู้เขียนเป็นแผนภาพแสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ไว้หลายราย แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ แผนภาพของมูดี ซึ่งเขียนขึ้นโดย Lewis F. Moody⁽⁷⁾

แผนภาพมูดีเป็นแผนภาพที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เขียนขึ้นโดยใช้ค่าจากสมการต่างๆ ข้อมูลที่รวบรวมที่มีอยู่ และเป็นจริงที่สุดเท่าที่จะหาได้ แสดงความสัมพันธ์มาเป็นตัวเลขและเส้นกราฟ โดยแกนตั้งด้านซ้ายมือจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และแกนบนแสดงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งเขียนขึ้นโดยวิธีลงในสเกลล็อก ส่วนแกนตั้งทางด้านขวามือจะเป็นค่า ความขรุขระสัมพัทธ์ของท่อ



ภาพประกอบ 9 แผนภาพมูดีที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการไหลในท่อ

ความขรุขระสัมบูรณ์ (ε) คือค่าความสูงเฉลี่ยของความขรุขระที่ผิวภายในของท่อ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำท่อและกรรมวิธีการผลิต ค่าทั่วไปของความขรุขระดูได้จากตาราง 1 สำหรับท่อที่ผลิตโดยวิธีการดัดขึ้นรูป (Extruded) ของโลหะที่ไม่ใช่เหล็กและท่อที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกนั้นจะมีผิวเรียบมาก และให้ถือว่าเป็นท่อผิวเรียบ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจะมีค่าน้อยมาก ในแผนภาพของมูดีได้เขียนกำกับไว้ว่าท่อผิวเรียบ (Smooth pipes) ส่วนรายละเอียดเกี่ยวกับการไหลของของไหลที่แสดงไว้ในแผนภาพมูดี ดังแสดงในภาพประกอบ 2.9 จะแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วงคือ

ก) ช่วงที่การไหลเป็นแบบราบเรียบ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ จะน้อยกว่า 3,000 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจะไม่ขึ้นกับความหยาบหรือความขรุขระของผิวท่อ แต่จะขึ้นกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์เพียงอย่างเดียว ซึ่งแสดงโดยเส้นตรงด้านซ้ายของแผนภาพ

ข) ช่วงที่การไหลเป็นแบบวิกฤต ในช่วงนี้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ จะอยู่ระหว่าง 3,000 ถึง 10,000 จึงไม่สามารถกำหนดลักษณะการไหลที่แน่นอนได้ ทำให้ค่าต่างๆ ไม่แน่นอน เพราะการไหลอาจเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนก็ได้ จึงใช้แผนภาพนี้ไม่ได้

ค) ช่วงการไหลเปลี่ยนแปลง ในช่วงนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย จะเป็นฟังก์ชันของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และค่าความขรุขระสัมพัทธ์ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่าลดลง เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้น

ง) ช่วงที่การไหลเป็นแบบปั่นป่วนโดยสมบูรณ์ ช่วงดังกล่าวจะอยู่ทางด้านขวามือของเส้นประของแผนภาพและเป็นเส้นตรงในแนวนอน ซึ่งแสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจะไม่ขึ้นกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ แต่จะขึ้นกับค่าความขรุขระสัมพัทธ์

ตาราง 1 ค่าความขรุขระสัมบูรณ์ (ε) สำหรับท่อใหม่

ประเภทของท่อ	ค่าความขรุขระสัมบูรณ์	
	ฟุต	มิลลิเมตร
ท่อที่ได้จากการรีด ท่อทองแดง,ท่อทองเหลือง ท่อดีบุก		
หลอดแก้ว,	0.000005	0.0015
ท่อที่เคลือบหรือฉาบด้วยปิทมินัส	0.00015	0.046
ท่อเหล็กกล้าหรือท่อเหล็กเหนียวที่ขายในท้องตลาด	0.00015	0.046
ท่อเหล็กกล้าที่ขึ้นรูปโดยการเชื่อม	0.0004	0.12
ท่อเหล็กหล่อที่เคลือบหรือฉาบด้วยยางมะตอย	0.0005	0.15
ท่อเหล็กอาบสังกะสี	0.00085	0.25
ท่อเหล็กหล่อโดยเฉลี่ย	0.0006-0.003	0.18-0.9
ท่อไม้	0.0006-.0.003	0.18-0.9
ท่อคอนกรีต	0.001-0.01	0.3-3
ท่อเหล็กกล้าที่ย้ำด้วยหมุด	0.003-0.03	0.9-9

จากตาราง 1 แสดงค่าความขรุขระสัมบูรณ์ของท่อที่ใหม่และสะอาด ดังนั้นถ้าใช้ท่อที่มีสภาพต่างไปจากนี้ เช่น สกปรก เป็นสนิม ค่าความขรุขระสัมบูรณ์ ก็จะต้องใช้ต่างไปจากนี้ โดยทั่วไป ถ้าคิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนในทางปฏิบัติแล้ว สำหรับท่อที่ผิวภายในเรียบจะมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ ± 5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนท่อที่ผิวภายในขรุขระก็จะเกิดความคลาดเคลื่อนประมาณ ± 10 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าเป็นท่อเก่า ค่าความขรุขระสัมบูรณ์จะมีค่าความคลาดเคลื่อนจากท่อใหม่สูงกว่าที่ประมาณไว้ให้ การตัดสินใจเกี่ยวกับการประเมินค่าความขรุขระสัมบูรณ์ ที่ดีจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นด้วย และจะมีผลอย่างมากถ้าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานขึ้นอยู่กับค่าความขรุขระสัมพัทธ์ เพียงอย่างเดียว เช่น ในกรณีที่มีการไหลอยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน โดยสมมติเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของความเร็ว

2.5.2. การสูญเสียรอง (Minor loss)

การสูญเสียรอง คือการสูญเสียอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหล ไม่ว่าจะเป็นขนาดหรือทิศทางของความเร็ว หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการสูญเสียพลังงานหรือการสูญเสียเฮดที่มีผลมาจากพลังงานจลน์หรือเฮดความเร็วเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในการไหลของของไหลในท่อ ในกรณีที่ท่อยาวมาก การสูญเสียรองนี้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียอันเกิดจากความเสียดทาน ซึ่งอาจจะไม่ต้องนำมาคิดค่าการสูญเสียก็ได้ แต่ถ้าท่อนั้นๆ มีขนาดสั้น การสูญเสียรองจะมีค่ามากกว่าการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานหรือการสูญเสียหลักมาก เช่น การสูญเสียเฮดที่ท่อคดของปั๊มน้ำ เพราะมีปลายท่อคดจะมีชุดตะแกรงกรองสิ่งสกปรกและมีวาล์วกันกลับประกอบอยู่ การต่อท่อคดจะต้องมีข้อต่อและข้องออีกด้วย จึงจะทำให้การสูญเสียพลังงานจากกรณีการสูญเสียรองมีค่ามากกว่าพลังงานที่สูญเสียไปกับความเสียดทานที่ผนังของท่อคด

การหาค่าการสูญเสียรองซึ่งเป็นการสูญเสียอันเนื่องจากพลังงานจลน์มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นสมการที่ใช้หาค่าการสูญเสียรอง (h_m) จึงอยู่ในรูปของเฮดความเร็ว $\left(\frac{V^2}{2g}\right)$ คูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสีย (k) เขียนเป็นสมการได้คือ

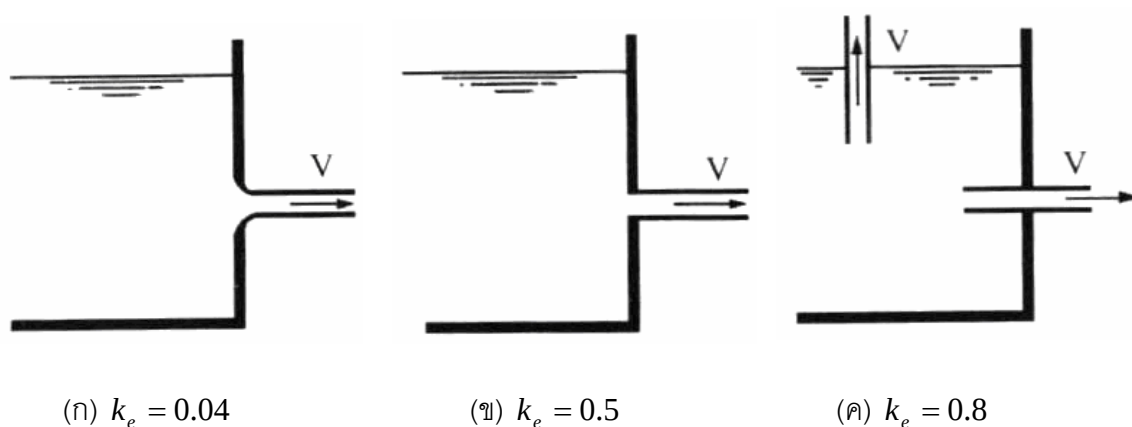
$$h_m = \left(\sum_{i=1}^n k_i\right) \times \left(\frac{V^2}{2g}\right) \quad (2.39)$$

นอกจากการหาค่าการสูญเสียรองจากสมการ (2.39) แล้วยังมีวิธีหาค่าการสูญเสียรองโดยการบอกค่าในเทอมของความยาวสมมูลของท่อตรง ซึ่งปกติแล้วจะบอกเป็นจำนวนเท่าของขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางของท่อ ส่วนการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียซึ่งขึ้นอยู่กับบริเวณที่ทำให้ความเร็วของของไหลมีการเปลี่ยนแปลงนั้นสามารถหาได้โดยแบ่งตามลักษณะบริเวณดังนี้

2.5.2.1 การสูญเสียที่ปากทางเข้าของท่อ (Loss of head at entrance)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียสำหรับปากทางเข้าของท่อ (k_e) สามารถหาได้จากลักษณะของปากทางเข้าของท่อดังแสดงในภาพประกอบ 11 ถ้าปากทางเข้าของท่อได้รับการลบบุมให้เป็นส่วนโค้งของวงกลมหรือเป็นเหลี่ยมเรียกว่าทางเข้าปากแตร (Bell-mouthed) ดังแสดงในภาพประกอบ 10(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียมีค่าเท่ากับ 0.04



ภาพประกอบ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานที่ปากทางเข้าของท่อ

สำหรับปากทางเข้าแบบที่ไม่ได้ลบบุมและมีปลายเสมอกับผิวด้านในของถังเก็บน้ำหรือที่เรียกว่า Flush entrance ดังแสดงในภาพประกอบ 10(ข) นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเท่ากับ 0.5 ส่วนปากทางเข้าแบบที่ปลายยื่นเข้าไปในถังเก็บน้ำหรือที่เรียกว่า Reentrance tube ดังแสดงในภาพประกอบ 10 (ค) สัมประสิทธิ์การสูญเสียการสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.8 จะเห็นได้ว่าที่ทางเข้าของของไหลที่ต่างกันให้ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ต่างกัน ทางเข้าแบบลบบุมเหลี่ยมให้ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียน้อยที่สุดเพียง 0.04 เท่านั้นเอง

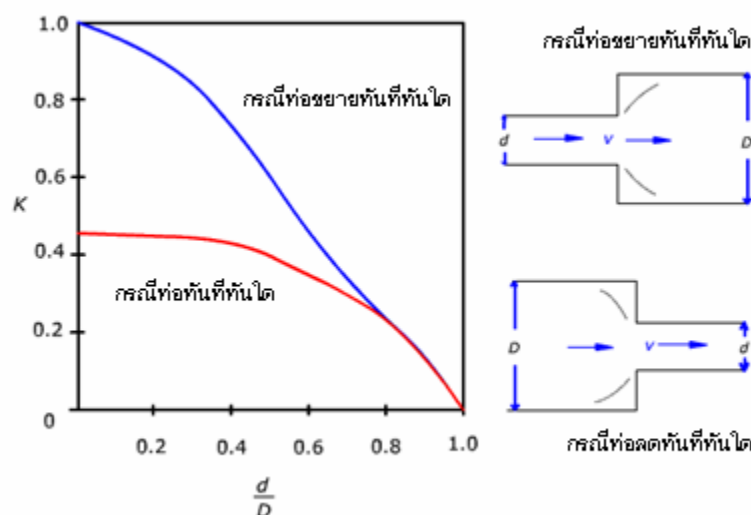
2.5.2.2 การสูญเสียที่ปลายทางออกของท่อ (Loss of head at discharge)

เมื่อของไหล ไหลจากปลายท่อเข้าสู่ถังเก็บขนาดใหญ่มากทำให้พลังงานจลน์ทั้งหมดของลำน้ำนั้นกระจายหายไป ดังนั้นก็จะมี การสูญเสียไปกับการส่งน้ำออกจากปลายท่อ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ทางออกทุกกรณีจึงมีค่าเท่ากับ 1.0

2.5.2.3. การสูญเสียเนื่องจากการลดหรือเพิ่มขนาดพื้นที่หน้าตัดโดยทันทีทันใด

(Loss due to contraction sudden contraction or sudden expansion)

การสูญเสียในลักษณะนี้เกิดจากการที่ของไหล ไหลผ่านบริเวณที่มีพื้นที่หน้าตัดต่างกันอย่างมาก หากให้ D เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อใหญ่ และ d เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเล็ก ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียในกรณีนี้สามารถหาได้จากภาพประกอบ 11

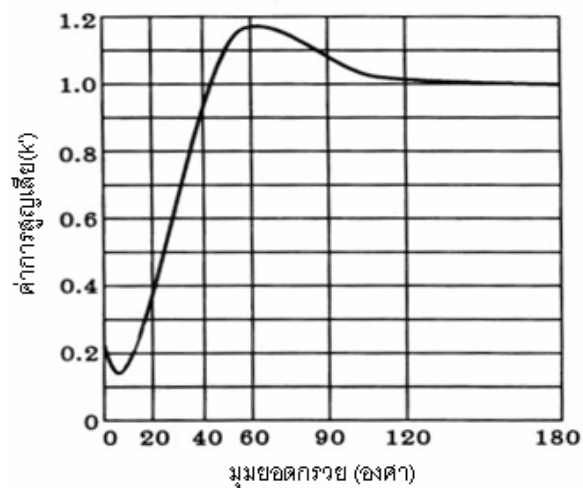


ภาพประกอบ 11 การสูญเสียจากการที่ลดขนาดโดยทันทีทันใด

2.5.2.4 การสูญเสียเนื่องจากการขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดแบบค่อยๆ ขยายโตขึ้นหรือ

การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดแบบค่อยๆ ลด (Loss due to gradual expansion or gradual contraction)

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากการขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดแบบค่อยๆ ขยายโตขึ้นหรือการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดแบบค่อยๆ ลด เมื่อรู้ค่ามุมเอียงของกรวยยอดตัดจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียได้จากภาพประกอบ 12



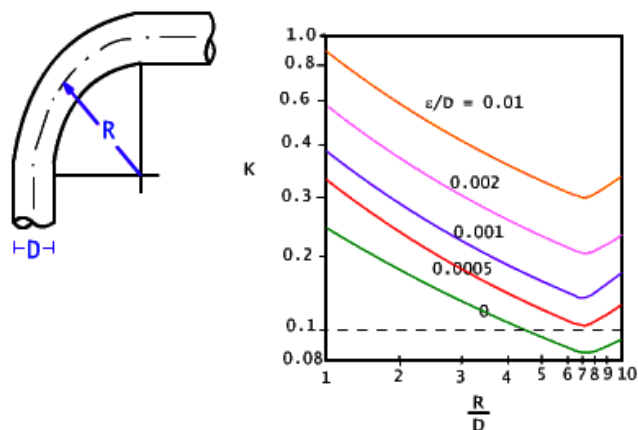
ภาพประกอบ 12 การสูญเสียเนื่องจากการขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดแบบค่อยๆ ขยายโตขึ้น หรือการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดแบบค่อยๆ ลด

2.5.2.5 การสูญเสียในข้อต่อ (Loss in fitting)

ในการประกอบท่อเข้าด้วยกันเป็นระบบท่อต้องใช้ข้อต่อ ข้องอ และอุปกรณ์ต่อเชื่อมอื่นๆ อีกหลายชนิดของไหลที่เคลื่อนที่ไปมีการสูญเสียที่จุดเชื่อมต่องดกล่าว การหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่อุปกรณ์ต่อเชื่อมสามารถหาได้จากตาราง 2

ตาราง 2 ตัวประกอบสำหรับหาค่าการสูญเสียพลังงานในข้อต่อ

อุปกรณ์ต่อเชื่อมประเภทต่างๆ	k_f	L/D
Globe Valve เปิดเต็มที่	10	350
Angle Valve เปิดเต็มที่	5	175
ข้องอโค้งกลับวงเลี้ยวแคบ (Close Return Bend)	2.2	75
ข้อต่อรูปตัว T (T, Through Side Outlet)	1.8	67
ข้องอ 90 องศา รัศมีสั้น (Short-radius Elbow)	0.9	32
ข้องอ 90 องศา รัศมีปานกลาง (Medium-radius Elbow)	0.75	27
ข้องอ 90 องศา รัศมียาว (Long-radius Elbow)	0.60	20
ข้องอ 45 องศา (45° Elbow)	0.42	15
Gate Valve เปิดเต็มที่	0.19	7



ภาพประกอบ 13 การหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียในท่อโค้งและข้ออ

2.5.2.6 การสูญเสียในท่อโค้งและข้ออ (Loss in bend and elbow)

การสูญเสียในท่อโค้งและข้ออ เนื่องจากมีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ดังนั้นเมื่อมีของไหลไหลผ่านท่อโค้งหรือข้ออ ก็จะทำให้ความดันทางด้านโค้งนอกเพิ่มมากขึ้น และทำให้ความดันทางด้านโค้งในลดน้อยลง กำหนดให้ R เป็นรัศมีโค้งของท่อและ d เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียสามารถหาได้จากภาพประกอบ 13

ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการสูญเสียสำหรับการไหลภายในท่อที่มีความหนืด (Loss in Viscous flow in duct) เกิดจากการสูญเสียหลักซึ่งเป็นผลเนื่องจากการที่ของไหลมีความหนืดและมีความเสียดทานเกิดขึ้นจากการไหล ซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วในการไหล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความขรุขระสมบูรณ์ของท่อ และเป็นผลโดยตรงกับความยาวของท่อในระบบ กับการสูญเสียรอง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการอุปกรณ์ที่ทำการติดตั้งในระบบ ดังนั้น การสูญเสียรวมของระบบ (h_{Total}) สามารถหาได้จากการบวกกันของการสูญเสียหลัก (h_f) กับผลรวมของการสูญเสียรอง (h_m) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

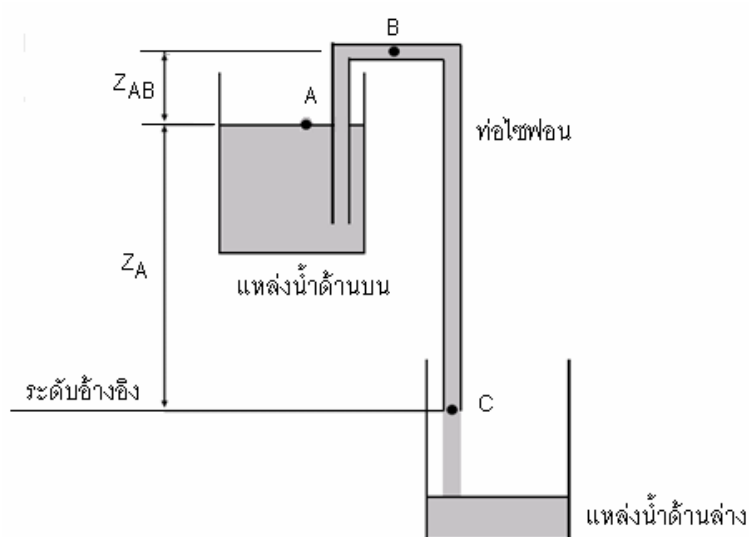
$$h_{Total} = h_f + h_m \quad (2.40)$$

$$h_{Total} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} + \left(\sum_{i=1}^n k_i \right) \times \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (2.41)$$

2.6 หลักการทำงานของไซฟอน (Siphon system)

ไซฟอนหรือกาลักน้ำ (Siphon หรือ Syphon) คือ อุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นท่อยาวต่อเนื่อง และยอมให้น้ำไหลผ่านจากแหล่งน้ำด้านบนไปสู่ด้านที่ต่ำกว่าเนื่องจากพลังงานศักย์ที่แตกต่างกันโดย ขณะที่ไซฟอนทำงานจะไม่ใช้ปั๊มน้ำช่วย มีประวัติการใช้ไซฟอน ครั้งแรกในการรบเพื่อทำลายศัตรูของกรีก สมัยโบราณแห่งราชอาณาจักรบาเซนไทน์ ในรูปแบบของอาวุธโดยการใช้ไซฟอนลำเลียงน้ำมันเพื่อส่งเข้าทำลายเรือข้าศึก ซึ่งสมัยก่อนมีความสับสนระหว่างปั๊มและไซฟอน

ไซฟอนมีหลักการทำงานดังนี้ ขณะที่ปลายท่อด้านหนึ่งของไซฟอนจมอยู่กับแหล่งน้ำที่เปิดสู่บรรยากาศและมีระดับสูงกว่าอีกด้านหนึ่งที่อาจมีปลายเปิดสู่บรรยากาศหรืออยู่ใต้แหล่งน้ำก็ได้ ขณะที่ระบบไซฟอนกำลังทำงาน พิจารณาน้ำที่ตำแหน่ง B ดังภาพประกอบ 14 ซึ่งอยู่ด้านบนสุดของไซฟอน จะพบว่ามีความดันมีทิศลงด้วยแรงดึงดูดของโลกกระทำต่ออนุภาคของน้ำทั้งสองด้าน ขณะที่แหล่งน้ำด้านบนนั้นมีแรงดันบรรยากาศส่งต่อมายังของเหลวในท่อ เพื่อรักษาสมดุลแต่ก็ยังน้อยกว่าแรงดันบรรยากาศที่ต่อมายังของเหลวในท่อด้านแหล่งน้ำที่ต่ำกว่า ทำให้เกิดสุญญากาศที่ด้านบนของไซฟอน ดึงน้ำไหลขึ้นมา จากแหล่งน้ำด้านบนให้ไหลลงสู่แหล่งน้ำด้านล่าง ความดันเหนือแหล่งน้ำด้านบนลดลงเมื่อเทียบกับด้านล่าง แต่ระบบไซฟอนจะทำงานไปเรื่อยๆ จนกระทั่งความดันที่ตำแหน่ง A ไม่มากพอที่จะสามารถส่งน้ำขึ้นมาจุดสูงสุดของไซฟอนได้ ไซฟอนก็จะหยุดทำงาน ความสามารถในการสร้างแรงดูดของไซฟอนขึ้นอยู่กับความต่างระดับของแหล่งน้ำ ความดันบรรยากาศ ความหนาแน่นของน้ำ และความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในท่อ สำหรับที่ความดันบรรยากาศไซฟอนสามารถสร้างแรงดูดน้ำจากแหล่งน้ำด้านบน สูงสุดคือ 10 เมตรส่วนปรอทได้สูงสุด 76 เซนติเมตร⁽¹⁰⁾



ภาพประกอบ 14 ส่วนประกอบของระบบไซฟอน

จากภาพประกอบ 14 ขณะที่ระบบไฮดรอนกำลังทำงานและสมมุติว่าระบบไม่มีการสูญเสียพลังงานสามารถเขียนสมการเบอร์นูลลี ระหว่างตำแหน่ง A และ C โดยไม่พิจารณาความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานได้ดังนี้

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_A = \frac{P_C}{\gamma} + \frac{V_C^2}{2g} + Z_C \quad (2.42)$$

ที่ตำแหน่ง A และ C ค่าความดันเป็นความดันบรรยากาศดังนั้น $P_A = P_C$ และที่ระดับอ้างอิงค่าความเร็วที่ตำแหน่ง A เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นค่า $V_A \approx 0$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{V_A^2}{2g} = 0$$

กำหนดให้ระดับความสูงที่ตำแหน่ง C เป็นระดับอ้างอิง จากนั้นแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในสมการ (2.42) จะได้

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_A = \frac{P_C}{\gamma} + \frac{V_C^2}{2g} + Z_C \quad (2.43)$$

จะได้

$$0 + 0 + Z_A = 0 + \frac{V_C^2}{2g} + 0$$

$$V_C^2 = 2gZ_A \quad (2.44)$$

$$V_C = \sqrt{2gZ_A} \quad (2.45)$$

จากสมการ (2.45) จะเห็นว่าเมื่อค่า g เป็นค่าคงที่แล้ว V_C จะขึ้นกับความสูง Z ดังนั้นหากระบบไฮดรอนมีความสูงของท่อไฮดรอนจากระดับอ้างอิงมากจะทำให้ความเร็วที่ได้ที่ปลายทางออกของท่อไฮดรอนมากขึ้นด้วยความสูง Z นี้ ถือเป็นเขตความสูงของระบบไฮดรอนด้วย หากพิจารณาสมการเบอร์นูลลีที่ตำแหน่ง A กับ B จะได้

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_A = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + Z_B \quad (2.46)$$

ที่ระดับอ้างอิงค่าความเร็วที่ตำแหน่ง A เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นค่า $V_A \approx 0$ แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการ (2.46) จะได้

$$\frac{P_A}{\gamma} + 0 + Z_A = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + Z_B \quad (2.47)$$

$$P_B = P_A - \gamma Z_B + \gamma Z_A - \gamma \frac{V_B^2}{2g} \quad (2.48)$$

$$P_B = P_A - \gamma(Z_B - Z_A) - \gamma \frac{V_B^2}{2g} \quad (2.49)$$

เมื่อ P_A เป็นค่าความดันบรรยากาศ (P_{atm}) และ $(Z_B - Z_A) = Z_{AB}$ ดังนั้นสมการ (2.49) จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$P_B = P_{atm} - \gamma(Z_{AB}) - \gamma \frac{V_B^2}{2g} \quad (2.50)$$

จากสมการ (2.50) จะเห็นว่าค่าถ้าความหนาแน่นของน้ำคงที่ ค่าความดันที่ตำแหน่ง B มีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศเกิดเป็นความดูด (Suction) ซึ่งปริมาณความดันจะต่ำกว่าความดันบรรยากาศเท่าใดขึ้นอยู่กับระยะจากตำแหน่ง A ถึงตำแหน่ง B และค่าความเร็วของการไหลที่ตำแหน่ง B จากสมการอนุรักษ์มวลถ้าในไฮฟอนไหลเต็มท่อความเร็วที่ตำแหน่ง B จะมีค่าเท่ากับความเร็วที่ตำแหน่ง C และจากสมการ (2.45) จะเห็นว่าความเร็วของการไหลที่ตำแหน่ง C ก็ขึ้นกับความสูงของตำแหน่ง A ด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความดันที่ตำแหน่ง B มีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศและขึ้นอยู่กับเฮดความสูงของระบบ

บทที่ 3

การออกแบบและวิธีดำเนินการ

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมชุดทดสอบ การออกแบบและวิธีดำเนินการทดสอบเกี่ยวกับไซฟอนเพื่อนำพลังงานจากแหล่งน้ำที่อยู่ในระดับที่สูงกว่ามาใช้ประโยชน์ โดยมีรายละเอียดต่างๆ ซึ่งได้แบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้

หัวข้อ 3.1 ข้อมูลของการออกแบบ

หัวข้อ 3.2 อุปกรณ์การทดสอบของระบบไซฟอน

หัวข้อ 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ระบบไซฟอน

หัวข้อ 3.4 กรณีของการทดสอบ

3.1 ข้อมูลของการออกแบบ

เพื่อให้การทำการทดสอบนี้มีขอบเขตที่ชัดเจนและการทำงานบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ จึงได้กำหนดข้อมูลพื้นฐานและข้อกำหนดต่างๆ ดังมีข้อมูลการออกแบบดังนี้

3.1.1 เป็นการทดสอบที่ทำกับชุดทดสอบที่ได้ออกแบบไว้

3.1.2 ใช้น้ำร้อนเป็นหลักเป็นโครงสร้างเพื่อรับน้ำหนักน้ำที่บรรจุอยู่ในถัง

3.1.3. น้ำที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำประปาทั่วไป โดยใช้น้ำหมุนเวียนมาเข้าสู่ระบบไม่มีการใช้น้ำเพิ่มเติมจากภายนอก ทำให้ค่าความหนาแน่นของน้ำค่อนข้างคงที่

3.1.4 การทดลองนี้ต้องการควบคุมค่าเสดของไซฟอนให้คงที่ ที่ 3.78 เมตร ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ลูกกลอยและสวิตช์อัตโนมัติในการควบคุมเครื่องสูบน้ำ

3.1.5 การวัดอัตราการไหลของลมโดยใช้โรตاميเตอร์โดยมีการสอบเทียบกับอุปกรณ์วัดอัตราเร็วลมชนิดแผ่นออร์ฟิซและอุปกรณ์วัดอัตราเร็วของลมชนิดใบพัด

3.1.6 การวัดอัตราการไหลของน้ำใช้การตวงและจับเวลา

3.2 อุปกรณ์การทดสอบของระบบไซฟอน

อุปกรณ์ในระบบไซฟอนที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยอุปกรณ์ประกอบท่อซึ่งเกี่ยวเนื่องโดยตรงกับน้ำ อุปกรณ์เกี่ยวกับลม และชุดเครื่องมือวัด ซึ่งจะได้กล่าวถึงอุปกรณ์แต่ละรายการดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 ถังไซฟอนจ่ายน้ำขนาด 1000 ลิตร เป็นถังทำจากไฟเบอร์กลาสสีฟ้า มีน้ำหนักเบา สะดวกต่อการเคลื่อนย้ายและมีความแข็งแรงมาก มีลักษณะเป็นทรงกรวยยอดตัดดังแสดงในภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 ถังจ่ายน้ำที่ใช้ในการทดสอบ ขนาด 1000 ลิตร



ภาพประกอบ 16 ท่อไซฟอนพลาสติกขนาดต่างๆ

3.2.2 ท่อไซฟอนพลาสติกพร้อมอุปกรณ์เชื่อมต่อ ในการทดสอบใช้ท่อพลาสติก 4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่วัดได้มีค่าดังนี้ 22.10, 30.51, 38.10 และ 44.35 มิลลิเมตร ท่อไซฟอนพลาสติกจะประกอบให้มีลักษณะเป็นตัวเจ (J) คิวว่า ดังแสดงในภาพประกอบ 16 ส่วนการต่อท่อไซฟอนด้านบนด้วยข้อต่อสามทางเพื่อเชื่อมระบบไซฟอนไปยังเครื่องสูบน้ำ และใช้งานเมื่อเริ่มระบบเพื่อให้ไซฟอนเริ่มทำงานได้เอง

3.2.3 โครงสร้างรองรับถังไซฟอน เป็นนั่งร้านเหล็ก 3 ชั้นปูพื้นด้านบนด้วยไม้เนื้อแข็ง และเสริมความแข็งแรงด้วยเสาไม้เพื่อป้องกันอันตรายเนื่องจากชุดการทดสอบอยู่สูงและมีน้ำหนักมาก



ภาพประกอบ 17 ถังรับน้ำจากไซฟอนพร้อมอุปกรณ์

3.2.4 ถังรับน้ำจากไซฟอนพร้อมสเกลวัดอัตราการไหลของน้ำเป็นถังมาตรฐานสำหรับการทดสอบประกอบวิชากลศาสตร์ของไหลระดับอาชีวศึกษา แสดงรายละเอียดดังภาพประกอบ 17 ที่ถังรับน้ำดังกล่าวมีอุปกรณ์อื่น ๆ ติดตั้ง ประกอบด้วยสวิตช์ไฟฟ้าควบคุมการทำงานของเครื่องสูบน้ำทุกตัว สเกลอ่านระดับน้ำติดตั้งอยู่ด้านข้างของถัง เพื่อวัดอัตราการไหลของน้ำและมีเครื่องสูบน้ำชนิดจุ่มอยู่ในถัง เพื่อสูบน้ำขึ้นสู่ถังไซฟอนด้วย

3.2.5 สวิตช์น้ำสัมผัสไฟฟ้า 220 โวลต์ ชนิดปกติเปิด (Normal open) สวิตช์นี้บรรจุอยู่ในกล่องพลาสติกกันน้ำสีเทาและมีเชือกต่อจากสวิตช์ออกมา เพื่อต่อเข้ากับอุปกรณ์ลูกลอย ดังแสดงในภาพประกอบ 18

3.2.6 ลูกลอยพลาสติก ชนิดลูกลอยคู่ แสดงดังภาพประกอบ 18 โดยผูกเชือกเชื่อมระหว่างลูกลอยทั้งสองให้ติดกัน ซึ่งจะเป็นการชะลอการตัดต่อกระแสไฟฟ้า โดยควบคุมเครื่องสูบน้ำตัวที่จะเติมน้ำเข้ามาในถังให้เริ่มทำงาน และหยุดทำงานที่ระดับความต่างของน้ำในถังไม่เกิน 25.4 มิลลิเมตรหรือ 1 นิ้ว หากยังเพิ่มระยะห่างของลูกลอยทั้งสองจะทำให้ ระดับน้ำในถังมีความต่างมากยิ่งขึ้น



ภาพประกอบ 18 อุปกรณ์ลูกลอยพลาสติกและสวิตช์อัตโนมัติ

3.2.7 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตารีเมตรลมของ Dwyer รุ่น VFA-26-BV ผลิตโดยบริษัท Dwyer Instruments, Inc. จากสหรัฐอเมริกา ขอบเขตการวัดอัตราการไหล 0 ถึง 50 ลิตรต่อวินาที ที่สภาวะความดันเกจสูงสุดไม่เกิน 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิไม่เกิน 65 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพประกอบ 19 ในการทดสอบนี้เลือกใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลลมด้วยอุปกรณ์ชนิดโรตารีเมตรลมเนื่องจากการทดสอบเป็นการวัดอัตราการไหลภายในท่อที่มีขนาดเล็กและอุปกรณ์ชนิดนี้สามารถเชื่อมต่อเข้ากับท่อลมของระบบที่ทดสอบไซฟอนได้เป็นอย่างดี

3.2.8 ท่อส่งน้ำขึ้นถังไซฟอน เป็นท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำขึ้นสู่ถังไซฟอนไม่พอกับความต้องการ ดังนั้นในการทดลองจึงเพิ่มเครื่องสูบน้ำพร้อมอุปกรณ์ท่ออีกหนึ่งชุด



ภาพประกอบ 19 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลอากาศชนิดโรตาริเตอร์



ภาพประกอบ 20 เครื่องสูบน้ำ

3.2.9 เครื่องสูบน้ำ เป็นเครื่องสูบน้ำชนิดจุ่มแสดงดังภาพประกอบ 20 ขนาดครึ่งแรงแม้ ค่าเฮดความสูงน้ำสูงสุดมีค่า 10 เมตร จำนวน 3 ตัว เครื่องสูบน้ำทุกตัวทำหน้าที่ต่างกันดังนี้ ตัวที่หนึ่ง อยู่ในถังไซฟอนทำหน้าที่ช่วยไซฟอนทำงานขณะเริ่มต้น ตัวที่สองและสามทำหน้าที่สูบน้ำขึ้นสู่ถังไซฟอนเพื่อให้ค่าเฮดความสูงน้ำของไซฟอนคงที่



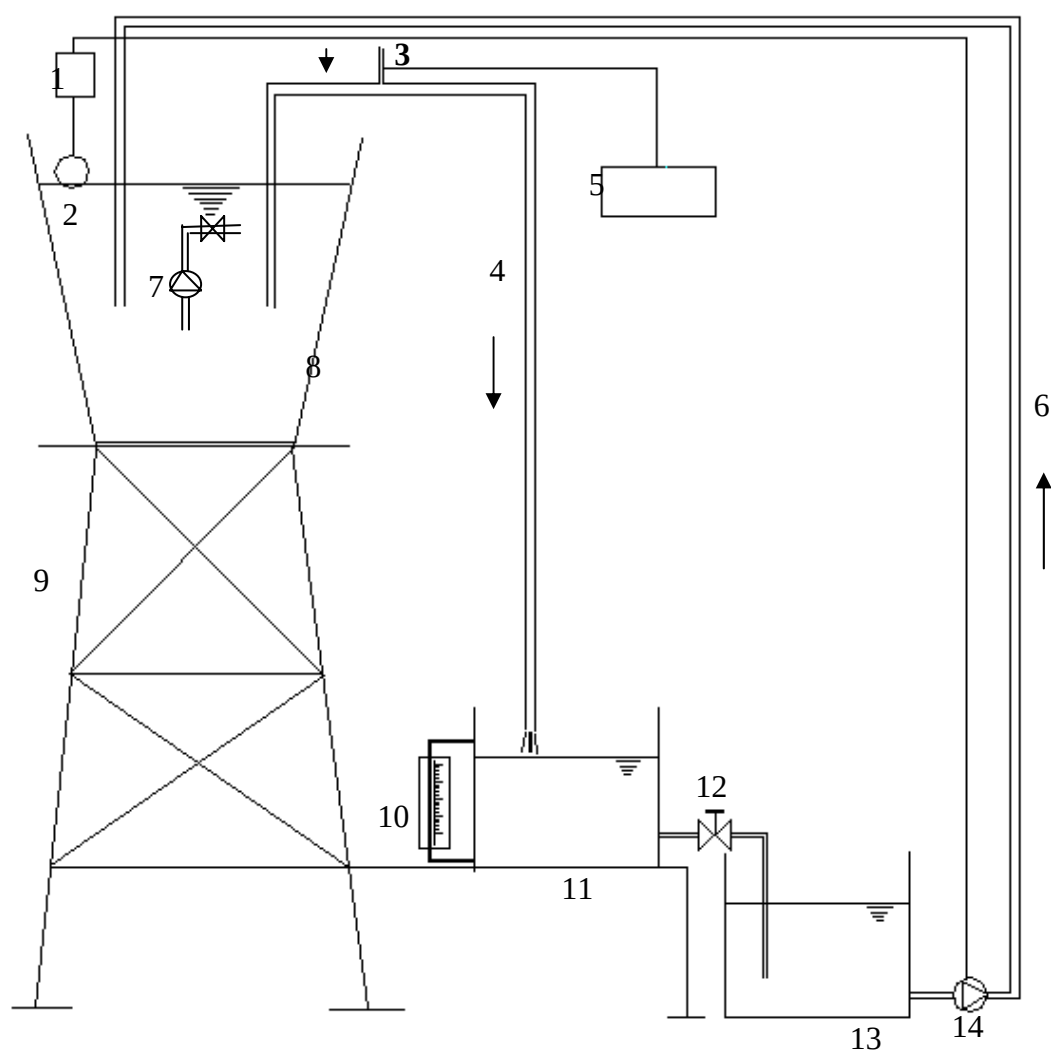
ภาพประกอบ 21 นาฬิกาจับเวลาแบบละเอียด

3.2.10 นาฬิกาจับเวลาของบริษัทคอนโทรล รุ่น TBR-75 เป็นชนิดดิจิทัลมีความละเอียด 1/100 วินาที ใช้เพื่อจับเวลาและหาค่าอัตราการไหลของน้ำโดยการวัดปริมาตรน้ำเทียบกับเวลา แสดงดังภาพประกอบ 21

3.2.11 ท่อลม ในการทดสอบนี้ใช้ท่อลมพลาสติกใส ที่ใช้ในอุตสาหกรรมนิวเมตริกทั่วไป ในการทดสอบมีการใช้งาน 4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในดังนี้คือ 4.02, 4.98, 6.51 และ 7.99 มิลลิเมตร ตามลำดับ

3.3 การติดตั้งระบบไซฟอน

ในการทดสอบนี้ได้ทำการทดลองกับชุดทดสอบที่สร้างขึ้นจากโครงสร้าง โดยที่ตลอดการทดสอบต้องการค่าเฮดความสูงน้ำ 3.78 เมตร ดังนั้นจึงต้องติดตั้งถังจ่ายน้ำไว้บนนั่งร้านเหล็กสูง 3 ชั้น สำหรับการควบคุมให้ค่าเฮดความสูงน้ำตลอดการทดสอบมีค่าคงที่ โดยการรักษาระดับน้ำ



ภาพประกอบ 22 แผนภาพระบบไซฟอนที่ใช้ทดสอบ

- | | |
|--------------------------------|-------------------------|
| 1 อุปกรณ์ควบคุมระดับความสูงน้ำ | 8 ถังจ่ายน้ำ |
| 2 ลูกกลอยพลาสติก | 9 โครงสร้างรองรับถังน้ำ |
| 3 ท่ออากาศ | 10 สเกลอ่านระดับน้ำ |
| 4 ท่อไซฟอนพลาสติกขนาดต่างๆ | 11 ถังรับน้ำจากไซฟอน |
| 5 อุปกรณ์วัดความเร็วลม | 12 วาล์วประตูน้ำ |
| 6 ท่อส่งน้ำขึ้นถังเก็บ | 13 ถังเก็บน้ำสำรอง |
| 7 ชุดสูบน้ำช่วยเริ่มระบบไซฟอน | 14 เครื่องสูบน้ำ |

ที่อยู่ในถังไซฟอนให้คงที่ เนื่องจากขณะที่ไซฟอนทำงานระดับน้ำในถังไซฟอนจะลดลง เพื่อให้ระดับน้ำในถังคงที่จึงจำเป็นต้องสูบน้ำเติมเข้ามาในถัง ด้วยอัตราการไหลเท่ากับอัตราการไหลของน้ำออกจากถัง การควบคุมการเพิ่มปริมาณน้ำในถังทำไซฟอนทำได้โดยใช้ลูกลอยและสวิตช์อัตโนมัติควบคุมการเติมน้ำเข้าสู่ถัง การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆเพื่อใช้ในการทดสอบระบบไซฟอนนี้แสดงดังภาพประกอบ 22 โดยการประกอบและติดตั้งอุปกรณ์ระบบไซฟอนสำหรับการทดสอบมีขั้นตอนดังนี้

- 3.3.1 จัดทำโครงสร้างเหล็กเป็นอาคารเก็บน้ำที่สามารถสร้างเฮดน้ำได้ 3.78 เมตร
- 3.3.2 ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เป็นระบบไซฟอน ประกอบด้วย ถังจ่ายน้ำ ท่อไซฟอน ถังรับน้ำ
- 3.3.3 ติดตั้งอุปกรณ์ช่วยควบคุมระดับเฮดน้ำ ซึ่งประกอบด้วย ลูกลอย, สวิตช์อัตโนมัติ เครื่องสูบน้ำ และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ
- 3.3.4 ติดตั้งอุปกรณ์ท่อลม ที่ด้านบนของท่อไซฟอน
- 3.3.5 ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วของลมในท่อที่ด้านบนของไซฟอนและอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำที่ปลายทางออกของท่อไซฟอน

3.4 กรณีของการทดสอบ

ในการทดสอบระบบไซฟอนนี้ เพื่อให้การทดสอบเป็นไปอย่างมีระเบียบแบบแผน จึงได้ทำการแบ่งกรณีของการทดสอบเป็น 5 กรณีของการทดสอบพร้อมทั้งได้อธิบายขั้นตอนการทดสอบในทุกกรณีทดสอบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.4.1 กรณีของการทดสอบระบบไซฟอนโดยยังไม่มีลมที่ท่อไซฟอน

เป็นการทดสอบความพร้อมใช้งานของระบบว่าระบบสามารถทำงานได้หรือไม่ เนื่องจากการไหลของน้ำในไซฟอนเป็นการไหลโดยไม่ใช้เครื่องสูบน้ำช่วยในขณะไซฟอนทำงาน อีกทั้งเป็นการทดสอบระบบควบคุมระดับน้ำ เพื่อไม่ให้ค่าเฮดเปลี่ยน แปลงขณะทำการทดสอบโดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.4.1.1 เติมน้ำในถังไซฟอนและติดตั้งท่อไซฟอน โดยให้ปลายท่อด้านบนจมอยู่ในน้ำ ส่วนปลายอีกด้านเปิดสู่อากาศและอยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำในแนวดิ่งประมาณ 3.78 เมตร

3.4.1.2 ทำการเริ่มระบบไซฟอน โดยเปิดสวิตช์ให้เครื่องสูบน้ำหมายเลข 7 (ดังภาพประกอบ 22) ทำงาน จากนั้นเอามือปิดที่ปลายท่อดูดของไซฟอน เมื่อน้ำไหลผ่านท่อไซฟอนลงสู่ด้านล่างให้สังเกตลักษณะการไหลของน้ำ

3.4.1.3 เมื่อน้ำไหลเต็มท่อให้ปิดประตูน้ำด้านบนและปิดเครื่องสูบน้ำด้านบน แล้วปล่อยให้ไซฟอนทำงานด้วยตัวเอง

3.4.1.4 ปล่ยให้ไซฟอนทำงานสักครู่ แล้วสังเกตว่าเมื่อระดับน้ำในถังปล่ยน้ำลดลงถึงจุดที่กำหนดแล้วเครื่องสูบน้ำตัวล่างที่ใช้เพื่อเติมน้ำให้ถังไซฟอน ทำงานหรือไม่ถ้าเครื่องสูบน้ำไม่ทำงานให้ทำการแก้ไขโดยตรวจสอบการทำงานของเครื่องสูบน้ำ ตรวจสอบการทำงานของสวิตช์ไฟฟ้าว่าการทำงานมีความสัมพันธ์กับลูกลอยหรือไม่ หลังจากทำการแก้ไขแล้วเริ่มทำการทดสอบอีกครั้งเพื่อให้ระบบพร้อมใช้งาน

3.4.2 กรณีของการทดสอบระบบไซฟอนโดยเจาะช่องลมขนาดต่างๆ ที่ด้านบนของท่อไซฟอนแต่ละขนาดเป็นการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและอัตราการไหลของลมของระบบไซฟอนอย่างคร่าวๆ โดยการเจาะช่องลมที่ด้านบนของท่อไซฟอนดังแสดงในภาพประกอบ 23 จากนั้นทำการทดสอบเพื่อจะทำให้ทราบว่ารูเจาะขนาดเท่าใดทำให้ท่อไซฟอนแต่ละขนาดหยุดการทำงาน โดยมีตอนการทดสอบดังนี้



ภาพประกอบ 23 การเจาะช่องลมที่ด้านบนของท่อไซฟอน

3.4.2.1 ทำการเจาะช่องลมขนาด 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร ที่ด้านบนของท่อไซฟอน

3.4.2.2 ทำการเริ่มระบบไซฟอน โดยเปิดสวิตช์ให้เครื่องสูบน้ำหมายเลข 7 (ดังภาพประกอบ 22) ทำงาน จากนั้นเอามือปิดที่ปลายท่อดูดของไซฟอนเมื่อน้ำไหลผ่านท่อไซฟอนลงสู่ด้านล่างให้สังเกตลักษณะการไหลของน้ำ

3.4.2.3 เมื่อน้ำไหลเต็มท่อให้ปิดประตูน้ำตัวบนและปิดเครื่องสูบน้ำตัวบน แล้วปล่อยมือให้ไซฟอนทำงานด้วยตัวเอง

3.4.2.4 สังเกตลักษณะการไหลของน้ำที่ออกจากไซฟอน แล้วบันทึกผลการสังเกต

3.4.2.5 เมื่อพบว่าท่อไซฟอนที่รูเจาะขนาดเท่าใดที่ไซฟอนไม่ทำงานให้บันทึกผลการทดสอบไว้

3.4.2.6 ทำการทดสอบซ้ำ โดยเปลี่ยนขนาดช่องลมที่ด้านบนของไซฟอนเป็น 3, 4, และ 5 มิลลิเมตรตามลำดับ

3.4.3 กรณีของการทดสอบระบบไซฟอนโดยการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ

เป็นการทดสอบเพื่อต้องการพิสูจน์ว่าการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำจะสามารถเหนี่ยวนำให้เพิ่มอัตราการไหลของลมได้อย่างไร เนื่องจากการไหลของน้ำในท่อสำหรับระบบไซฟอนเป็นการไหลด้วยพลังงานในตัวระบบเองไม่มีการใช้เครื่องสูบน้ำช่วยเพิ่มอัตราการไหล ดังนั้นการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำในระบบทำได้โดยการเปลี่ยนขนาดท่อไซฟอนให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ใหญ่ขึ้นโดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.4.3.1 เจาะช่องลมขนาด 12 มิลลิเมตร ที่ด้านบนของไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22.10 มิลลิเมตร เพื่อสอดท่อลมขนาด 4.02 มิลลิเมตร ลงตามความยาวของท่อไซฟอน

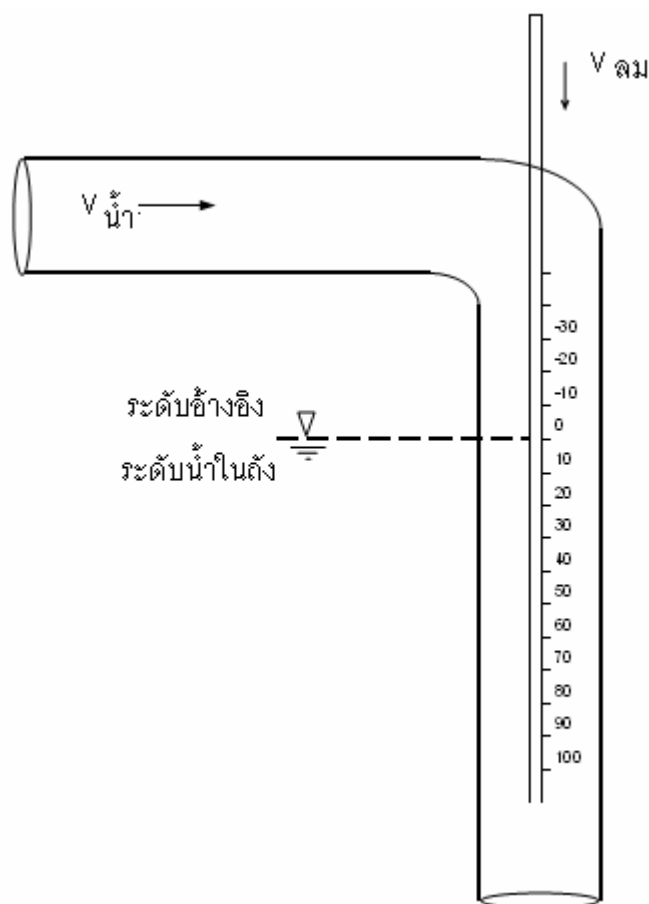
3.4.3.2 สอดท่อลมใส่ในท่อไซฟอนโดยให้ปลายสายลมอยู่ที่ระดับความลึกความลึก (0) เซนติเมตรดูตำแหน่งดังภาพประกอบ 24 แล้ววางรอยต่อระหว่างท่อลมกับท่อไซฟอนเพื่อป้องกันการรั่วด้วยซิลิโคน

3.4.3.3 ทำการเริ่มระบบไซฟอน โดยเปิดให้เครื่องสูบน้ำหมายเลข 7 (ดังภาพประกอบ 22) ทำงาน จากนั้นเอามือปิดที่ปลายท่อดูดของไซฟอนเมื่อน้ำไหลผ่านท่อไซฟอนลงสู่ด้านล่างให้สังเกตลักษณะการไหล

3.4.3.4 เมื่อน้ำไหลเต็มท่อให้ปิดประตูน้ำตัวบนและปิดเครื่องสูบน้ำตัวบน แล้วปล่อยมือให้ไซฟอนทำงานด้วยตัวเอง

3.4.3.5 เมื่อระดับน้ำในถังเพิ่มจาก 40 ลิตรให้เริ่มจับเวลา และหยุดเวลาเมื่อระดับน้ำในถังอยู่ที่ 60 ลิตร ได้ผลต่างปริมาตรน้ำเป็น 20 ลิตรจากนั้นนำค่าเวลาที่ได้นำมาคำนวณเป็นอัตราการไหลของน้ำ

3.4.3.6 ทำการทดสอบตามขั้นตอนที่ 3, 4 และ 5 โดยเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อไซฟอนจาก 22.10 มิลลิเมตร เป็นท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30.51, 38.10 และ 44.35 มิลลิเมตรตามลำดับ จากนั้นนำค่าอัตราการไหลของลมที่ได้จดบันทึกเพื่อวิเคราะห์ผลต่อไป



ภาพประกอบ 24 ตำแหน่งปลายท่อลมที่ใช้ในการทดสอบ

3.4.4 กรณีของการทดสอบระบบไซฟอนเมื่อเปลี่ยนขนาดท่อลม

เป็นการทดสอบระบบไซฟอนเพื่อต้องการพิสูจน์ว่า การเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อลมจะมีผลอย่างไรกับอัตราการไหลของน้ำในระบบไซฟอนโดยมีรายละเอียดขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.4.4.1 เจาะช่องลมขนาด 12 มิลลิเมตร ที่ด้านบนของไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22.10 มิลลิเมตร เพื่อสอดท่อลมขนาด 4.02 มิลลิเมตร ลงตามความยาวของท่อไซฟอน

3.4.4.2 สอดท่อที่ตำแหน่งปลายท่ออยู่ที่ระดับความลึก (0) เซนติเมตร ดูตำแหน่งดังภาพประกอบ 3.10 แล้วรอรอยต่อระหว่างท่อลมกับท่อไซฟอนเพื่อป้องกันการรั่ว

3.4.4.3 ทำการเริ่มระบบไซฟอน โดยเปิดสวิทช์ให้เครื่องสูบน้ำหมายเลข 7 (ดังภาพประกอบ 22) ทำงานจากนั้นเอามือปิดที่ปลายท่อดูดของไซฟอนเมื่อน้ำไหลผ่านท่อไซฟอนลงสู่ด้านล่างให้สังเกตลักษณะการไหล

3.4.4.4 เมื่อน้ำไหลเต็มท่อให้ปิดประตูน้ำตัวบนและปิดเครื่องสูบน้ำตัวบน จากนั้นปล่อยมือให้ไซฟอนทำงานด้วยตัวเอง

3.4.4.5 เมื่อระดับน้ำในถังเพิ่มจาก 40 ลิตรให้เริ่มจับเวลา และหยุดเวลาเมื่อระดับน้ำในถังอยู่ที่ 60 ลิตรได้ผลต่างปริมาตรน้ำเป็น 20 ลิตร จากนั้นนำค่าเวลาที่ได้นำมาคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการไหลของน้ำ

3.4.4.6 ทำการทดสอบตามขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 5 โดยเปลี่ยนขนาดท่อลมจาก 4.02 มิลลิเมตรเป็น 4.98, 6.51 และ 7.99 มิลลิเมตร ตามลำดับ

3.4.4.7 นำค่าอัตราการไหลของลมที่ได้จัดบันทึกเพื่อวิเคราะห์ผลต่อไป

3.4.5 กรณีของการทดสอบระบบไซฟอนเมื่อเปลี่ยนความลึกในการสอดท่อลม

เป็นการทดสอบระบบไซฟอน โดยสอดท่อลมลงตามแนวดิ่งด้านข้างของท่อไซฟอนที่ความลึกต่างๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกในการสอดท่อลม อัตราการไหลของน้ำและอัตราการไหลของลมที่สภาวะต่างๆ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.4.5.1 เจาะช่องลมขนาด 12 มิลลิเมตร ที่ด้านบนของไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22.10 มิลลิเมตร เพื่อสอดท่อลมขนาด 4.02 มิลลิเมตร ลงตามความยาวของท่อไซฟอน

3.4.5.2 สอดท่อลมที่ตำแหน่งปลายท่ออยู่ที่ระดับความลึก (0) เซนติเมตร ดังภาพประกอบที่ 3.10 แล้วรอรอยต่อระหว่างท่อลมกับท่อไซฟอนเพื่อป้องกันการรั่ว

3.4.5.3 ทำการเริ่มระบบไซฟอน โดยเปิดสวิตช์ให้เครื่องสูบน้ำหมายเลข 7 (ดังภาพประกอบ 22) ทำงาน จากนั้นเอามือปิดที่ปลายท่อดูดของไซฟอน เมื่อน้ำไหลผ่านท่อไซฟอนลงสู่ด้านล่างให้สังเกตลักษณะการไหล

3.4.5.4 เมื่อน้ำไหลเต็มท่อให้ปิดประตูน้ำตัวบนและปิดเครื่องสูบน้ำตัวบน แล้วปล่อยมือให้ไซฟอนทำงานด้วยตัวเอง

3.4.5.5 เมื่อระดับน้ำในถังเพิ่มจาก 40 ลิตรให้เริ่มจับเวลา และหยุดเวลาเมื่อระดับน้ำในถังอยู่ที่ 60 ลิตร ได้ผลต่างปริมาตรน้ำเป็น 20 ลิตร จากนั้นนำค่าเวลาที่ได้นำมาคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการไหลของน้ำ

3.4.5.6 ทำการทดสอบตามขั้นตอนที่ข้อ 2 ถึงขั้นตอนที่ข้อ 5 โดยเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อไซฟอนจาก 22.10 มิลลิเมตร เป็นท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30.51, 38.10 และ 44.35 มิลลิเมตร ตามลำดับ

3.4.5.7 นำค่าอัตราการไหลของลมที่ได้จัดบันทึกเพื่อวิเคราะห์ผลต่อไป

3.4.5.8 ทำการทดสอบตามขั้นตอนที่ 3.4.5.2 ถึงขั้นตอนที่ 3.4.5.7 โดยเปลี่ยนค่าระดับความลึกจากตำแหน่ง(0) เป็น (-20), (-10), (10) และ (20) จนถึงตำแหน่ง (100) เซนติเมตรตามลำดับรูปภาพประกอบที่ 3.10

3.4.5.9 ทำการทดสอบตามขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 8 โดยเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อลมจาก 4.02 มิลลิเมตรเป็น 4.98, 6.51 และ 7.99 มิลลิเมตรตามลำดับ

การออกแบบการทดสอบระบบไฮดรอนี้ เป็นการควบคุมค่าพารามิเตอร์ที่จะมามีผลต่อการทดสอบ ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญคือค่าเฮดความสูงน้ำ ซึ่งได้ทำการควบคุมโดยสวิตช์อัตโนมัติและอุปกรณ์ลูกลอยทำงานสัมพันธ์กัน ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่จะมีผลต่อการทดสอบนี้ เช่น ค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ค่าความหนาแน่นของน้ำที่เปลี่ยนไปและค่าพารามิเตอร์อื่นๆ นั้น มีผลต่อระบบไฮดรอน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณาในการออกแบบ

ส่วนวิธีดำเนินการทดสอบนั้นเป็นการจัดระเบียบวิธี เพื่อให้การทดสอบดำเนินไปอย่างเป็นขั้นตอน โดยในการทดสอบนั้นต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ อัตราการไหลของลมและตำแหน่งความลึกในการสอดท่อลมและเพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จะนำมาวิเคราะห์ มีความน่าเชื่อถือจึงได้ดำเนินการดังนี้คือ ค่าตำแหน่งความลึกในการสอดท่อจะทำการพันเทประบุตำแหน่งก่อนสอดท่อลมเข้าไปในท่อไฮดรอน ส่วนค่าอัตราการไหลของน้ำที่ได้จากการใช้นาฬิกาจับเวลาเทียบกับปริมาตรที่รู้แน่นอนอยู่แล้วนั้น ทำได้โดยทำการทดสอบ 5 ครั้งต่อการทดสอบ สำหรับค่าอัตราการไหลของลมที่ใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตาริเตอร์ลมนั้น ได้ทำการสอบเทียบซึ่งจะได้แสดงรายละเอียดในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

การสอบเทียบเครื่องมือ

การทดสอบในงานวิจัยนี้มีการวัดค่าอัตราการไหลสองส่วน ส่วนที่หนึ่งคือการวัดค่าอัตราการไหลของน้ำ ซึ่งได้ทำการวัดโดยวิธีการตวงปริมาตรน้ำเทียบกับเวลา ค่าที่ได้มีความถูกต้องสูงพอสมควร ส่วนที่สองคือการวัดค่าอัตราการไหลของลม โดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตاميเตอร์ ที่มีขอบเขตการใช้งานอยู่ระหว่าง 0 ถึง 50 ลิตรต่อนาที ซึ่งมีความเหมาะสมกับสภาพการไหลของลมในท่อขนาดเล็กและมีปริมาณการไหลไม่มากสำหรับในบทนี้เป็นการสอบเทียบเครื่องมือวัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตاميเตอร์ เพื่อหาความเชื่อมั่นและความเที่ยงตรงของเครื่องมือ โดยมีหัวข้อดังต่อไปนี้

หัวข้อ 4.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและข้อกำหนดการออกแบบ

หัวข้อ 4.2 การออกแบบชุดสอบเทียบ

หัวข้อ 4.3 ขั้นตอนการทดสอบเทียบ

หัวข้อ 4.4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและข้อกำหนดการออกแบบ

ในบทนี้เป็นการสอบเทียบเครื่องมือวัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตاميเตอร์ เทียบกับอุปกรณ์วัดอัตราเร็วลมชนิดใบพัด (Digital wind turbine anemometer) และอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดแผ่นออร์ฟิซ ที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นมาจากนั้นดำเนินการทดสอบแล้วจะนำค่าที่ได้จากอุปกรณ์ทั้งสามชนิดมาเปรียบเทียบ เพื่อหาค่าความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดและหาค่าปรับแก้ที่เหมาะสมให้กับอุปกรณ์ที่จะใช้กับการทดสอบในงานวิจัยต่อไป เครื่องมือวัดเพื่อหาอัตราการไหลของลมทั้งสามชนิดประกอบด้วย

4.1.1 เครื่องมือวัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตاميเตอร์ (Rotameter)

เป็นโรตاميเตอร์ของ Dwyer รุ่น VFA-26-BV ผลิตโดยบริษัท Dwyer Instruments, Inc. จากสหรัฐอเมริกา โดยมีขอบเขตการวัดอัตราการไหลตั้งแต่ 0 ถึง 50 ลิตรต่อนาที ที่สภาวะความดันเกจ สูงสุดไม่เกิน 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิใช้งานสูงสุดไม่เกิน 65 องศาเซลเซียส มีวาล์วที่สามารถใช้ปรับค่าอัตราการไหลของลมได้ ในการทดสอบนี้เลือกใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตاميเตอร์เนื่องจากในการทดสอบนี้เป็นการไหลของลมในท่อที่มีขนาดเล็ก ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าว

สามารถเชื่อมต่อเข้ากับท่อลมของชุดทดสอบได้เป็นอย่างดี ลักษณะของโรตาริเมตรที่ใช้ในการทดสอบได้แสดงดังภาพประกอบ 19



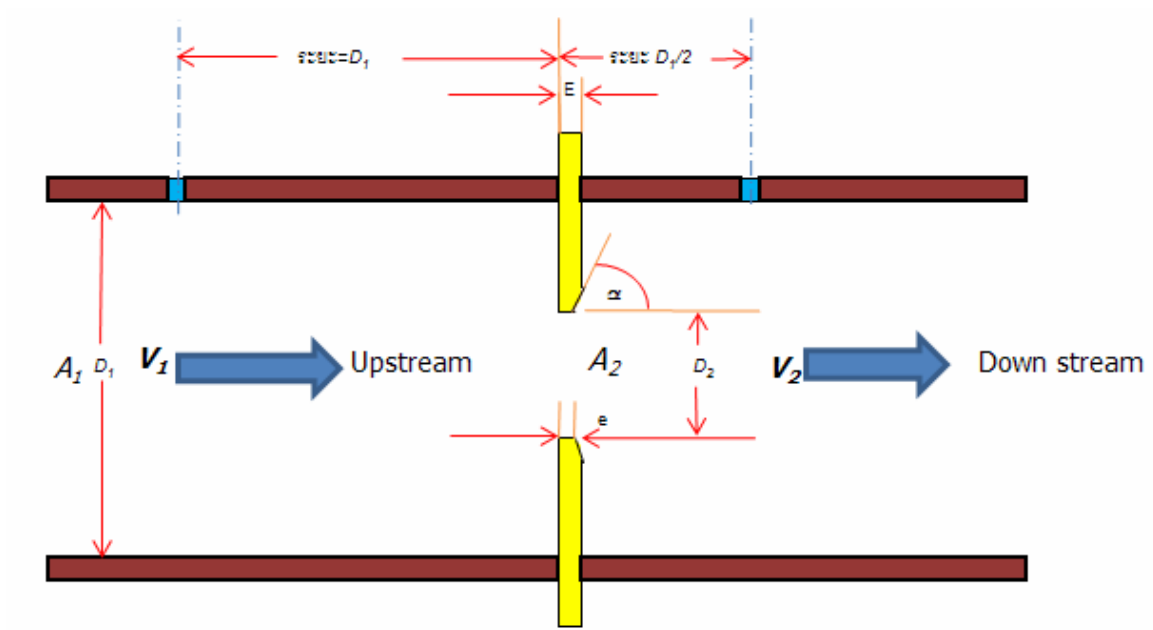
ภาพประกอบ 25 อุปกรณ์วัดอัตราเร็วลมชนิดใบพัดแสดงผลเป็นตัวเลข

4.1.2 เครื่องมือวัดอัตราเร็วลมชนิดใบพัด (Digital wind turbine anemometer)

อุปกรณ์วัดอัตราเร็วลมที่ใช้ในการทดสอบนี้ เป็นอุปกรณ์วัดอัตราเร็วลม รุ่น AM-4201 ของ L.T. Lorton สามารถวัดค่าอัตราเร็วลมได้ตั้งแต่ 0 ถึง 30 เมตรต่อวินาที อุปกรณ์ชนิดนี้เป็นที่นิยมต่อการนำมาใช้ เนื่องจากสามารถใช้งานได้ง่าย มีความน่าเชื่อถือ เครื่องวัดชนิดนี้แสดงผลในการอ่านเป็นแบบตัวเลข และสามารถปรับเปลี่ยนหน่วยได้ในตัว ลักษณะอุปกรณ์ดังแสดงในภาพประกอบ 25

4.1.3 เครื่องมือวัดอัตราการไหลของลมชนิดแผ่นออริฟิซ (Orifice plate anemometer)

เครื่องมือวัดอัตราการไหลของลมชนิดแผ่นออริฟิซ เป็นการสร้างอุปกรณ์กีดขวางการไหลของลมในท่อลม จากนั้นใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาอธิบายสภาพการไหลและคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องออกมาได้ ในการทดสอบครั้งนี้ ได้ออกแบบระบบอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดแผ่น โดยได้ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 26



จากภาพประกอบ 26 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบได้กำหนดไว้ดังนี้

- D_1 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อออร์ฟิซ
- D_2 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูของแผ่นออร์ฟิซ
- E คือ ความหนาของแผ่นออร์ฟิซ
- e คือ ความหนาของแผ่นออร์ฟิซที่เหลือหลังจากลบเหลี่ยม
- α คือ มุมเอียงของการลบเหลี่ยม
- A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อลม
- A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องเปิดของแผ่นออร์ฟิซ

ในการออกแบบชุดทดสอบครั้งนี้ได้ใช้ข้อกำหนดในการออกแบบชุดทดสอบ โดยอ้างอิงข้อมูลพื้นฐาน และข้อกำหนดต่างๆ จาก British Standard: Measurement of Fluid Flow in Closed Conduits⁽¹²⁾ ซึ่งได้ทำการสรุปข้อมูลการออกแบบรวมไว้ดังแสดงในตาราง 3

ตาราง 3 ข้อมูลการออกแบบชุดทดสอบอริฟิซ

รายการ	ข้อกำหนดการออกแบบ มิลลิเมตร	ค่าที่คำนวณได้ มิลลิเมตร	ค่าที่เลือกใช้ มิลลิเมตร
1. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ภายในท่ออริฟิซ, D_1			44.00
2. ความหนา e	มากกว่า 0.005 D และน้อยกว่า 0.02 D	มากกว่า 0.22 น้อยกว่า 0.88	1.00
3. ความหนาแผ่นอริฟิซ, E	มากกว่า e น้อยกว่า 0.05 D	มากกว่า 0.88 น้อยกว่า 2.20	2.00
4. ขนาดรูอริฟิซ, D_2	มากกว่า 0.2 D และน้อยกว่า 0.75 D	มากกว่า 0.88 น้อยกว่า 33.00	14.00
5. ขนาดรูमानอมิเตอร์	น้อยกว่า 13.00 น้อยกว่า 0.13 D	น้อยกว่า 13.00 น้อยกว่า 5.76	2.50
6. หลอดปรับสภาพการไหล จำนวนหลอดเส้นผ่าน ศูนย์กลางหลอด, d_t ความ ยาวหลอด	มากกว่า 19 หลอด น้อยกว่า 0.2 D มากกว่า 10 d_t	น้อยกว่า 5.76 มากกว่า 55.00	28 หลอด 5.50 56.00
7. ระยะเจาะช่องลมของมานอ มิเตอร์, Tapping (วิธี D and $D/2$)	ด้านต้นลมเท่ากับ D ด้านท้ายลมเท่ากับ $D/2$	44.00 22.00	44.00 22.00

หมายเหตุ : ระยะการเจาะช่องลม(Tapping)เพื่อต่อเข้ากับท่อพลาสติกกรุด้วยสำหรับทำเป็นมานอ มิเตอร์ ในวิธี D and $D/2$ นั้น ด้านต้นลม (Upstream) วัดจากศูนย์กลางช่องเจาะถึง ด้านหน้าของแผ่นอริฟิซด้านต้นลมให้เรียกว่าค่า L_1 ส่วนด้านท้ายลมวัดจาก ศูนย์กลางช่องเจาะถึงด้านหน้าของ แผ่นอริฟิซด้านต้นลมให้เรียกว่าค่า L_2 ดังแสดงใน ภาพประกอบ 26

4.1.3.1 การคำนวณเกี่ยวกับเครื่องมือวัดอัตราการไหลอากาศชนิดแผ่นออร์ฟิซ

พิจารณาภาพประกอบ 26 จากสมการความต่อเนื่องที่ว่าของไหลไม่สามารถไหลข้ามออกมาจากท่อการไหล (Steam tube) ได้ ดังนั้นของไหลที่ไหลเข้าทางหน้าตัด A_1 ด้วยความเร็ว V_1 จะไหลออกมาทางหน้าตัด A_2 ด้วยความเร็ว V_2 เมื่อเป็นการไหลแบบสภาวะคงตัว มวลของของไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา สำหรับของไหลประเภทเดียวกันมีค่าความหนาแน่นคงที่ จากสมการความต่อเนื่องสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (4.1)$$

$$V_1 = \frac{A_2}{A_1} \times V_2 \quad (4.2)$$

$$= \frac{\pi D_2^2}{4} \times \frac{4}{\pi D_1^2} \times V_2$$

$$V_1 = \frac{D_2^2}{D_1^2} \times V_2 \quad (4.3)$$

พิจารณาสมการพลังงานที่ตำแหน่ง 1 และ 2 ในกรณีที่ไม่มี การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน ดังภาพประกอบ 4.2 สามารถเขียนเป็นสมการพลังงานได้ดังนี้

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + \rho g Z_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \rho g Z_2 \quad (4.4)$$

เนื่องจากตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในระดับความสูงเดียวกัน จะได้ $Z_1 = Z_2$ ดังนั้นสมการพลังงานสามารถเขียนได้เป็น

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (4.5)$$

แทนค่า V_1 จากสมการ (4.3) ลงใน (4.5) จะได้

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho \frac{D_2^4}{D_1^4} \times V_2^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2$$

และ

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 - \frac{1}{2} \rho \frac{D_2^4}{D_1^4} \times V_2^2$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 \left(1 - \frac{D_2^4}{D_1^4} \right)$$

เมื่อย้ายสมการเพื่อหาค่า V_2 จะได้

$$V_2 = \left[\frac{2 (P_1 - P_2)}{\rho \left(1 - \frac{D_2^4}{D_1^4} \right)} \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

กำหนดให้ $\beta = \frac{D_2}{D_1}$ แล้วแทนค่าลงในสมการ(4.6)

ดังนั้นจะได้
$$V_2 = \left[\frac{2 (P_1 - P_2)}{\rho (1 - \beta^4)} \right]^{1/2} \quad (4.7)$$

จาก $P = \rho gh$ ดังนั้น

จะได้
$$V_2 = \left[\frac{2\rho g (Z_1 - Z_2)}{\rho (1 - \beta^4)} \right]^{1/2}$$

$$V_2 = \left[2g \frac{(Z_1 - Z_2)}{(1 - \beta^4)} \right]^{1/2} \quad (4.8)$$

เนื่องจากสมการเบอร์นูลลีที่ใช้ในสมการ (4.4) เป็นการสมมุติว่าของไหลไม่มีความหนืดแต่ในความเป็นจริงแล้วการไหลมีการสูญเสียเนื่องจากความความเสียดทาน ดังนั้นต้องมีการทดแทนค่าการสูญเสียซึ่งจะออกมาในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การไหลเพื่อช่วยในการคำนวณให้ได้อัตราการไหลของลมที่แท้จริง สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การไหลของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดแผ่นออร์ฟิซ (Coefficient of orifice plate anemometer) ใช้สัญลักษณ์ C_o

ดังนั้นจะได้
$$V_2 = C_o \left[2g \frac{(Z_1 - Z_2)}{(1 - \beta^4)} \right]^{1/2} \quad (4.9)$$

กำหนดให้ Q_2 เป็นอัตราการไหลของลมและ $Q_2 = A_2 V_2$

ดังนั้น
$$Q_2 = A_2 C_o \left[2g \frac{(Z_1 - Z_2)}{(1 - \beta^4)} \right]^{1/2} \quad (4.10)$$

4.1.3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดแผ่นออร์ฟิซ (C_o)
ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของอัตราการไหลของลมชนิดแผ่นออร์ฟิซสามารถหาได้หลายวิธี วิธีหนึ่งที่สามารถหาได้คือจากสมการของสโทลซ์ (Stolz equation)⁽¹²⁾

$$C_o = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5}\left(\frac{10^6}{\text{Re}}\right)^{0.75} + 0.090L'_1\beta^4(1-\beta^4)^{-1} - 0.0337L'_2\beta^3 \quad (4.11)$$

โดยที่

L'_1 คือ ค่าอัตราส่วน (L_1/D_1)

L'_2 คือ ค่าอัตราส่วน (L_2/D_2)

Re คือ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์

จากการทดสอบทำการเจาะช่องลม(Tapping)ที่ผิวท่อออร์ฟิซ แบบ D และ $D/2$ ดังนั้นได้ค่า $L'_1 = 1$ และ $L'_2 = 0.47$

4.1.3.3 การคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re)

จากการทดสอบใช้ท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.00 มิลลิเมตร

จาก
$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

แทนค่าเพื่อหาพื้นที่หน้าตัดจะได้
$$A = \frac{\pi \times (7 \times 10^{-3})^2}{4}$$

$$A = 3.85 \times 10^{-5} \quad \text{ตารางเมตร}$$

พิจารณาจากเครื่องมือวัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตารีสามารถใช้อัตราการไหลได้สูงสุด (Q_{Rota}) ได้ถึง 50 ลิตรต่อวินาทีหากพิจารณาที่ 50 ลิตรต่อวินาที

ดังนั้นจะได้
$$Q_{Rota} = \frac{50 \text{ ลิตร}}{\text{วินาที}} \times \frac{1 \text{ ลูกบาศก์เมตร}}{1000 \text{ ลิตร}} \times \frac{1 \text{ นาที}}{60 \text{ วินาที}}$$

$$= 8.33 \times 10^{-4} \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที}$$

และจะได้
$$V_{Rota} = \frac{8.33 \times 10^{-4}}{3.85 \times 10^{-5}}$$

$$V_{Rota} = 21.636 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

จากสมการการหาค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ว่า

$$\text{Re} = \frac{V_{Rota} \times D}{\mu} \quad (4.12)$$

เมื่อ 9 คือค่าความหนืดจลน์ศาสตร์ (Kinematics viscosity) ของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 1.011×10^{-6} ตารางเมตรต่อวินาทีแทนค่าในสมการ (4.12) จะได้

$$\text{Re} = \frac{21.636}{1.0011 \times 10^{-6}}$$

$$\text{Re} = 1.149 \times 10^5$$

จากตาราง A2 (British Standard: Measurement fluid flow in closed conduits)⁽¹²⁾ ที่ค่า $\beta = 0.318$ และ $\text{Re} = 1.149 \times 10^5$ จะหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมได้ค่าเท่ากับ

$$C_o = 0.5998 \quad (4.13)$$

จากสมการ (4.11) เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดแผ่นอริฟิซด้วยสมการของสโกลซ์ จากนั้นทำการแทนค่า L'_1 , L'_2 Re และ β จะได้

$$C_o = 0.5959 + 0.0312(0.318)^{2.1} - 0.1840(0.318)^8 + 0.0029(0.318)^{2.5} \left(\frac{10^6}{1.149 \times 10^5} \right)^{0.75}$$

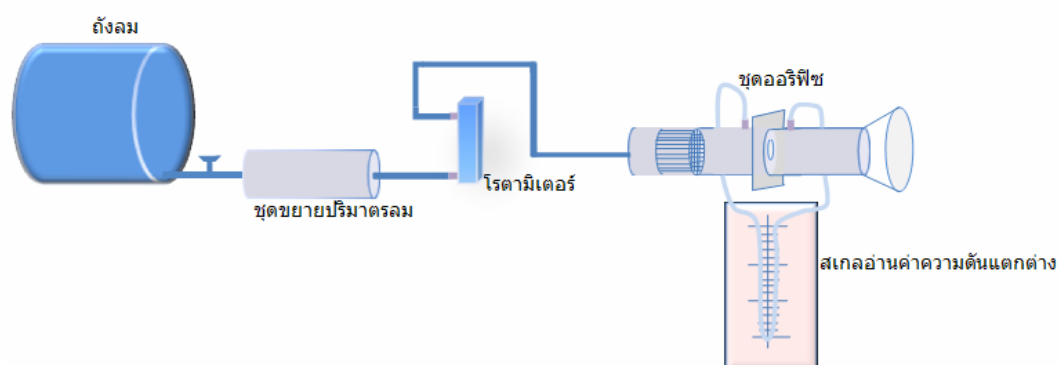
$$+ 0.090(1)(0.318)^4 (1 - (0.318)^4)^{-1} - 0.0337(0.47)(0.318)^3$$

$$C_o = 0.5994 \quad (4.14)$$

จากการคำนวณสัมประสิทธิ์การไหลของอากาศตามสมการและการเปิดตาราง A2 ในคู่มือ⁽¹²⁾ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นสำหรับการสอบเทียบนี้จึงใช้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของอากาศ ($C_o = 0.5996$) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยในการคำนวณต่อ

4.2 การออกแบบชุดสอบเทียบ

การออกแบบชุดสอบเทียบอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมทั้งสามชนิดได้แก่ อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตารีเมตรลม อุปกรณ์วัดอัตราเร็วลมชนิดใบพัด และอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศชนิดแผ่นอริฟิซได้จัดเข้าไว้เป็นระบบทดสอบชุดเดียวกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 27 โดยมีอุปกรณ์ต่างๆ ที่ประกอบเป็นระบบดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 27 ชุดทดสอบเทียบอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลม

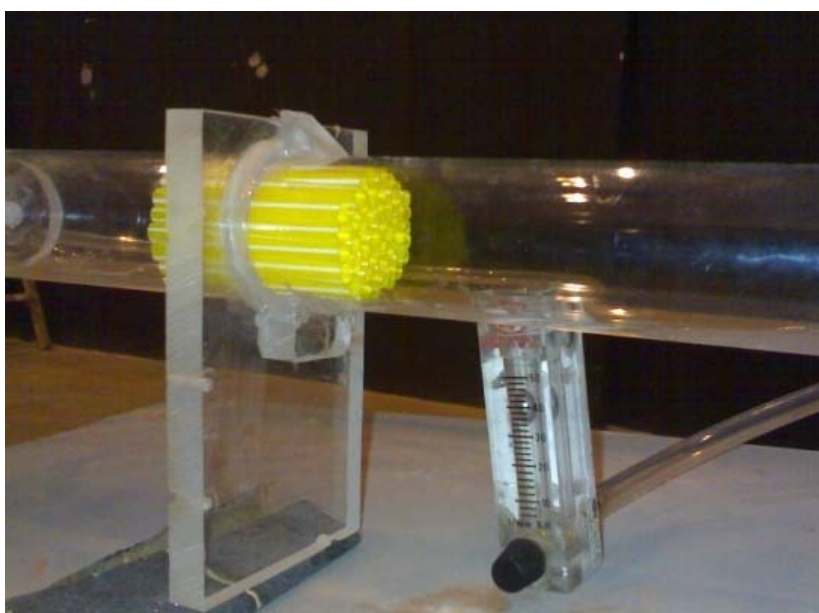


ภาพประกอบ 28 ถังลมพร้อมอุปกรณ์อัดลม

4.2.1 ถังลมขนาด 80 ลิตรพร้อมเครื่องอัดลมแบบลูกสูบเดี่ยวที่มีต้นกำลังเป็นมอเตอร์ กระแสสลับ 220 โวลต์ขนาดครึ่งแอมป์ มาตรฐานความดันพิกัด 0 ถึง 10 บาร์ และวาล์วควบคุมอัตราการไหลของลมดังแสดงในภาพประกอบ 28

4.2.2 ช่องลม (Channel) เป็นช่องลมขนาดใหญ่ใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 44.00 มิลลิเมตรในการทำชุดทดสอบ และใช้ท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.89 มิลลิเมตรเป็นท่อเชื่อมต่อ ต่อบริเวณอุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกันให้ทำงานเป็นระบบและมีความต่อเนื่อง

4.2.3 ชุดขยายปริมาตรลมทำจากท่ออะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 44.00 มิลลิเมตร ความยาว 30.00 เซนติเมตร ชุดขยายปริมาตรลมนี้จะทำการติดตั้งไว้ต่อกับถังลม เพื่อลดผลกระทบเนื่อง จากความหนาแน่นของอากาศที่จะเข้าสู่ระบบทดสอบ



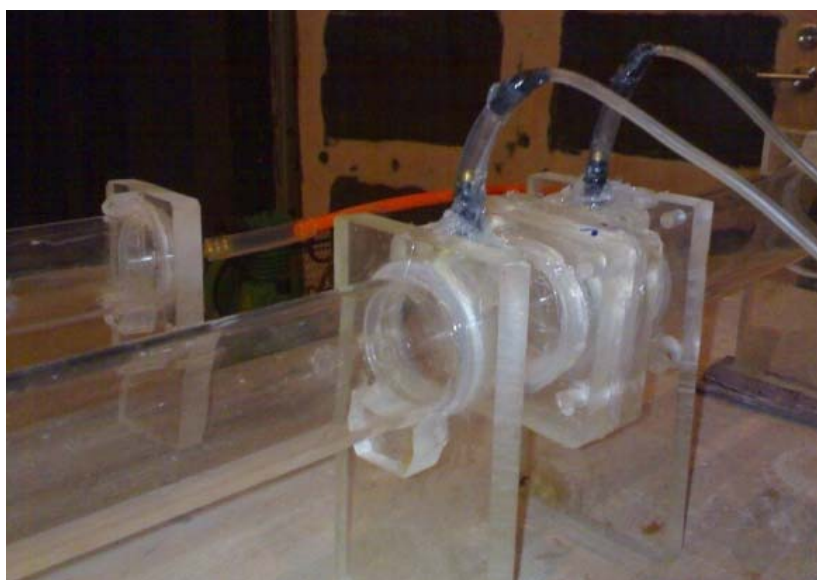
ภาพประกอบ 29 ชุดเรียงกระแสดลม

4.2.4 ชุดเรียงกระแสดลม เป็นกลุ่มของท่อขนาดเล็ก (Bundle of tube) ใช้ในการเรียงกระแสของลมเคลื่อนเข้าสู่ระบบโดยมีทิศทางเป็นเส้นตรงและมีความสม่ำเสมอ ในการทดสอบนี้ใช้หลอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.00 มิลลิเมตร จำนวน 28 หลอด ดังแสดงในภาพประกอบ 29

4.2.5 ชุดแผ่นออริฟิซ เป็นแผ่นพลาสติกความหนา 1.00 มิลลิเมตร เจาะรูที่กึ่งกลางแผ่นเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 14.00 มิลลิเมตร โดยติดตั้งให้จุดศูนย์กลางแผ่นออริฟิซอยู่ตรงกับจุดศูนย์กลางท่อ เพื่อเกิดขวางกระแสดการไหลของลม

4.2.6 ชุดมานอมิเตอร์เป็นชุดอุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นมาเพื่อวัดค่าระดับความสูงแตกต่างของระดับน้ำในท่อพลาสติกที่ดัดแปลงทำเป็นมานอมิเตอร์ ค่าที่ได้นำไปคำนวณหาค่าความดันแตกต่าง ชุดมานอมิเตอร์แบ่งออกเป็นสามส่วนประกอบด้วยระยะช่องลม (Tapping), ท่อพลาสติกรูปตัวยู และสเกลอ่านค่าระดับความสูงน้ำ รายละเอียดจะได้กล่าวถึงตามลำดับดังนี้

4.2.6.1 ระบายช่องลม (Tapping) มีวิธีการเจาะหลายวิธี ในการทดสอบนี้เลือกใช้วิธี D และ $D/2$ ซึ่งเป็นไปตามแบบมาตรฐานในคู่มือ(12) ดังนั้นจึงทำการเจาะช่องลมให้เส้นผ่านศูนย์กลางห่างจากด้านหน้าของแผ่นออร์พิชไปทางต้นลมเป็นระยะ D หรือ 44.00 มิลลิเมตร และที่ด้านท้ายลมเป็นระยะ $D/2$ หรือ 22.00 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 30 การเจาะช่องลม (Tapping)

4.2.6.2 ท่อพลาสติกรูปตัวยู (U-tube) ใช้ท่อพลาสติกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.20 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 40 เซนติเมตร ตัดเป็นรูปตัวยู ภายในท่อบรรจุน้ำเปล่าและทำการต่อปลายท่อทั้งสองด้านเข้ากับชุดทดสอบตรงตำแหน่งที่ทำการเจาะช่องลมไว้ ในการทดสอบนี้จะเห็นช่องเจาะไว้ด้านบนหรือด้านล่างก็ได้ เนื่องจากของไหลที่ทดสอบเป็นลม และมีข้อสมมุติว่ามวลของลมไม่มีผลต่อระบบทดสอบนี้

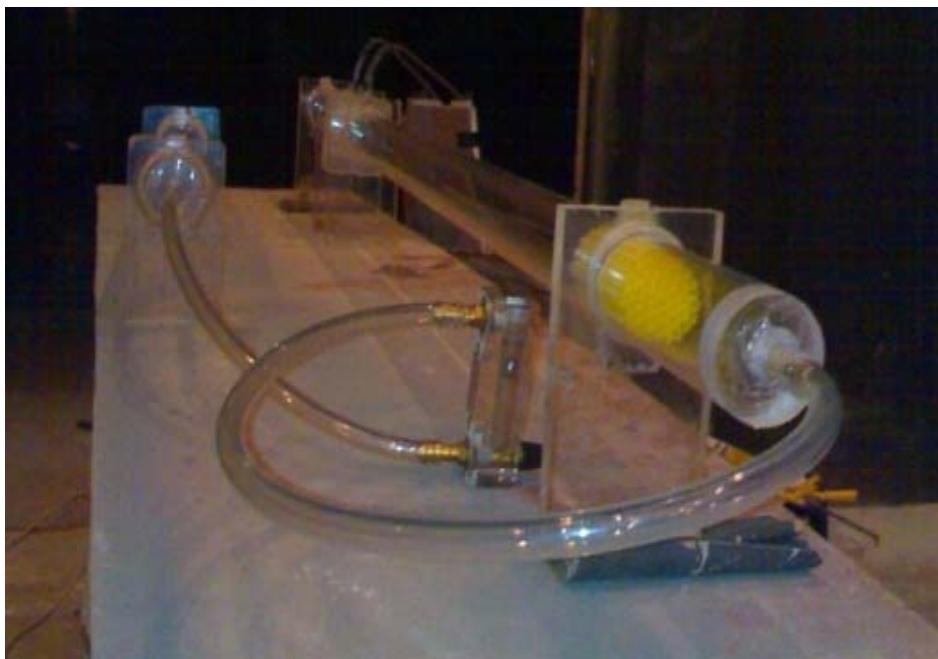
4.2.6.3 สเกลอ่านค่าระดับความสูงน้ำ ในการทดสอบนี้ใช้กระดาษกราฟ ความละเอียด 10 ช่องต่อ 1 เซนติเมตร โดยติดตั้งไว้กับแป้นด้านข้างชุดทดสอบ แล้วทำการตัดท่อเป็นรูปตัวยูพาดท่อด้านสเกล บนกระดาษกราฟและยึดให้แข็งแรง เติมน้ำเข้าไปในท่อรูปตัวยูพอสมควรให้สามารถอ่านระดับน้ำที่จะเพิ่ม ขึ้นหรือลดลงได้

4.2.7 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตารีมิเตอร์ลม จะทำการติดตั้งไว้ต่อจากชุดขยายปริมาตรลม เนื่องจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหลลมชนิดโรตารีมิเตอร์รุ่นนี้สามารถปรับค่าอัตราการไหลได้ ดังนั้นจึงใช้เป็นอุปกรณ์ในการกำหนดค่าอัตราการไหลเริ่มต้นให้กับระบบ ในการทดสอบจะทำการปรับค่าอัตราการไหลของลมจาก 50 ลิตรต่อนาที จนถึง 0 ลิตรต่อนาที โดยปรับลดลงครั้งละ 5 ลิตรต่อนาที

4.2.8 อุปกรณ์วัดอัตราเร็วของลมชนิดใบพัด มีลักษณะดังแสดงในภาพประกอบ 31 ทำการติดตั้งไว้ที่ปลายสุดของช่องลมซึ่งเป็นทางออกของระบบ โดยใช้พลาสติกใสทำเป็นรูปกรวยต่อเชื่อมระหว่างช่องลมกับอุปกรณ์วัด โดยทำให้พอดีกับขนาดของช่องเปิดของใบพัด

4.3 ขั้นตอนการทดสอบเทียบ

เมื่อนำอุปกรณ์ต่างๆมาประกอบเป็นระบบดังภาพประกอบ 31 แล้วทำการตรวจสอบความพร้อมและความแข็งแรงของอุปกรณ์โดยปรับให้วาล์วของโรตารี่เปิดจนสุด จากนั้นทำการเปิดลมจากถังให้ได้ความดัน 2 บาร์ แล้วทำการปรับอัตราการไหลของโรตารี่ลงทีละน้อยจนถึง 0 ลิตรต่อนาที เมื่อค่าความดันที่ถังอากาศไม่เปลี่ยนในเวลาประมาณ 5 นาทีแสดงว่าระบบไม่มีลมรั่ว มีความแข็งแรงพอและพร้อมทำการทดสอบ



ภาพประกอบ 31 ชุดทดสอบเทียบอุปกรณ์วัดอัตราเร็วลม

4.3.1 วิธีดำเนินการทดสอบเทียบ

หลังจากทดสอบการรั่วของท่อลม และทำการแก้ไข แล้วจึงดำเนินการทดสอบเทียบดังมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 4.3.1.1 ติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราเร็วลมและอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ ดังภาพประกอบ 4.7
- 4.3.1.2 เปิดวาล์วที่ถังลม ให้ลมเข้าสู่ชุดขยายปริมาตรลม
- 4.3.1.3 ปรับอัตราการไหลของลมด้วยโรตาริเตอร์ให้ได้อัตราการไหล 50 ลิตรต่อวินาที
- 4.3.1.4 อ่านค่าระดับความสูงของน้ำในमानोमीเตอร์จากกระดาศกราฟแล้วบันทึกไว้
- 4.3.1.5 อ่านค่าอัตราเร็วของลมจากอุปกรณ์วัดอัตราเร็วของลมชนิดใบพัด
- 4.3.1.6 ทำการทดสอบตามขั้นตอนที่ 3 ถึงขั้นตอนที่ 5 โดยปรับอัตราการไหลของลดลงจาก 50 ลิตรต่อวินาทีลงครึ่งละ 5 ลิตรต่อวินาทีจนถึง 0 ลิตรต่อวินาที
- 4.3.1.7 นำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบเพื่อหาระดับความน่าเชื่อถือ

4.3.2 การคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการไหลของลม

4.3.2.1 การหาค่าอัตราการไหลของลมจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดแผ่นออริฟิซจากการทดสอบเทียบได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดमानोमीเตอร์เพื่อวัดค่าความดันแตกต่าง ซึ่งแสดงผลออกมาในรูปของความสูงของระดับน้ำ และสามารถอ่านค่าได้จากกระดาศกราฟ ดังนั้นค่าอัตราการไหลของลมจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดแผ่นออริฟิซจึงหาค่าพารามิเตอร์ในรูปของความต่างของระดับน้ำในमानोमीเตอร์ ($Z_1 - Z_2$) จากสมการที่ (4.9) ทำการแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการจะได้

$$\begin{aligned}
 V_{Orifice} &= C_o \left[2g \frac{(Z_1 - Z_2)}{(1 - \beta^4)} \right]^{1/2} \\
 &= 0.5996 \left[2(9.81) \frac{(Z_1 - Z_2)}{(1 - (0.318)^4)} \right]^{1/2} \\
 V_{Orifice} &= 2.6696(Z_1 - Z_2)^{1/2} \quad (4.15)
 \end{aligned}$$

และ

$$A_{Orifice} = \frac{\pi D^2}{4}$$

แทนค่าได้

$$A_{Orifice} = \frac{\pi \times (0.014)^2}{4}$$

จาก

$$Q_{Orifice} = A_{Orifice} \times V_{Orifice}$$

จะได้

$$Q_{Orifice} = 0.00411 \times (Z_1 - Z_2)^{1/2} \quad (4.16)$$

4.3.2.2 การหาค่าอัตราการไหลของลมจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดโรตาริเตอร์

เนื่องจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตาริเตอร์อ่านค่าได้ในหน่วยลิตรต่อวินาที เมื่อต้องการนำค่าอัตราการไหลของลมที่วัดได้จากอุปกรณ์อื่นมาเปรียบเทียบกับกัน จึงต้องแปลงหน่วยให้เป็นหน่วยเดียวกัน ในการหาค่าอัตราการไหลของลมจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตาริเตอร์จึงเป็นการแปลงหน่วยจากลิตรต่อวินาทีเป็นลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

$$Q_{Rota} = Q_{Rota} \left(\frac{\text{ลิตร}}{\text{นาที}} \right) \times \frac{1 \text{ ลูกบาศก์เมตร}}{1000 \text{ ลิตร}} \times \frac{1 \text{ นาที}}{60 \text{ วินาที}}$$

$$Q_{Rota} = 1.60 \times 10^{-5} \times Q_{Rota} \left(\frac{\text{ลิตร}}{\text{นาที}} \right) \quad (4.17)$$

4.3.2.3 การหาค่าอัตราการไหลของลมจากอุปกรณ์วัดอัตราเร็วลมชนิดใบพัด

เนื่องจากอุปกรณ์วัดอัตราเร็วลมชนิดใบพัดเป็นอุปกรณ์ที่แสดงผลออกมาในรูปตัวเลข (Digital) และหน่วยที่วัดได้คือค่าของความเร็วเป็นเมตรต่อวินาที ดังนั้นเมื่อรู้ขนาดช่องรับลมของอุปกรณ์ก็สามารถหาค่าอัตราการไหลเพื่อนำไปเปรียบเทียบได้ จากอุปกรณ์วัดอัตราเร็วลมชนิดใบพัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องรับลม มีค่าเท่ากับ 4.20 เซนติเมตร

ดังนั้น

$$\begin{aligned} Q_{Turbine} &= A_{Turbine} \times V_{Turbine} \\ &= \frac{\pi D^2}{4} \times V_{Turbine} \\ &= \frac{\pi (0.042)^2}{4} \times V_{Turbine} \end{aligned}$$

$$Q_{Turbine} = 0.001385 \times V_{Turbine} \quad (4.18)$$

4.4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

จากการทดสอบได้ทำการทดสอบ โดยการปรับค่าอัตราการไหลของลมจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลม โดยเริ่มจาก 50 ลิตรต่อนาทีลดลงครั้งละ 5 ลิตรต่อนาที รวม 10 ค่าการทดสอบ เพื่อให้ข้อมูลมีค่าเที่ยงตรงมากขึ้นได้ทำการทดลองซ้ำสามรอบแล้วทำการเฉลี่ยค่าที่ได้ จากนั้นได้ทดสอบโดยแทนค่าที่ อัตราการไหลของลมเท่ากับ 50 ลิตรต่อนาที ที่อุปกรณ์วัดอัตราเร็วลมชนิดใบพัดได้ค่าเฉลี่ย 0.57 เมตรต่อวินาที และผลต่างระดับน้ำในมานอมิเตอร์มีค่า 5.7 เซนติเมตร ได้ผลตัวอย่างการคำนวณเปรียบเทียบดังนี้

$$\begin{aligned} Q_{Orifice} &= 0.00411(h_1 - h_2)^{1/2} = 0.00411(0.036)^{1/2} = 0.00078 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที} \\ Q_{Rota} &= 1.60 \times 10^{-5} Q_{Rota} = 1.60 \times 10^{-5} \times 50 = 0.00083 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที} \\ Q_{Turbine} &= A_{Turbine} \times V_{Turbine} = 0.001385 \times 0.57 = 0.00079 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

จากนั้นคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนจากสมการ

$$\text{ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \left| \frac{\text{ค่าข้อมูลที่ 1} - \text{ค่าข้อมูลที่ 2}}{\text{ค่าข้อมูลที่ 1}} \right| \times 100 \quad (4.19)$$

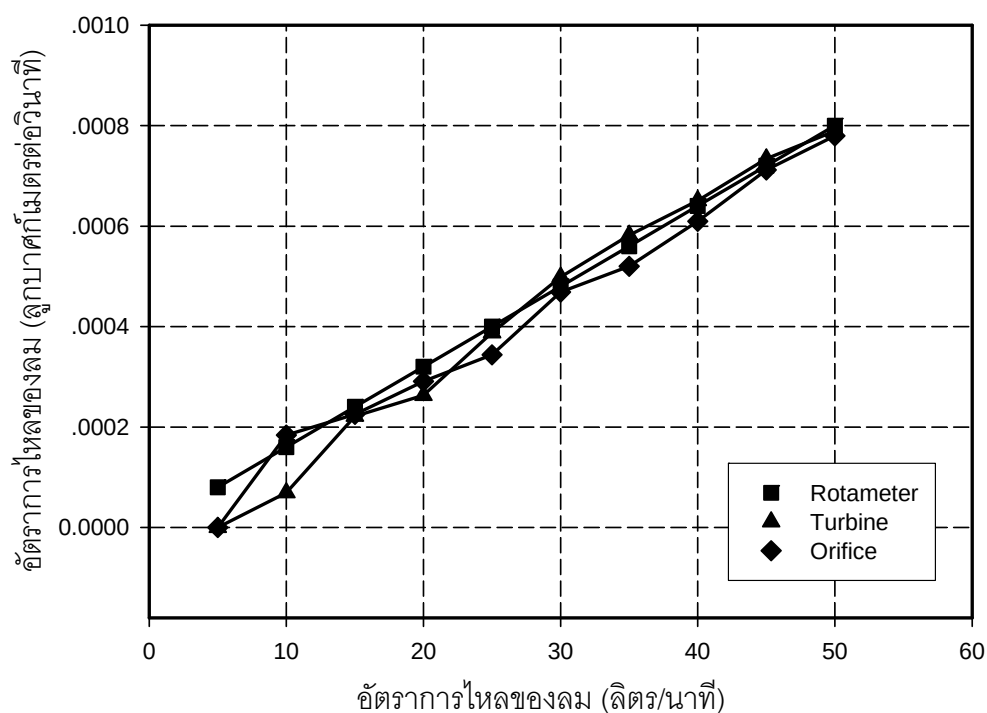
4.4.1 ผลการทดสอบเทียบ

เมื่อทำการทดสอบแล้วได้นำค่าอัตราการไหลของลมจากอุปกรณ์ทั้งสามชนิด มาปรับค่าให้ได้ค่าที่อยู่ในหน่วยเดียวกันคือ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีเพื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบ ค่าที่ได้บันทึกดังแสดงผลในตาราง 4

จากตารางจะเห็นว่าค่าอัตราการไหลของลมที่วัดโดยอุปกรณ์วัดอัตราเร็วลมชนิดใบพัด อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตาริเตอร์ และอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดแผ่นอริฟิซ ให้ค่าอัตราการไหลของลมที่ใกล้เคียงกัน จากค่าความคลาดเคลื่อนแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์วัดอัตราเร็วลมชนิดใบพัดให้ค่าอัตราการไหลของลมช่วงแรกมีความคลาดเคลื่อนกับอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตาริเตอร์มาก แต่ในช่วงที่ค่าอัตราการไหลของลมมากขึ้น อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดใบพัดและอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตาริเตอร์มีค่าใกล้เคียงกันมาก และค่าที่ได้ใกล้เคียงกว่าอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดแผ่นอริฟิซด้วย

ตาราง 4 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหล จากอุปกรณ์ทั้งสามชนิด

โรตاميเตอร์ (ลูกบาศก์เมตร ต่อวินาที)	ใบพัด (ลูกบาศก์เมตร ต่อวินาที)	ความคลาดเคลื่อน (เปอร์เซ็นต์)	ออร์ฟิช (ลูกบาศก์เมตร ต่อวินาที)	ความคลาด เคลื่อน (เปอร์เซ็นต์)
0.00016	0.00007	56.3	0.00018	12.5
0.00024	0.00015	37.5	0.00023	4.2
0.00032	0.00026	18.8	0.00029	9.4
0.0004	0.00039	2.5	0.00034	15.0
0.00048	0.0005	4.2	0.00047	2.1
0.00056	0.00058	3.6	0.00052	7.1
0.00064	0.00065	1.6	0.00061	4.7
0.00072	0.00073	1.4	0.00071	1.4
0.00083	0.00079	1.3	0.00078	2.5



ภาพประกอบ 32 ผลการสอบเทียบอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมสามชนิด

จากตารางจะเห็นว่าค่าอัตราการไหลของลมที่วัดโดยอุปกรณ์วัดอัตราเร็วลมชนิดใบพัด อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตารีเตอร์ และอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดแผ่นอริฟิซ ให้ค่าอัตราการไหลของลมที่ใกล้เคียงกัน จากค่าความคลาดเคลื่อนแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์วัดอัตราเร็วลมชนิดใบพัดให้ค่าอัตราการไหลของลมช่วงแรกมีความคลาดเคลื่อนกับอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตารีเตอร์มาก แต่ในช่วงที่ค่าอัตราการไหลของลมมากขึ้น อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดใบพัดและอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตารีเตอร์มีค่าใกล้เคียงกันมาก และค่าที่ได้ใกล้เคียงกว่าอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดแผ่นอริฟิซด้วย และเมื่อนำค่าอัตราการไหลของลมจากอุปกรณ์ทั้งสามชนิดมาทำการพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ จะได้ผลดังแสดงในภาพประกอบ 32

4.4.2 สรุปผลการสอบเทียบ

จากผลการทดสอบเทียบที่แสดงในรูปตารางและจากกราฟความสัมพันธ์เมื่อนำมาวิเคราะห์แล้วสามารถสรุปผลได้ดังนี้

4.4.2.1 ค่าอัตราการไหลของลมที่วัดได้จากอุปกรณ์ทั้งสามชนิดให้ค่าอัตราเร็วลมที่ใกล้เคียงกัน

4.4.2.2 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมที่มีความมากนั้น เป็นค่าที่ได้จากการสอบเทียบในช่วงค่าเริ่มต้นของการทดสอบเท่านั้น ในการทดสอบระบบไซฟอนค่าที่ทำการทดสอบจะมากกว่าค่าเริ่มต้นที่มีความคลาดเคลื่อนสูงอยู่แล้ว

4.4.2.3 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมทั้งสามชนิด โดยใช้ค่าอัตราการไหลของลมจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตารีเตอร์เป็นเกณฑ์ให้ค่าเฉลี่ยรวม 7.74 เปอร์เซ็นต์

4.4.2.4 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตารีเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบนี้มีความน่าเชื่อถือเพียงพอในการนำมาใช้งานทดสอบระบบไซฟอนได้

บทที่ 5

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

การทดสอบระบบไซฟอนที่มีการสอดท่อลมเพื่อทำการทดสอบผลของความลึกที่มีต่ออัตราการไหลของน้ำและลม เพื่อให้ได้อัตราการไหลของลมสูงที่สุด จากชุดระบบไซฟอนที่ได้ออกแบบสร้างโดยการทดสอบและการวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้

หัวข้อ 5.1 ผลการทดสอบระบบไซฟอนเมื่อยังไม่มีลมเจาะช่องลมที่ท่อไซฟอน

หัวข้อ 5.2 ผลการทดสอบระบบไซฟอนเมื่อมีการเจาะช่องลมขนาดต่างๆที่ด้านบนของท่อไซฟอนแต่ละขนาด

หัวข้อ 5.3 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมกับพารามิเตอร์ต่างๆ

หัวข้อ 5.4 พลังงานที่ได้จากระบบไซฟอน

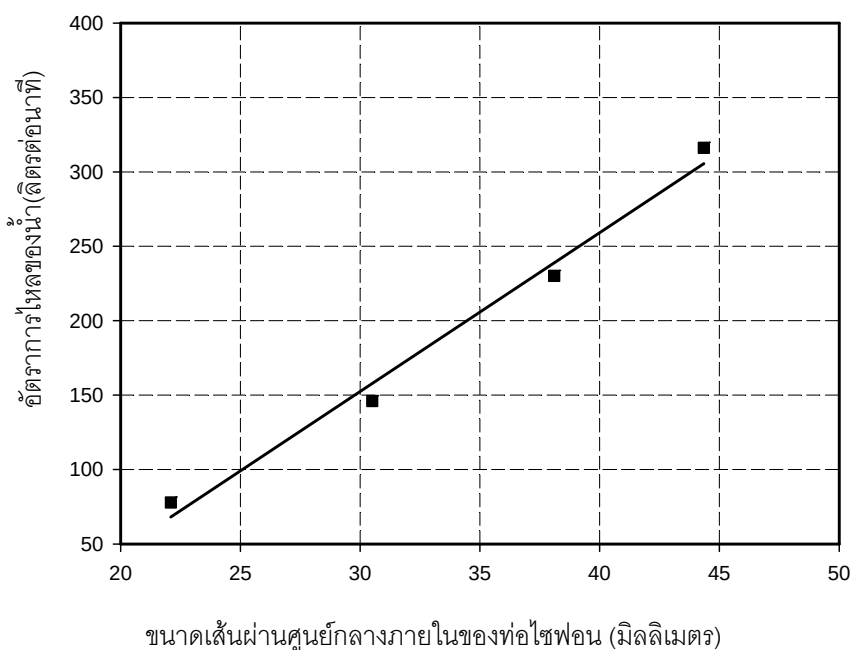
5.1 ผลการทดสอบระบบไซฟอนเมื่อยังไม่มีลมเจาะช่องลมที่ท่อไซฟอน

เมื่อทำการติดตั้งระบบเรียบร้อยแล้ว ได้เริ่มทำการทดสอบกับท่อระบบไซฟอนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแตกต่างกันจำนวน 4 ขนาด ดังนี้คือ 22.10, 30.51, 38.10 และ 44.35 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากการจับเวลาเทียบกับอุปกรณ์วัดปริมาตร ซึ่งสามารถนำมาหาค่าอัตราการไหลของน้ำ จากนั้นนำค่าอัตราการไหลของน้ำไปคำนวณหาความเร็วในการไหลของน้ำภายในท่อเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบ ผลการทดสอบได้แสดงในตาราง 5

ตาราง 5 ความเร็วเฉลี่ยในการไหลของน้ำจากท่อไซฟอนแต่ละขนาด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อไซฟอน (มิลลิเมตร)	เวลาที่ปริมาตร 20 ลิตร (วินาที)	อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/นาที่)	ความเร็วของน้ำ (เมตร/วินาที)
22.10	15.405	77.896	3.386
30.51	8.215	146.074	3.334
38.10	5.215	230.105	3.364
44.35	3.795	316.206	3.413

จากผลการทดสอบในตาราง 5 จะเห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไซฟอนที่ใหญ่ขึ้น จะทำให้อัตราการไหลของน้ำในไซฟอนมากขึ้น และเมื่อนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์จะ เห็นแนวโน้มอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่าความชันค่อนข้างเป็นเส้นตรงเมื่อเทียบกับขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อไซฟอนดังแสดงในภาพประกอบ 33



ภาพประกอบ 33 อัตราการไหลของน้ำที่ท่อไซฟอนขนาดต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่าความเร็วของน้ำจากระบบไซฟอนในแต่ละท่อ พบว่าถึงแม้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อต่างกัน แต่ค่าความเร็วของน้ำมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 3.374 เมตรต่อวินาทีและความแตกต่างเปรียบเทียบสูงสุดมีค่า 2.386 เปอร์เซ็นต์ จากการคำนวณทางทฤษฎีสำหรับการไหลภายในท่อผ่านระบบไซฟอน (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.) พบว่าค่าความเร็วเฉลี่ยของน้ำภายในท่อมีค่าเท่ากับ 3.671 เมตรต่อวินาที จากการเปรียบเทียบค่าความเร็วที่ได้จากการทดสอบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากการวัดและเครื่องมือวัดในการหาค่าอัตราการไหลและสมมุติฐานของการไหลแบบเต็มท่อ ซึ่งในระบบไซฟอนนั้นระบบสามารถทำงานได้โดยที่น้ำไม่จำเป็นต้องไหลเต็มท่อไซฟอนเสมอไป

5.2 ผลการทดสอบระบบไซฟอนเมื่อมีการเจาะช่องลมขนาดต่างๆที่ด้านบนของท่อไซฟอนแต่ละขนาด

การทดสอบนี้ได้ใช้ท่อไซฟอน 4 ขนาดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในดังนี้คือ 22.10, 30.51, 38.10 และ 44.35 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนช่องลมที่ทำการเจาะเป็นรูที่ด้านบนของท่อไซฟอนประกอบด้วย 4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดังนี้คือ 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยช่องลมที่เจาะจะอยู่ที่ผิวด้านบนของท่อไซฟอน ดังแสดงในภาพประกอบ 34



ภาพประกอบ 34 ลักษณะการเจาะรูที่ผิวของท่อไซฟอน

สำหรับการทดสอบในขั้นตอนนี้จะไม่มีการต่อท่อลมเข้าไปในท่อระบบไซฟอน ทั้งนี้เพื่อเป็นการทดสอบการทำงานของระบบไซฟอน โดยในการทดสอบระบบไซฟอนได้ใช้เทคนิคจากการเจาะรูขนาดต่างๆ ที่ต้องการที่ผิวท่อ จากนั้นจะทำการปิดรูที่เจาะทั้งหมดด้วยเทปกาว เมื่อระบบไซฟอนทำงานอย่างสมบูรณ์ จึงเปิดรูที่ผิวของท่อไซฟอนที่ได้เตรียมไว้ในแต่ละขนาดรูที่เจาะแล้ว จากนั้นจะสังเกตการทำงานของระบบไซฟอน หากระบบไซฟอนไม่หยุดการทำงานถึงแม้จะมีอัตราการไหลของน้ำน้อยเพียงใดก็จะถือว่าระบบไซฟอนนั้นสามารถทำงานได้ ผลการทดสอบการทำงานของท่อระบบไซฟอนในแต่ละกรณีดังแสดงในตาราง 6

ตาราง 6 ผลการทดสอบระบบไซฟอนด้วยการเจาะช่องลมที่ด้านบนของท่อไซฟอน

ขนาดท่อไซฟอน (มิลลิเมตร)	การทำงานของระบบไซฟอน			
	ขนาดช่องลมที่ด้านบนของท่อไซฟอน (มิลลิเมตร)			
	2.0	3.0	4.0	5.0
22.10	ทำงาน	ไม่ทำงาน	ไม่ทำงาน	ไม่ทำงาน
30.51	ทำงาน	ทำงาน	ไม่ทำงาน	ไม่ทำงาน
38.10	ทำงาน	ทำงาน	ทำงาน	ไม่ทำงาน
44.35	ทำงาน	ทำงาน	ทำงาน	ทำงาน

ในการทดสอบระบบไซฟอนได้เริ่มทำการทดสอบกับรูเจาะขนาดเล็กก่อน จากนั้นจึงทำการทดสอบกับรูเจาะที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จะเห็นได้ว่าที่ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22.10 มิลลิเมตร ระบบไซฟอนสามารถทำงานได้ที่ขนาดช่องลมไม่เกิน 2.0 มิลลิเมตร ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30.51 มิลลิเมตร ระบบไซฟอนสามารถทำงานได้ที่ขนาดช่องลมไม่เกิน 3.0 มิลลิเมตร ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 38.10 มิลลิเมตร ระบบไซฟอนสามารถทำงานได้ที่ขนาดช่องลมไม่เกิน 4.0 มิลลิเมตร และท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 44.35 มิลลิเมตร ระบบไซฟอนสามารถทำงานได้ที่ขนาดช่องลมไม่เกิน 5.0 มิลลิเมตร

จากข้อมูลที่ได้พบว่าระบบไซฟอนที่ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 44.35 มิลลิเมตรนั้นสามารถทำงานได้ที่ขนาดช่องลมที่เจาะไว้ ไม่เกิน 5.0 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าช่องลมที่เจาะนั้นมีขนาดเล็กมาก และการจะนำพลังงานลมในส่วนนี้ไปใช้ประโยชน์จะทำได้ยาก เพราะถึงแม้มีการเจาะช่องลมใหญ่กว่านี้ระบบไซฟอนก็จะหยุดการทำงาน จากสาเหตุดังกล่าวและข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในเบื้องต้น จึงได้ทำการออกแบบตำแหน่งการเจาะช่องลมและวิธีการเหนี่ยวนำลมโดยการต่อท่อลมลงตามแนวข้างของท่อระบบไซฟอน เพื่อให้ระบบไซฟอนมีโอกาสดูแลจะสามารถทำงานได้ที่ขนาดช่องเจาะที่ใหญ่ขึ้น และสามารถติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอัตราการไหลของลม เพื่อให้ได้พลังงานลมจากระบบไซฟอนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้

5.3 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมกับพารามิเตอร์ต่างๆ

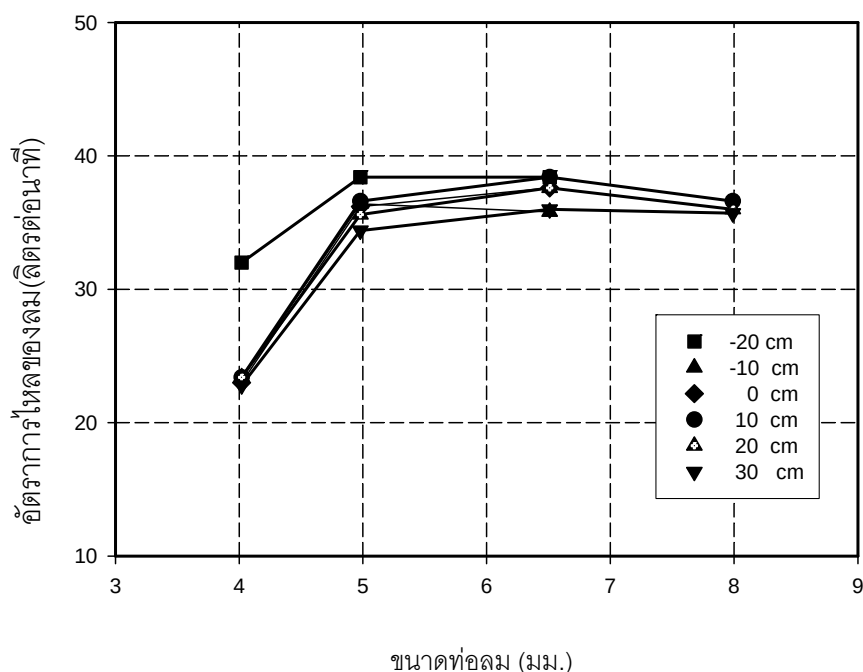
ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบระบบการทำงานของไซฟอน โดยการสอดท่อลมขนาดต่างๆ กัน ที่ระดับความลึกแตกต่างกัน โดยท่อลมจะถูกสวมกับรอยเจาะบนท่อไซฟอนที่อยู่บริเวณย่านกลางของท่อไซฟอนข้าง ระดับความลึกจะถูกอ้างอิงจากระดับอ้างอิง (Datum) ที่ใช้ระดับผิวน้ำเป็นแนวอ้างอิง โดยตำแหน่งที่อยู่สูงกว่าระดับอ้างอิงจะมีเครื่องหมายเป็นลบ และตำแหน่งที่อยู่ต่ำกว่าระดับอ้างอิงจะมีเครื่องหมายเป็นบวก สำหรับการทดสอบนี้ใช้ระดับความลึกด้วยกัน 6 ค่าประกอบด้วยความลึก (-20), (-10), (0), (10), (20) และ (30) เซนติเมตร

ในการทดสอบระบบไซฟอนนี้ได้บันทึกข้อมูลค่าอัตราการไหลของน้ำ ซึ่งใช้วิธีการตรวจวัดเทียบกับเวลาที่ใช้ จากนั้นทำการคำนวณเป็นอัตราการไหลของน้ำ ส่วนอัตราการไหลของลมนั้นสามารถวัดได้โดยตรงจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตาริเตอร์ที่ได้รับการสอบเทียบมาแล้ว และสามารถแปลงเป็นข้อมูลความเร็วของลมที่ถูกดูดเหินวนเข้ามาได้ ข้อมูลอัตราการไหลของน้ำและอัตราการไหลของลมได้แสดงไว้ดังในตารางในภาคผนวก ก. ค่าที่ได้จากตารางนำมาเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมกับพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบไซฟอน ซึ่งประกอบด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อไซฟอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อลม และตำแหน่งความลึกในการสอดท่อลม ดังแสดงการเปรียบเทียบและวิจารณ์ผลตามลำดับต่อไปนี้

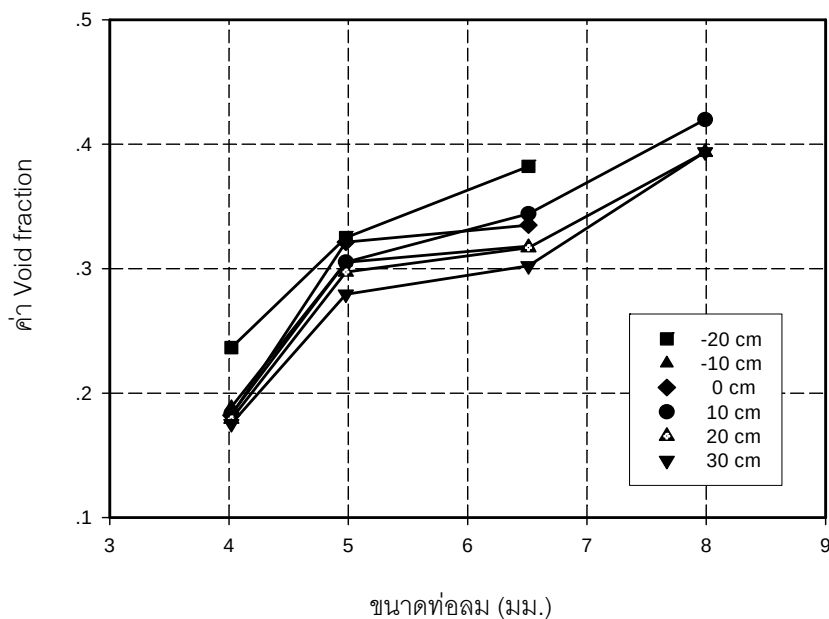
5.3.1 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมเมื่อเทียบกับขนาดท่อลมและระดับความลึกต่างกันที่ขนาดท่อไซฟอน 30.51 มิลลิเมตร

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบโดยพิจารณาเฉพาะท่อท่อไซฟอน 30.51 มิลลิเมตร เมื่อเทียบกับขนาดท่อลมที่ระดับความลึกต่างกันดังนี้ (-20), (-10), (0), (10), (20) และ (30) เซนติเมตรผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมกับขนาดท่อลมที่ใช้ แสดงดังภาพประกอบ 35 จากผลที่ได้พบว่าในช่วงที่ท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.02 มิลลิเมตรถึงท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.98 มิลลิเมตรนั้น อัตราการไหลของลมที่ทุกระดับความลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และในช่วงท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.98 มิลลิเมตรถึงท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6.51 มิลลิเมตรอัตราการไหลของลมมีค่าค่อนข้างคงที่ในทุกระดับความลึก และในช่วงท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.99 มิลลิเมตร ที่ค่าระดับความลึก (-20), (-10) และ (0) เซนติเมตรระบบไซฟอนไม่สามารถทำงานได้

ส่วนที่ระดับความลึก (10), (20), และ(30)เซนติเมตร ระบบไซฟอนยังสามารถทำงานได้เป็นปกติ เพียงแต่ค่าอัตราการไหลของลมลดลงเล็กน้อย จากข้อมูลดังกล่าวทำให้คาดได้ว่าน่าจะเกิดจากที่ระดับความลึกที่น้อยกว่า (0) เซนติเมตรเมื่อทดสอบกับท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ 7.99 มิลลิเมตร ระบบไซฟอนไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากท่อลมมีขนาดใหญ่เกินไป ประกอบกับค่าอัตราการเหี่ยวน้ำของน้ำในไซฟอนซึ่งเกิดจากเฮดของของเหลวมีความสูงมีค่าไม่เพียงพอที่เหี่ยวน้ำลมในท่อลมที่มีขนาดใหญ่ได้ แต่เพียงพอสำหรับท่อที่มีขนาดเล็กกว่า และที่ระดับความลึกมากกว่า (0) เซนติเมตร ระบบไซฟอนสามารถทำงานได้แต่ได้ค่าอัตราการไหลของลมที่ค่าน้อยลง เนื่องจากระบบ ไซฟอนพยายามเพียงเพื่อพุงตัวให้คงอยู่ได้ แต่ไม่ทำให้เกิดอัตราการไหลของลมเพิ่มขึ้น ซึ่งจากที่ได้ทำการทดสอบระบบไซฟอนที่ผ่านมานั้น มีบางกรณีที่ไซฟอนไม่หยุดทำงาน อัตราการไหลของน้ำจากท่อไซฟอนไหลน้อยมาก แต่ก็สามารถวัดค่าได้แต่อัตราการไหลของลมนั้นไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากข้อจำกัดในเครื่องมือวัด จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ที่ท่อไซฟอนขนาด 30.51 มิลลิเมตรนั้น ท่อลมขนาดที่เล็กกว่าสามารถทำงานได้ทุกระดับความลึกที่ทดสอบสำหรับท่อลมขนาด 7.99 มิลลิเมตรนั้นทำงานที่ค่าความลึกต่ำกว่าระดับอ้างอิงเท่านั้น



ภาพประกอบ 35 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมเมื่อเทียบกับขนาดท่อลมที่ระดับความลึกต่างกัน ที่ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30.51 มิลลิเมตร

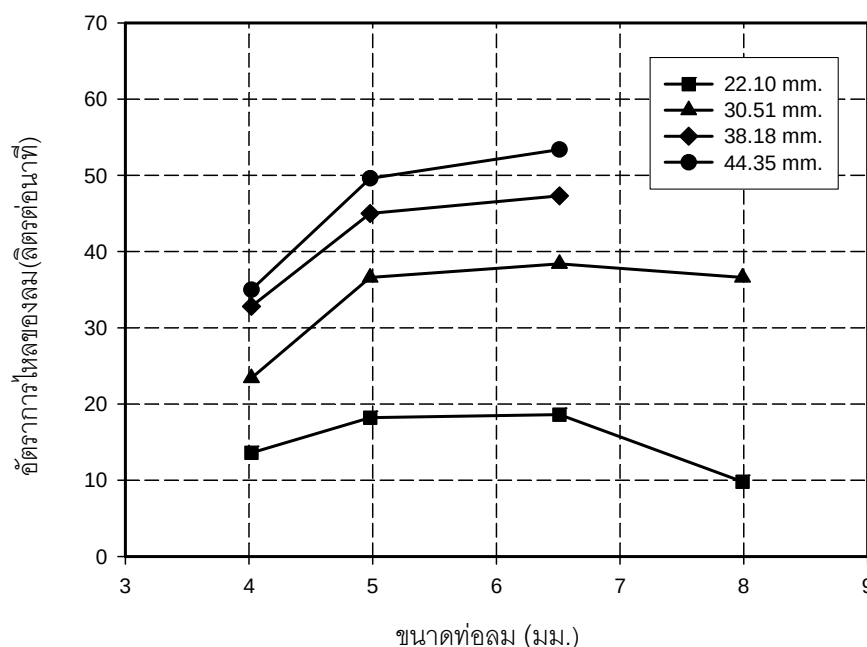


ภาพประกอบ 36 ผลการเปรียบเทียบค่า Void fraction เมื่อเทียบกับขนาดท่อลมที่ระดับความลึกต่างกันที่ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30.51 มิลลิเมตร

เมื่อนำค่า Void fraction มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบขนาดท่อลมที่ระดับความลึกต่างกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 36 โดยพิจารณาที่ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30.5 มิลลิเมตรเช่นเดียวกัน จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบในช่วงที่ท่อลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.02 มิลลิเมตรถึง 4.98 มิลลิเมตรค่า Void fraction มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และช่วงที่ท่อลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจาก 4.98 มิลลิเมตรเพิ่มขึ้นถึง 6.51 มิลลิเมตรเป็นช่วงที่ค่า Void fraction มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อทำการทดสอบระบบไซฟอนที่ท่อลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเพิ่มขึ้นเป็น 7.99 มิลลิเมตร ค่า Void fraction สำหรับระดับความลึก(10), (20), และ(30) เซนติเมตร ยังคงมีค่าเพิ่มเล็กน้อย ส่วนที่ระดับความลึก(-20), (-10) และ (0) เซนติเมตรระบบไซฟอนไม่สามารถทำงานได้

จากข้อมูลดังกล่าวทำให้เห็นว่าที่ท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.99 มิลลิเมตรนั้น ถ้าไซฟอนสามารถทำงานได้จะได้ค่าสมรรถนะหรือ Void fraction ที่มีค่าสูงหรือไม่ก็หยุดการทำงานเลย ดังนั้นการสอดท่อลมให้ลึกเพิ่มขึ้นเป็นการสร้างโอกาสให้ระบบไซฟอนมีความสามารถในการทำงานที่มากขึ้น จากการทดสอบที่ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30.51 มิลลิเมตร พบว่าค่า Void fraction สูงสุดที่สามารถทำได้อยู่ที่ประมาณ 0.41 ที่ท่อลมขนาด 7.99 มิลลิเมตร ที่ระดับความลึก (10) เซนติเมตร

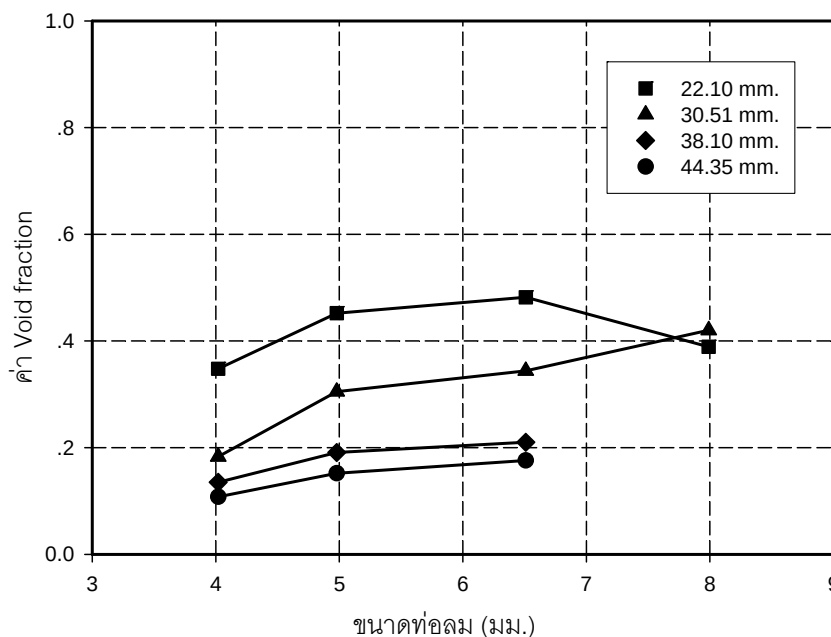
5.3.2 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมเมื่อเทียบกับขนาดท่อลมและขนาดท่อไซฟอนต่างกันที่ระดับความลึก 10 ซม.



ภาพประกอบ 37 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมเมื่อเทียบกับขนาดท่อลมที่ขนาดท่อไซฟอนต่างกันที่ระดับความลึก (10) เซนติเมตร

ผลการทดสอบในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมที่ระดับความลึก (10) เซนติเมตร โดยทำการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อลมที่ใช้กับท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22.10, 30.51, 38.18 และ 44.35 มิลลิเมตร ได้ผลการเปรียบเทียบดังแสดงในภาพประกอบ 37 พบว่าท่อลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.02 มิลลิเมตรถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.98 มิลลิเมตรนั้นที่ทุกขนาดท่อไซฟอนจะให้ค่าอัตราการไหลของลมเพิ่มขึ้น และช่วงที่ท่อลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.98 มิลลิเมตรถึง 6.51 มิลลิเมตร ค่าอัตราการไหลของลมมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยลง เมื่อพิจารณาที่ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22.10 มิลลิเมตร อัตราการไหลของลมค่อนข้างคงที่ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการไหลของลมที่ความลึกเดียวกันแปรผันตรงตามขนาดของท่อไซฟอน อัตราการเพิ่มของอัตราการไหลของลมมีค่าสูงที่ท่อไซฟอนขนาดเล็ก เมื่อท่อไซฟอนมีขนาดใหญ่ขึ้นอัตราการเพิ่มของอัตราการไหลของลมมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาที่ท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.99 มิลลิเมตร พบว่าท่อ

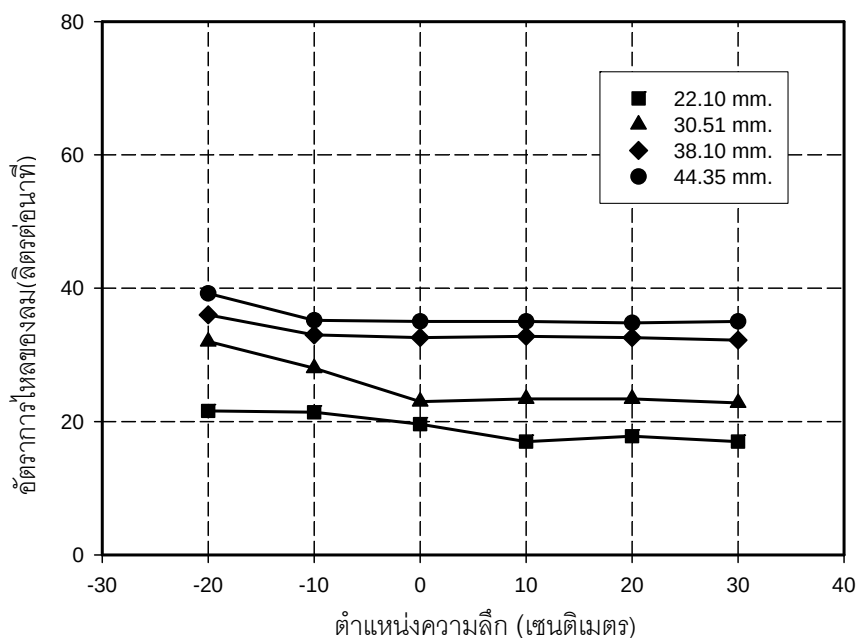
ไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22.10 มิลลิเมตร มีค่าลดลงอย่างมาก ส่วนอัตราการไหลของลมที่ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 38.18 มิลลิเมตรและ 44.35 มิลลิเมตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเกินความสามารถของเครื่องมือวัดที่มีอยู่



ภาพประกอบ 38 ผลการเปรียบเทียบค่า Void fraction เมื่อเทียบกับขนาดท่อลมของแต่ละท่อไซฟอนที่ตำแหน่งความลึก (10) เซนติเมตร

เมื่อนำค่า Void fraction มาทำการเปรียบเทียบกับขนาดท่อลมที่ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22.10, 30.51, 38.18 และ 44.35 มิลลิเมตร ได้ผลการเปรียบเทียบดังแสดงในภาพประกอบ 38 พบว่าที่ท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.02 มิลลิเมตรถึง 4.98 มิลลิเมตรค่า Void fraction มีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับทุกขนาดท่อไซฟอน อัตราการเพิ่มของ Void fraction เพิ่มขึ้นตามขนาดของท่อลม ยกเว้นที่กรณีท่อไซฟอนขนาด 22.10 มิลลิเมตร ที่ท่อลมขนาด 7.99 มิลลิเมตร ซึ่งพบว่าค่า Void fraction มีค่าลดลง ค่า Void fraction สูงสุดที่มีค่าประมาณ 0.48 ที่ท่อไซฟอนขนาด 22.10 มิลลิเมตรและท่อลมขนาด 6.51 มิลลิเมตร จากผลที่ได้พบว่าที่ท่อไซฟอนขนาดเล็กถ้าการเหนี่ยวนำของลมมีมากก็จะทำให้ค่า Void fraction มีค่าสูงตามอีกนัยหนึ่งก็คือ สำหรับความลึก (10) เซนติเมตรที่ท่อไซฟอนขนาด 22.10 มิลลิเมตรและท่อลมขนาด 6.51 มิลลิเมตร ค่า Void fraction สูงสุดที่สามารถทำได้คือ 0.48

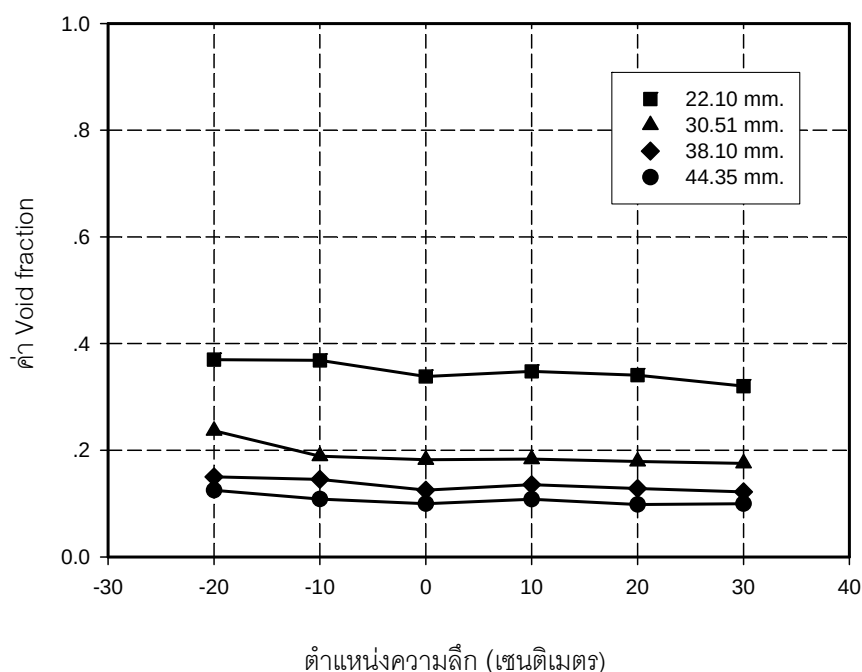
5.3.3 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมเมื่อเทียบกับระดับความลึกและขนาดท่อไซฟอนต่างกันที่ขนาดท่อลม 4.02 มม.



ภาพประกอบ 39 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมเมื่อเทียบกับระดับความลึกที่ขนาดท่อไซฟอนต่างกันที่ขนาดท่อลม 4.02 มม.

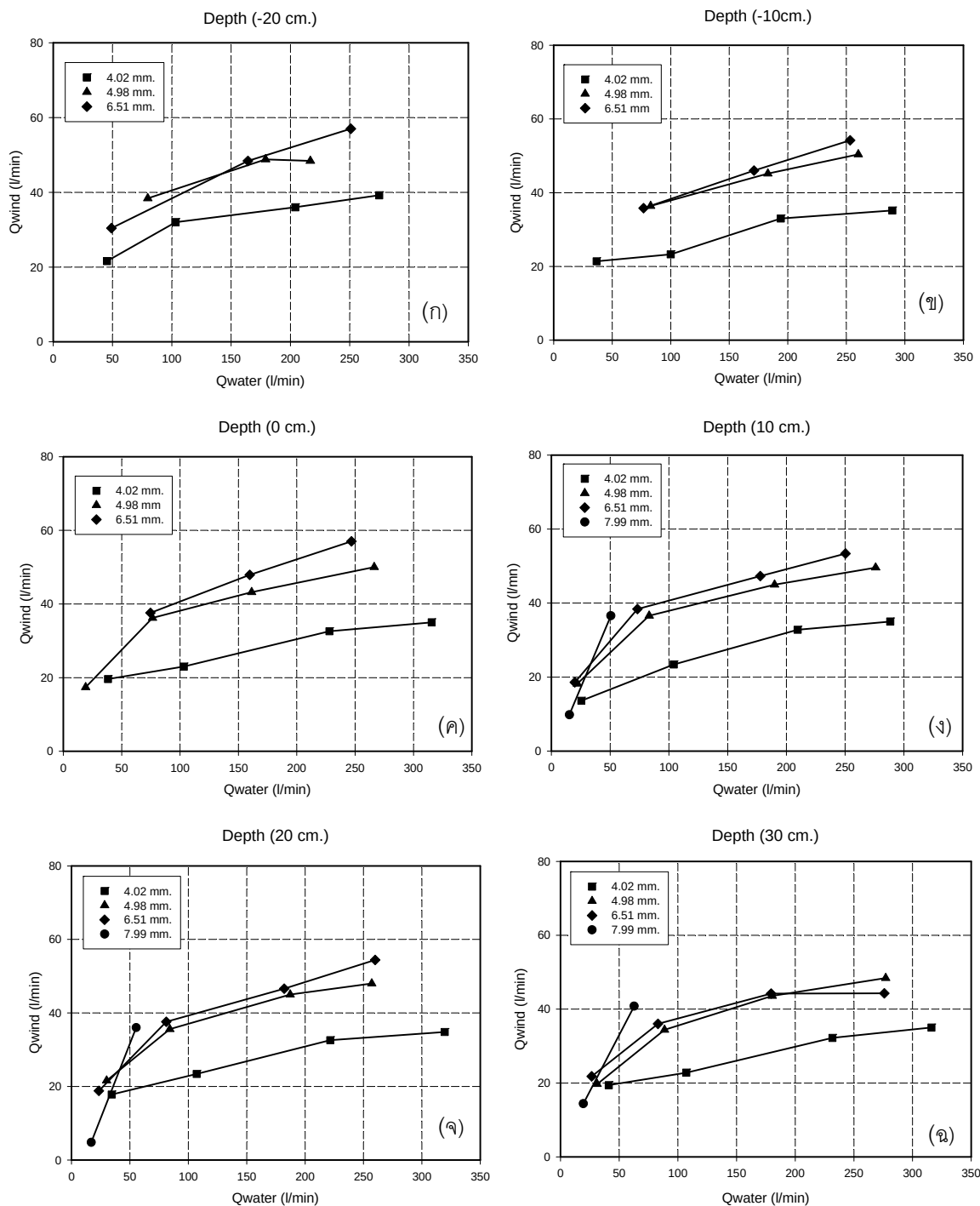
เมื่อพิจารณาที่ท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.02 มิลลิเมตร และเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมเมื่อเทียบกับระดับความลึกต่างๆ ที่ได้ทดสอบกับท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22.10, 30.51, 38.18 และ 44.35 มิลลิเมตร ได้ผลการเปรียบเทียบดังแสดงในภาพประกอบ 39 ที่ระดับความลึกที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการไหลของลมลดลง เมื่อถึงตำแหน่งความลึกประมาณค่าหนึ่ง (ระดับอ้างอิง) จะทำให้อัตราการไหลของลมมีค่าค่อนข้างคงที่และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับการทดสอบที่ทุกขนาดท่อไซฟอน จากผลที่ได้คาดว่าในช่วงระดับความลึกที่ (-20) เซนติเมตร ถึง (0) เซนติเมตร นั้นค่าความดันสุญญากาศ (Vacuum pressure) ที่เกิดขึ้นท่อไซฟอนจะมีผลในการเหนี่ยวนำลมในท่อลม ซึ่งเป็นปัจจัยเสริมนอกเหนือจากค่าความเร็วของน้ำในไซฟอน เมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกเป็น ที่ (-10) และ (0) เซนติเมตร ค่าความดันสุญญากาศก็จะเพิ่มขึ้นสู่ความดันบรรยากาศทำให้ค่าการเหนี่ยวนำลมในท่อลมมีค่าลดลง แต่ไซฟอนยังทำงานอยู่ได้เนื่องจากค่าความเร็วของน้ำในท่อไซฟอนเป็นปัจจัยหลักเดียวในการเหนี่ยวนำแทน

ผลการเปรียบเทียบค่า Void fraction กับความตำแหน่งความลึกที่ได้ทดสอบกับท่อไซฟอน ต่างกันที่ขนาดท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.02 มม. ได้ผลดังภาพประกอบ 40 โดยผลที่ได้ สอดคล้องกับการทดสอบที่ผ่านมาคือค่า Void fraction มีค่าสูงสำหรับท่อไซฟอนขนาดเล็ก ลักษณะ ของกราฟสอดคล้องกับผลที่ได้ในภาพประกอบ 39 คือที่ระดับความลึก (-20) เซนติเมตร ถึงระดับ ความลึก (0) เซนติเมตร ค่า Void fraction ของทุกขนาดท่อไซฟอนมีแนวโน้มลดลง และจากระดับ ความลึก (0) ถึง (30) เซนติเมตร ค่า Void fraction มีค่าค่อนข้างคงที่และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย แนวโน้มของอัตราการไหลของลมที่ลดลงเมื่อค่าความลึกมีค่ามากขึ้นส่วนหนึ่งน่าจะมาจากการ สูญเสีย (Head losses) ที่เกิดขึ้นภายในท่อลมมีค่ามากขึ้น เนื่องจากค่าความยาวของท่อลมมีค่ามาก ขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบแต่ละขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อไซฟอน จะเห็นได้ว่าท่อไซฟอนที่ ใหญ่ขึ้น ที่ตำแหน่งความลึกเดียวกันจะให้ค่า Void fraction ต่ำกว่าท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในที่เล็กกว่า



ภาพประกอบ 40 ผลการเปรียบเทียบค่า Void fraction เมื่อเทียบกับระดับความลึกที่ขนาดท่อไซฟอน ต่างกันที่ขนาดท่อลม 4.02 มม.

5.3.4 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของน้ำและขนาดท่อลมที่ความลึกต่างๆ

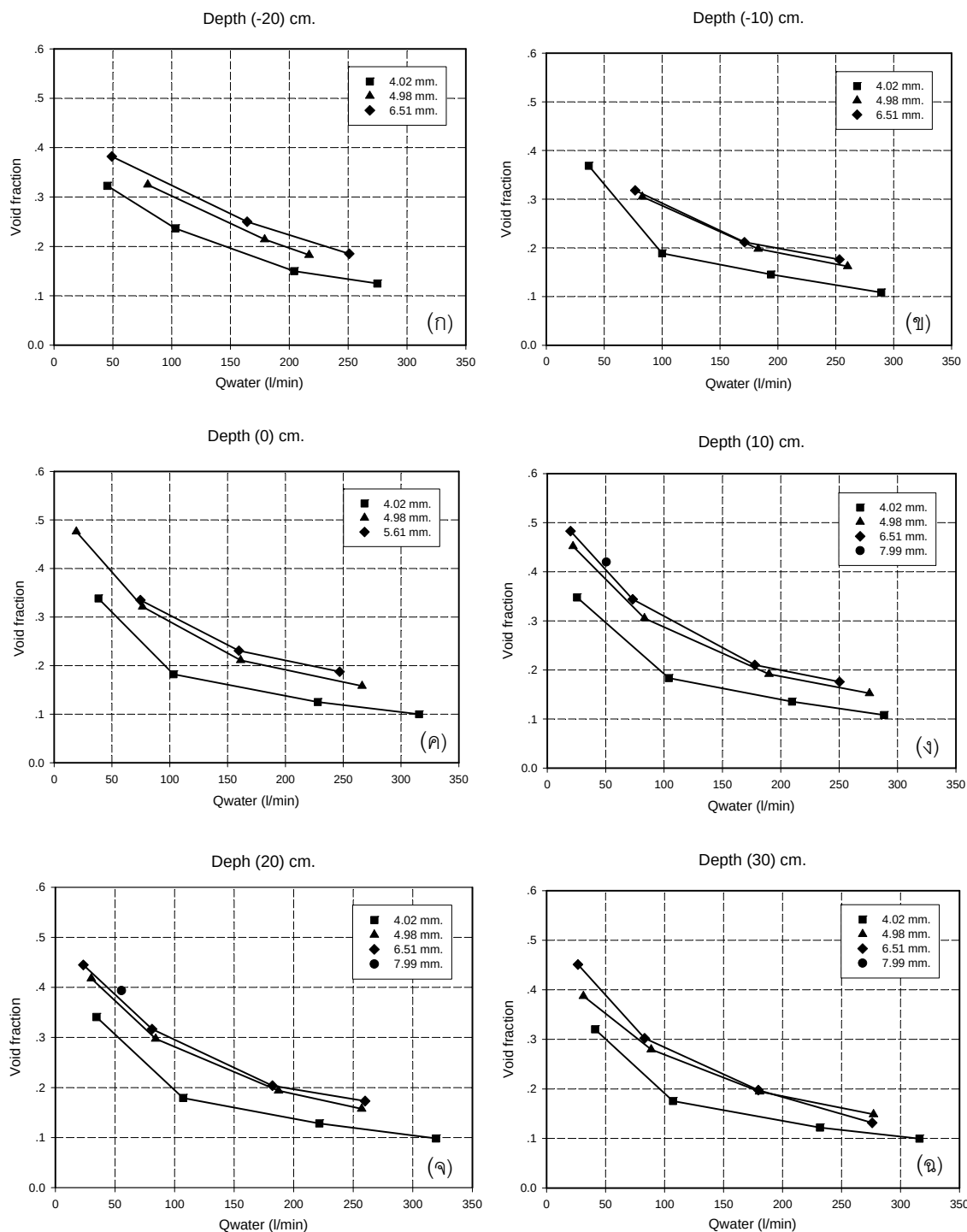


ภาพประกอบ 41 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของน้ำ และขนาดท่อลม ที่ระดับความลึกต่างๆ

ผลการทดสอบเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของน้ำที่ได้ทดสอบกับท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.02, 4.98, 6.51 และ 7.99 มิลลิเมตรที่ระดับความลึกต่างกันดังนี้ (-20), (-10), (0), (10), (20) และ (30) เซนติเมตร แสดงในภาพประกอบ 41 จากภาพประกอบ 41 (ค), (ง), (จ) และ (ฉ) ที่ทำการทดสอบที่ค่าความลึกต่ำหรือเท่ากับระดับอ้างอิงพบว่าทุกขนาดของระดับความลึกและทุกขนาดของท่อลม อัตราการไหลของลมนั้นแปรผันกับอัตราการไหลของน้ำ โดยลักษณะของกราฟมีแนวโน้มที่เหมือนกันคือมีการเพิ่มในอัตราที่สูงหรือมีค่าความชันมาก เมื่อทำการเพิ่มค่าอัตราการไหลของน้ำค่าความชันก็จะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าบางกรณีนั้นอัตราการไหลของลมที่ถูกเหนี่ยวนำโดยอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่จุดสูงสุดแล้วดังเช่นกรณีที่มีความลึก (30) เซนติเมตรที่ขนาดท่อลม 6.51 มิลลิเมตรนั้นพบว่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของลมต่ออัตราการไหลของน้ำอยู่สูงสุดที่ประมาณ 0.243 เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำมากกว่านี้พบว่าอัตราการไหลของลมจะลดลง

เมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราการไหลของน้ำที่เท่ากัน ส่วนมากแล้วพบว่าท่อลมที่มีขนาดใหญ่กว่าสามารถถูกเหนี่ยวนำให้เกิดอัตราการไหลของลมได้มากกว่าท่อลมขนาดเล็ก หากพิจารณาเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลของลมในท่อลมเดียวกันที่ระดับความลึกเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้อัตราการไหลของลมน้อยลงทั้งนี้น่าจะเป็นเพราะว่าที่ระดับที่สูงกว่าการเหนี่ยวนำการไหลเกิดจากปัจจัยของสภาวะการเป็นสุญญากาศและค่าอัตราการไหลภายในท่อไซฟอน จากภาพประกอบ 41 ยังพบว่าผลการทดสอบกับท่อลมขนาด 7.99 มิลลิเมตรนั้นแทบไม่ปรากฏในกราฟ ทั้งนี้เป็นผลมาจากอัตราการไหลของลมที่เกิดขึ้นที่มีค่าสูงเกินกว่าเครื่องมือวัดที่ใช้อยู่ จึงไม่สามารถทำการวัดค่าได้

เมื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาเขียนเป็นกราฟเปรียบเทียบค่า Void fraction กับอัตราการไหลของน้ำที่ท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.02, 4.98, 6.51 และ 7.99 มิลลิเมตรที่ระดับความลึก (-20), (-10), (0), (10), (20) และ (30) เซนติเมตรได้ผลดังแสดงในภาพประกอบ 5.10 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่า Void fraction มีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกันในทุกกรณีการศึกษา ซึ่งพบว่าค่า Void fraction ที่สูงสุดจากการทดสอบทุกสภาวะอยู่ที่ประมาณ 0.48 ดังในภาพประกอบ 42 (ง) ที่ระดับความลึก (10) เซนติเมตร และค่า Void fraction ต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 0.1



ภาพประกอบ 42 ผลการเปรียบเทียบค่า Void fraction กับอัตราการไหลของน้ำ และขนาดท่อลม
ที่ระดับความลึกต่างๆ

จากผลที่ได้จากภาพประกอบ 41 และ 42 เปรียบเทียบกับอัตราการไหลของน้ำพบว่า ลักษณะของกราฟที่ได้จะสวนทางกัน โดยอัตราการไหลของลมจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ แต่ในทางตรงกันข้าม ค่า Void fraction มีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ ทั้งนี้เป็นเพราะแนวทางที่พิจารณาหรือเปรียบเทียบนั้นต่างกันกล่าวคือ ประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำ $\left(\frac{Q_{wind}}{Q_{water}} \right)$ พบว่าเป็นการวัดประสิทธิภาพโดยเปรียบเทียบในเชิงปริมาณ ซึ่งจะพบว่าท่อขนาดที่ใหญ่กว่าซึ่งมีอัตราการไหลของน้ำที่สูงกว่าก็จะมีประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำที่สูงกว่า ถ้าพิจารณาในแง่ Void fraction พบว่าท่อขนาดเล็กจะมีค่า Void fraction ที่สูงทั้งนี้เนื่องจากนิยามของ Void fraction เอง ค่าอัตราการไหลรวมทั้งหมดยกเว้นแต่ปริมาณลมที่เหนี่ยวนำได้มีค่ามาก ค่า Void fraction ก็สูง เปรียบเสมือนกับการใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่าและประสิทธิภาพสูงสุดของอุปกรณ์ ดังนั้นในการออกแบบระบบไซฟอนควรคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย

5.4 พลังงานที่ได้จากระบบไซฟอน

พิจารณาที่ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22.10 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่า Void fraction ของระบบไซฟอนสูงสุดเท่ากับ 0.48 โดยวัดที่ตำแหน่งความลึก (-20) เซนติเมตร จากท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6.51 มิลลิเมตร ให้ค่าอัตราการไหลของลมเท่ากับ 38.42 ลิตรต่อวินาที เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าพลังงานจะได้ดังนี้

อัตราการไหลของลม	$Q = 38.4$	ลิตรต่อวินาที
	$Q = 6.4 \times 10^{-4}$	ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
พื้นที่หน้าตัดท่อลม	$A = 3.32 \times 10^{-5}$	ตารางเมตร
ดังนั้นค่าความเร็วภายในท่อลม	$V = 19.27$	เมตรต่อวินาที

จากสมการการคำนวณหาค่ากำลัง กำหนดให้ P_{wind} เป็นกำลังที่เกิดจากพลังงานจลน์จะได้

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3$$

เมื่อ V เป็นปริมาณของความเร็วภายในท่อลม

ρ เป็นความหนาแน่นของอากาศกำหนดให้มีค่า 1.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

แทนค่าลงในสมการการคำนวณกำลังจะได้

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \times 1.22 \times 0.0000332 \times (19.27)^3$$

$$P_{wind} = 0.14 \text{ วัตต์}$$

จะเห็นว่าพลังงานที่ได้จากระบบไซฟอนที่ได้มานั้นมีค่าไม่มากนัก แต่หากมีการพัฒนาระบบให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มจำนวนท่อของระบบไซฟอนขึ้นมา โดยมีการต่อระบบไซฟอนเป็นชุดตลอดความยาวของฝายน้ำล้น จะทำให้ได้พลังงานปริมาณมากเพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ได้ อนึ่งพลังงานจากน้ำเป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่นับว่าเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดที่สุดไม่ก่อให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม และแหล่งพลังงานน้ำจากฝายเป็นพลังงานที่หากไม่นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์พลังงานนั้นก็อาจจะเสียเปล่าไป สำหรับระบบไซฟอนนั้นเป็นการลงทุนที่ไม่มาก ระบบสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย หากเทียบกำลังที่ได้รับกับการลงทุนแล้วจะมีความคุ้มค่าในระดับหนึ่ง

บทที่ 6

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา ออกแบบ และทดสอบระบบไซฟอนที่ได้สร้างขึ้น โดยระบบไซฟอนที่ทำการทดสอบมีค่าเฮดความสูง 3.78 เมตร ซึ่งเป็นค่าความสูงที่จำลองจากระดับความสูงของฝายน้ำขนาดเล็ก โดยได้ดำเนินการทดสอบกับท่อไซฟอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดังนี้คือ 22.10, 30.51, 38.10 และ 44.35 มิลลิเมตร ตามลำดับ และได้มีการสอดท่อลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.02, 4.98, 6.51 และ 7.99 มิลลิเมตร เข้าไปตามแนวกลางของท่อไซฟอนที่ระดับความลึกต่าง ๆ กัน 6 ตำแหน่งคือที่ความลึก (-20), (-10), (0), (10), (20) และ (30) เซนติเมตร เพื่อทำการศึกษาการเหนี่ยวนำของกระแสลมผ่านท่อลม โดยค่าที่ได้จากทดสอบระบบไซฟอนได้นำมาทำการวิเคราะห์เพื่อให้ทราบถึงสมรรถนะของอุปกรณ์ เพื่อเป็นแนวทางที่จะได้นำพลังงานจากระบบไซฟอนนี้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป

6.1 สรุปผลการทดสอบ

ในการทดสอบระบบไซฟอนนี้ เป็นแนวความคิดที่จะนำเอาพลังงานจลน์จากการไหลของลมภายในท่อลมที่ถูกเหนี่ยวนำโดยการไหลของน้ำในท่อไซฟอนมาใช้ประโยชน์ ค่าอัตราการไหลของลมจึงเป็นค่าที่ต้องการพิจารณาเป็นพิเศษ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบนี้ประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไซฟอน (อัตราการไหลของน้ำ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลม และตำแหน่งความลึกในการสอดท่อลม ซึ่งจากการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูลสรุปได้ดังนี้

6.1.1 ผลการทดสอบที่ท่อไซฟอนขนาดเท่ากันที่ 30.51 มิลลิเมตรพบว่าขนาดท่อลมที่ใหญ่กว่าสามารถให้อัตราการไหลของลมที่มากกว่า เนื่องจากอัตราการไหลของลมจะแปรผันตามขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อลม และที่ระดับความลึกที่สูงกว่าระดับอ้างอิงจะให้อัตราการไหลของลมที่สูง เนื่องจากที่ระดับความลึกที่สูงนี้จะมีความเป็นสุญญากาศ (Vacuum) ที่สูงส่งผลให้เกิดแรงดูดมากภายในท่อลม สำหรับค่า Void fraction นั้นที่ระดับความลึกเหนือจุดอ้างอิงจะให้ค่า Void fraction ที่สูงกว่า และที่ท่อลมขนาดใหญ่กว่าก็จะให้ค่า Void fraction ที่สูงกว่าเช่นกัน

6.1.2 ผลการทดสอบที่ระดับความลึก (10) เซนติเมตร พบว่าขนาดท่อลมที่ใหญ่ขึ้นจะทำให้อัตราการไหลของลมมากขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าหากท่อลมมีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้อัตราการไหลของลมลดลงอาจถึงระดับที่ระบบไซฟอนหยุดการทำงานได้ และที่ท่อไซฟอนขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้อัตราการไหลของลมมากขึ้นด้วยเนื่องจากการไหลของลมเกิดจากการเหนี่ยวนำของอัตราการไหลของน้ำที่สูงขึ้น สำหรับค่า Void fraction ที่ระดับความลึก (10) เซนติเมตรนี้พบว่าท่อลมขนาดใหญ่ขึ้นจะให้ค่า Void

fraction มากขึ้น ท่อลมที่มีขนาดใหญ่เกินไปทำให้ค่า Void fraction ลดลงได้ จากการทดสอบค่า Void fraction สูงที่สุดที่ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22.10 มิลลิเมตร ได้จากท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6.51 มิลลิเมตร มีค่าเป็น 0.48

6.1.3 ผลการทดสอบที่ขนาดท่อลมที่เท่ากันที่ 4.02 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าที่ความลึกเหนือระดับอ้างอิงมากที่สุดเป็นตำแหน่งที่ให้ค่าอัตราการไหลของลมมากที่สุด และเมื่อใช้ท่อไซฟอนขนาดใหญ่ขึ้นจะให้ค่าอัตราการไหลของลมมากขึ้นด้วยสำหรับค่า Void fraction นั้นให้ผลในทำนองเดียวกับอัตราการไหลของลม

6.1.4 เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการไหลของลมกับอัตราการไหลของน้ำที่ใช้กับท่อลมและระดับความลึกต่างๆ สรุปได้ว่าอัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดอัตราการไหลของลมเพิ่มขึ้น ซึ่งจะตรงกันข้ามกับค่า Void fraction ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นค่า Void fraction จะลดลงทั้งนี้เป็นเพราะการพิจารณาค่า Void fraction นั้นเป็นการพิจารณาการใช้ประโยชน์จากระบบไซฟอนให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดและคุ้มค่าที่สุด จึงเหมาะสมเป็นตัวแปรที่ใช้ในการพิจารณาพารามิเตอร์ในระบบไซฟอน

6.1.5 สำหรับกำลังในรูปของการไหลของลมที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของการไหลของน้ำในท่อไซฟอนนั้น จากการทดสอบที่ท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22.10 มิลลิเมตรกับท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6.51 มิลลิเมตรได้ค่ากำลังจากการไหลของลมเท่ากับ 0.14 วัตต์ ซึ่งถ้าหากใช้ท่อไซฟอนขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ได้พลังงานลมที่มากขึ้น และเมื่อเพิ่มจำนวนท่อไซฟอนต่อเป็นอนุกรมหลายๆ ชุดจะทำให้ได้พลังงานลมในปริมาณที่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานได้

6.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย

การทดสอบระบบไซฟอนในครั้งนี้พบว่ายังมีข้อจำกัดในเครื่องมือที่ใช้การวัดอัตราการไหลของลม เนื่องจากค่าอัตราการไหลของลมบางเงื่อนไขเกินความสามารถของเครื่องมือวัด รวมถึงความละเอียดของการวัดที่ค่าอัตราการไหลต่ำดังนั้นเครื่องมือวัดที่ใช้ควรได้รับการพิจารณา การทดสอบในงานวิจัยนี้ได้จำลองเฉพาะที่ค่าเสดความสูงเพียงค่าเดียว จากการคำนวณพบว่าค่าเสดความสูงนี้ส่งผลต่อความเร็วในท่อไซฟอน รวมถึงอัตราการไหลของน้ำในท่อไซฟอนด้วย จึงเป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่ต้องศึกษาต่อไปในอนาคต นอกจากนี้จากผลการทดสอบที่ผ่านมาพบว่าควรเพิ่มขนาดท่อลมให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อทดสอบกับท่อไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ใหญ่เพื่อให้ได้อัตราการไหลของลมที่สูงขึ้น รวมถึงระดับความลึกของการสอดท่อลมที่มากขึ้น

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

1. ทวีช จิตรสมบูรณ์. *กลศาสตร์ของไหล*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ทีโอป. 2547.
2. ทวีป ชัยสมภพ; ศุภชาติ จงไพบูลย์วัฒนะ; และจักรี คุปต์จักริบุญญ. *การประเมินเทคโนโลยีของโครงการพัฒนาพลังงานน้ำขนาดเล็กในประเทศที่กำลังพัฒนาและในประเทศที่พัฒนาแล้ว*. รายงานการวิจัย. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2549.
3. ประพนธ์ วงษ์ท่าเรือ. *โครงการไฟฟ้าพลังน้ำระดับหมู่บ้าน: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน* กรุงเทพฯ. 2546.
4. สุนันท์ ศรีณนิตย. *กลศาสตร์ของไหล*. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2545.
5. British Standard Commission. Measurement of fluid flow in closed conduits: part1. Pressure differential device, BS1042:section 1.1, Iso:5167-1, England. 1991.
6. European Commission. Energy for the Future: *Renewable Sources of Energy*,. White Paper for a Community Strategy and Action Plan, COM (97) 599 final, Brussels. 1997.
7. White Frank, M. Fluid Mechanics. *Third Edition*. New York: McGraw-Hill. 1996.
8. French, M.J.; & M.B. Widden. *The exploitation of low-head hydropower by pressure interchange with air using siphons*. Proc Instn Mech Engrs, 215 part A, 223-230. 2001.
9. Hasan, A R. Void fraction in bubbly and slug flow in downward two-phase flow in vertical and inclined wellbores., Paper SPE 26522, Society of Petroleum Engineers, Inc., 1993.
10. M.B. Widden, Prosser, M.J. *The hydraulic design of pump sumps and intakes*. Hydromechanics Research Association, Cranfield, UK, July 1977. ISBN 0-86017-027-6 World Renewable Energy Congress (WREC 2005) Editors M. S. Imbabi and C. P. Mitchell (C) 2005 Elsevier Ltd. All rights reserved 176. 1999.
11. Paish Oliver. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 6: issue 6 . Cranfield, UK. 2002.
12. Wallis, G.B. *One-dimensional two-phase flow*. New York: McGraw-Hill. 1969.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบระบบไซฟอน

ตาราง 7 ผลการทดสอบระบบไซฟอนที่แต่ละความลึกในการสอดท่อลมเทียบกับ
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อไซฟอน เมื่อใช้ท่อลมขนาด 4.02 มิลลิเมตร

ขนาด ท่อไซฟอน (มิลลิเมตร)	อัตราการไหล (ลิตร/นาที่)											
	ระดับความลึกในการสอดท่อลม (เซนติเมตร)											
	-20		-10		0		10		20		30	
	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ
22.10	21.6	45.3	21.4	36.7	19.6	38.3	13.6	25.5	17.8	34.4	19.4	41.2
30.51	32.0	103.3	23.3	100.1	23.0	103.3	23.4	104.2	23.4	107.2	22.8	107.1
38.10	36.0	204.2	33.0	194.0	32.6	228.0	32.8	209.6	32.6	221.6	32.2	231.7
44.35	39.2	274.9	35.2	289.3	35.0	315.6	35.0	288.5	34.8	319.5	35.0	316.1

ตาราง 8 ผลการทดสอบระบบไซฟอนที่แต่ละความลึกในการสอดท่อลมเทียบกับ
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อไซฟอน เมื่อใช้ท่อลมขนาด 4.98 มิลลิเมตร

ขนาด ท่อไซฟอน (มิลลิเมตร)	อัตราการไหล (ลิตร/นาที่)											
	ระดับความลึกในการสอดท่อลม (เซนติเมตร)											
	-20		-10		0		10		20		30	
	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ
22.10	-	-	-	-	17.4	19.15	18.2	22.07	21.6	30.1	19.7	31.16
30.51	38.4	79.79	36.4	82.93	36.2	76.45	36.6	83.28	35.6	84.14	34.4	88.68
38.10	48.8	179.1	45.2	183	43.2	161.4	45	189.9	45	187.3	43.6	180.5
44.35	48.4	216.8	50.4	260.3	50	266.3	49.6	276	48	257.1	48.4	277.1

ตาราง 9 ผลการทดสอบระบบไซฟอนที่แต่ละความลึกในการสอดท่อลมเทียบกับ
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อไซฟอน เมื่อใช้ท่อลมขนาด 6.51 มิลลิเมตร

ขนาด ท่อไซฟอน (มิลลิเมตร)	อัตราการไหล (ลิตร/นาทึ)											
	ระดับความลึกในการสอดท่อลม (เซนติเมตร)											
	-20		-10		0		10		20		30	
	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ
22.10	-	-	-	-	17.4	19.2	18.2	22.1	21.6	30.1	19.7	31.2
30.51	38.4	79.8	36.4	82.9	36.2	76.5	36.6	83.3	35.6	84.1	34.4	88.7
38.10	48.8	179	45.2	183	43.2	161	45	190	45	187	43.6	181
44.35	48.4	217	50.4	260	50	266	49.6	276	48	257	48.4	277

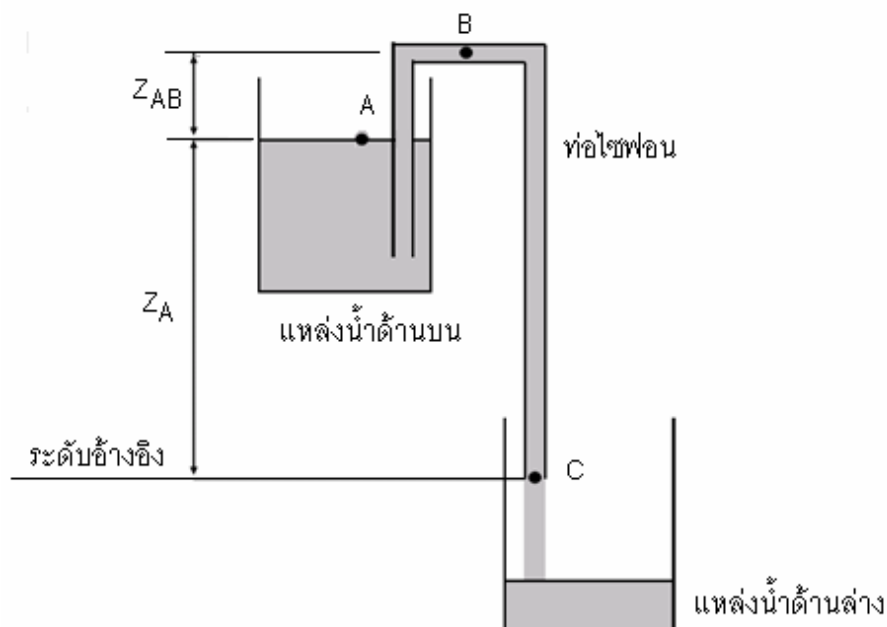
ตาราง 10 ผลการทดสอบระบบไซฟอนที่แต่ละความลึกในการสอดท่อลมเทียบกับ
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อไซฟอน เมื่อใช้ท่อลมขนาด 7.99 มิลลิเมตร

ขนาด ท่อไซฟอน (มิลลิเมตร)	อัตราการไหล (ลิตร/นาทึ)											
	ระดับความลึกในการสอดท่อลม (เซนติเมตร)											
	-20		-10		0		10		20		30	
	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ	ลม	น้ำ
22.10	-	-	-	-	-	-	9.8	15.3	4.8	17	14.4	19.5
30.51	-	-	-	-	0	20.2	36.6	50.6	36	55.5	40.8	62.8
38.10	-	-	>55	133	>55	136	>55	146	>55	148	>55	153
44.35		158	>55	208	>55	207	>55	215	>55	227	>55	228

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณค่าความเร็วในการไหลของน้ำในท่อไซฟอน

การหาค่าความเร็วในการไหลของน้ำในท่อไซฟอนนี้เป็นการคำนวณโดยนำค่าการสูญเสียหลักเนื่องจากความเสียดทานในท่อ และการสูญเสียรองมาคำนวณด้วย เพื่อให้ได้ค่าความเร็วในการไหลของน้ำมีค่าใกล้เคียงกับสภาพการไหลจริงที่สุด จากภาพประกอบ (ข-1). และกฎการอนุรักษ์พลังงาน



ภาพประกอบ 43 ส่วนประกอบของระบบไซฟอน

จะได้
$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_A = \frac{P_C}{\gamma} + \frac{V_C^2}{2g} + Z_C + h_L + h_m \quad (\text{ข-1})$$

ที่จุด A, C ผิวของเหลวเปิดสู่บรรยากาศ ดังนั้น
$$\frac{P_A}{\gamma} = \frac{P_C}{\gamma} = 0$$

ที่จุด A ความเร็วของน้ำเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้น
$$\frac{V_A^2}{2g} = 0$$

ที่จุด C ค่า $Z_C = 0$ เนื่องจากเป็นระนาบอ้างอิงแทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการ (ข-1)

จะได้
$$0 + 0 + 3.78 = 0 + \frac{V_C^2}{2g} + 0 + h_L + h_m$$

แทนค่าการสูญเสียจะได้
$$3.78 = \frac{V_C^2}{2g} + f \frac{LV_C^2}{D2g} + (\Sigma k) \frac{V_C^2}{2g}$$

$$3.78 = \frac{V_C^2}{2g} \left[1 + f \frac{L}{D} + (\Sigma k) \right] \quad (\text{ข-2})$$

พิจารณาข้อมูลระบบไฮดรอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 30.50 มิลลิเมตรเพื่อหาค่าการสูญเสียประกอบด้วย ความยาวของท่อทั้งหมด 5.32 เมตร ค่าความหนืดจลน์ศาสตร์ของน้ำที่ 20 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 1.011×10^{-6} ตารางเมตรต่อวินาที และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของมีดังนี้

ก) ทางเข้าเป็นท่อยื่นเข้า (Flush entrance) มีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเท่ากับ 0.8

ข) ข้อต่อ 90 องศา 2 จุด มีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเท่ากับ $2 \times 0.75 = 1.5$

ค) ข้อต่อสามทาง มีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเท่ากับ 0.9

ง) ทางออกสู่บรรยากาศโดยตรง มีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเท่ากับ 1.0

รวมทั้งระบบไฮดรอน มีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเท่ากับ 4.2

จากสมการของบราเซียส (Brasius) ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 10^5 สามารถหาค่าสัมพัทธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้ว่า

$$f = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}} \quad (\text{ข-3})$$

จากสมการ (ข-2)
$$3.78 = \frac{V_C^2}{2g} \left[1 + f \frac{L}{D} + (\sum k) \right]$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆ จะได้
$$3.78 = \frac{V_C^2}{2g} \left[1 + \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}} \times \frac{L}{D} + (\sum k) \right]$$

$$3.78 = \frac{V_C^2}{2(9.81)} \left[1 + \frac{0.3164}{\left(\frac{V_C D}{\nu} \right)^{0.25}} \times \frac{5.32}{30.51 \times 10^{-3}} + 4.2 \right]$$

$$3.78 = \frac{V_C^2}{2(9.81)} \left[1 + \frac{0.3164}{\left(\frac{V_C^{0.25} \times (30.51 \times 10^{-3})^{0.25}}{(1.011 \times 10^{-6})^{0.25}} \right)} \times \frac{5.32}{30.51 \times 10^{-3}} + 4.2 \right]$$

$$74.164 = V_C^2 \left[\frac{0.3164}{V_C^{0.25} \times 30.168^{0.25} \times 10^{0.75}} \times \frac{5.32}{30.51 \times 10^{-3}} + 5.2 \right]$$

$$74.164 = V_C^2 \left[\frac{1.683}{V_C^{0.25} \times 71.480 \times 10^{-1.25}} + 5.2 \right]$$

$$74.164 = V_C^2 \left[\frac{0.4187}{V_C^{0.25}} + 5.2 \right]$$

$$74.164 = 0.4187 \times V_C^{1.75} + 5.2 V_C^2$$

ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันเป็น

$$5.2V_C^2 + 0.4187 \times V_C^{1.75} - 74.164 = 0 \quad (\text{ข-4})$$

การแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธี Iteration ได้ค่าความเร็วในการไหลของน้ำมีค่าเท่ากับ 3.6712 เมตรต่อวินาทีและมีค่าความคลาดเคลื่อน $\frac{3.6712 - 3.374}{3.6712} \times 100 = 8.095$ เปอร์เซ็นต์

การหาค่าการสูญเสีย

1. การสูญเสียหลักจากการคำนวณ

จากค่าตัวเลขเรย์โนลด์

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

จะได้

$$= \frac{3.6712 \times 30.51 \times 10^{-3}}{1.011 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 1.107 \times 10^5$$

และจากสมการ (ข-4)

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$$

แทนค่าตัวเลขเรย์โนลด์จะได้

$$f = \frac{0.3164}{(1.107 \times 10^5)^{0.25}}$$

$$f = 0.0173$$

และจาก

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

จะได้

$$h_L = 0.0173 \times \frac{5.32}{30.51 \times 10^{-3}} \frac{3.6712^2}{2 \times 9.812}$$

$$h_L = 2.072 \text{ เมตรของน้ำ}$$

2. การสูญเสียรองจากการคำนวณ

จาก

$$h_m = (\sum k) \frac{V^2}{2g}$$

แทนค่าตัวแปรจะได้

$$h_m = 4.2 \times \frac{3.6712^2}{2 \times 9.812}$$

$$h_m = 2.885 \text{ เมตรของน้ำ}$$

ค่าการสูญเสียที่ได้จากการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าการสูญเสียรองมีค่ามากกว่าค่าการสูญเสียหลัก ซึ่งก็เป็นไปได้ เนื่องจากระบบไซฟอนที่ทำการทดสอบเป็นระบบที่ใช้ท่อที่มีความยาวรวมไม่มาก แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าเพียงเล็กน้อย

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ความหมาย

A	พื้นที่หน้าตัด
Bh	เฮดลอยตัว
C_o	ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของอุปกรณ์ออริฟิซ
D	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน
d	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน
d_t	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหลอดปรับกระแส
E	ปริมาณพลังงาน
e	ค่าพลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวล
e	ความกว้างที่เหลือของแผ่นออริฟิซหลังลบคม
F	เวกเตอร์ของแรง
f	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
h_L	การสูญเสียหลัก
h_f	การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน
h_m	การสูญเสียรอง
k	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง
k_e	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ปากทางเข้า
k_f	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ข้อต่อข้องอ
k'	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดแบบค่อยๆ เปลี่ยนแปลง
L	มิติของขนาดความยาว
M	มวลของของไหล
$\dot{m}$	อัตราการไหลของมวล
P	ปริมาณความดัน
Q	อัตราการไหลของของไหล
$\dot{Q}$	อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงาน
Re	ค่าตัวเลขเรย์โนลด์

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์

ความหมาย

 T

มิติของเวลา

 u

พลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวล

 u_x

ความเร็วย่อย

 V

ความเร็ว

 w

งานต่อหนึ่งหน่วยมวล

 W

อัตราการเปลี่ยนแปลงงาน

 Z

เฮดความสูง

 $\forall$

ปริมาณของปริมาตร

 α

มุมของการลบลเลี้ยวที่แผ่นออริฟิซ

 β

อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

 γ

น้ำหนักจำเพาะของของไหล

 ω

อัตราการเปลี่ยนแปลงเชิงมุม

 ε

ความขรุขระสมบูรณ์

 ξ

ค่าออร์ติซีตี้

 ρ

ความหนาแน่นของของไหล

 τ

ความเค้นเฉือน

 φ

สัมประสิทธิ์เฮดของความเร็ว

 ϑ

ความหนืดจลน์ศาสตร์

 μ

ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล

ตัวห้อย

A

ตำแหน่งของ A

B

ตำแหน่งของ B

C

ตำแหน่งของ C

AC

ระยะทาง AC

atm

ระดับบรรยากาศ

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวห้อย (ต่อ)

ความหมาย

 cv

ปริมาตรควบคุม

 f

ความเสียดทาน

 fl

ของการไหล

 fr

ของการเสียดทาน

 g

ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วง

 i

ความเฉื่อย

Orifice

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดแผ่นอริฟิซ

Rotameter

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดโรตاميเตอร์

Wind

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลม

Total

โดยรวม

Turbine

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดใบพัด

Wind

ของลม

 s

จากเพลลา

 x ระยะตามแกน x y ระยะตามแกน y z ระยะตามแกน z τ

ของความเค้นเฉือน

 g

ของความหนืดจลน์ศาสตร์

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายวันชัย ชัยประเคียร
วันเดือนปีเกิด	1 กุมภาพันธ์ 2515
สถานที่เกิด	อำเภอศรีเทพ จังหวัดเพชรบูรณ์
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	34/95 หมู่ 8 หมู่บ้านยิ่งรวยนิเวศน์ ตำบลบางตลาด อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัทสิงหะ เอ็นจิเนียริงเซอร์วิส จำกัด 56/84 หมู่ 5 ซอยรามคำแหง 156 ถนนรามคำแหง แขวงสะพานสูง เขตสะพานสูง กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2526	มัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนศรีเทพประชาสรรค์ จังหวัดเพชรบูรณ์
พ.ศ. 2534	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนพนัสพิทยาคาร จังหวัดชลบุรี
พ.ศ. 2538	อุดมศึกษา: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ
พ.ศ. 2551	บัณฑิตศึกษา: วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ