

บทที่ 4 ผลการทดลอง

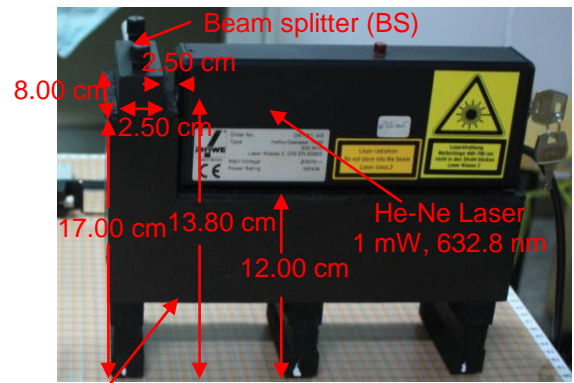
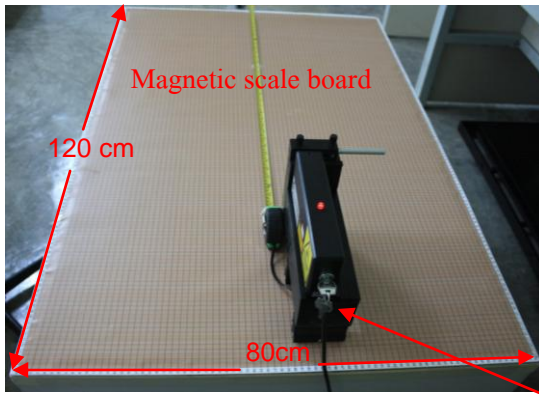
จากที่ได้ออกแบบชุดการทดลองสำหรับวัดอัตราการไหลของของไหลโดยใช้วิธีเลเซอร์ดอปเพลอร์ชนิดลำแสงคู่ และกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยมาแล้วในบทที่ 3 นั้น ในบทนี้จะเป็นการจัดสร้างชุดการทดลองดังกล่าว เพื่อทำการทดลองหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลตัวอย่างด้วยวิธีการจับเวลากับความถี่ดอปเพลอร์ของสัญญาณแสงที่วิเคราะห์ได้จากระบบวิเคราะห์และประมวลผล และทดสอบสมการความสัมพันธ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของระบบการวัดที่สร้างขึ้น ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังนี้

4.1 การจัดสร้างชุดการทดลองสำหรับวัดอัตราการไหลของของไหลโดยใช้วิธี

เลเซอร์ดอปเพลอร์ชนิดลำแสงคู่

เนื่องจากการทดลองทางแสงจำเป็นต้องมีการจัดวางที่มั่นคงและมีพิถีพิถันในการทดลองที่ชัดเจน เพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบและจัดสร้างอุปกรณ์อย่างง่ายและราคาถูกเพื่อช่วยให้การจัดวางชุดการทดลองมีพิถีพิถันที่ชัดเจน มั่นคง และสะดวกในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งขึ้นด้วยอุปกรณ์เพิ่มเติมเหล่านี้ คือ กระจาดแม่เหล็กพร้อมสเกล (Magnetic scale board) แท่นวางเลเซอร์และตัวแยกลำแสง (Laser and beam splitter supporter) ตัวจับยึดอุปกรณ์ออปติก (Optical post holders) และตัวจับยึดสายยาง (Tube holders) ดังแสดงในรูปที่ 4.1

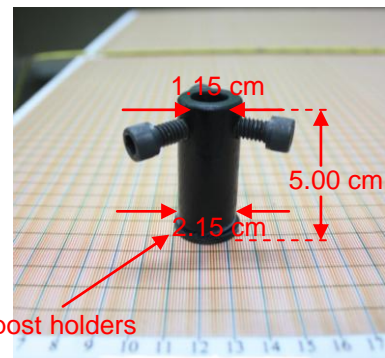
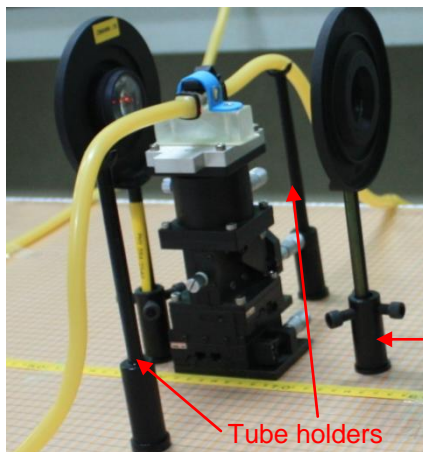
ในการจัดวางระบบทางแสง หรือ LDA สำหรับการทดลองนี้ ได้จัดวางแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม นีออน-ที่มีความยาวคลื่น 632.8 nm กำลัง 1 mW (PHYWE) และตัวแยกลำแสง (Griffin, XFB-660-C) ไว้ด้วยกันบนแท่นวางเลเซอร์และตัวแยกลำแสง เพื่อให้สามารถปรับยึดตำแหน่งตัวแยกลำแสงด้วยปุ่มปรับยึดตัวแยกลำแสง (Locking screw) และกระจกสะท้อนลำแสงที่อยู่ภายในด้วยปุ่มปรับกระจกสะท้อนลำแสง (Knob to rotate mirror) ได้ โดยที่ระยะระหว่างเลเซอร์และตัวแยกลำแสงไม่เปลี่ยนแปลง) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (หลังจากนั้นปรับการขนานกันของลำแสงทั้งสองลำภายหลังจากผ่านตัวแยกลำแสงด้วยการวัดตำแหน่งของลำแสงทั้งสองบนฉากรับแสงที่ตำแหน่งห่างจากกึ่งกลางของตัวแยกลำแสงเป็นระยะ 10 และ 285 cm ให้มีความสูงจากระนาบกระจาดแม่เหล็กเท่ากันเท่ากับ 13.8 cm และห่างกันเป็นระยะ 1 cm หรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เรียกกระบวนการนี้ว่า การจัดลำแสงขนาน เมื่อได้ลำแสงสองลำที่ขนานกันแล้วจะทำการหาค่ามุมระหว่างลำแสงทั้งสอง ณ จุดตัด โดยนำเลนส์ความยาวโฟกัส 100 mm และฉากรับแสงวางที่ระยะ 10 และ 285 cm จากกึ่งกลางของตัวแยกลำแสงตามลำดับ ซึ่งเมื่อวัดระยะห่างระหว่างลำแสงทั้งสองบนฉากพบว่ามีความเท่ากับ 22.9 cm จึงได้ว่ามุม ϕ เท่ากับ 4.96° ดังแสดงในรูปที่ 4.4



Laser and beam splitter supporter

(ก) กระดานแม่เหล็กพร้อมสเกล (โต๊ะสำนักงานที่ประกบเข้ากับกระดานไวท์บอร์ดแม่เหล็กขนาด $80 \times 120 \text{ cm}^2$ โดยมีแผ่นโปสเตอร์ลายพิกัดตาราง ขนาดช่องละ 1 cm^2 ที่มีช่องย่อยขนาด 1 mm^2 ปิดทับ)

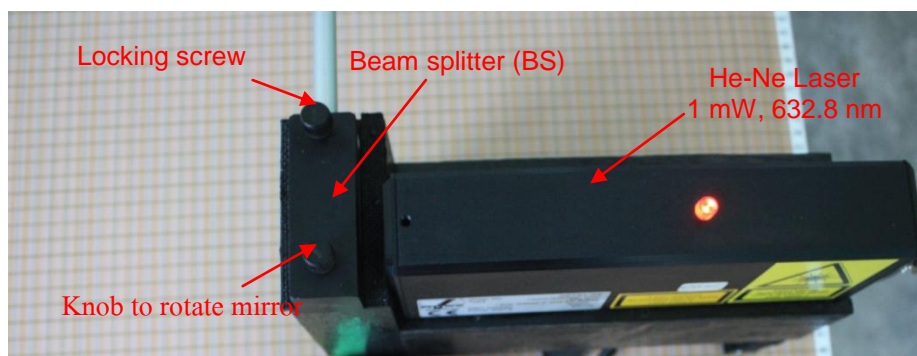
(ข) แท่นวางเลเซอร์และตัวแยกลำแสง (แท่นไม้ฐานติดด้วยแผ่นแม่เหล็กใช้สำหรับวางเลเซอร์และตัวแยกลำแสงเพื่อให้ลำแสงขนานหลังจากผ่านตัวแยกลำแสงทั้งสองลำ อยู่ในแนวระดับสูงจากพื้นโต๊ะ 13.8 cm)



(ง) ตัวจับยึดอุปกรณ์ออปติก (แท่งไม้ทรงกระบอกกลวง ฐานติดด้วยแผ่นแม่เหล็ก ใช้สำหรับยึดจับเลนส์หรือไอริสไดอะแฟรมให้มั่นคงและได้ระดับ)

(ค) ตัวจับยึดสายยางซิลิโคนที่ต่อจากระบบของไหล ตัวอย่างเข้าสู่เซลล์และออกจากเซลล์กลับสู่ระบบของไหลตัวอย่าง

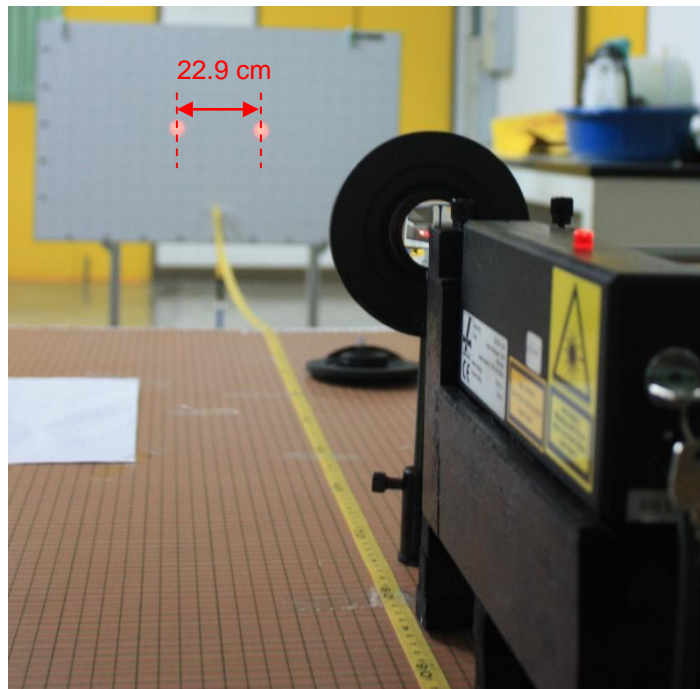
รูปที่ 4.1 แสดงอุปกรณ์เพิ่มเติมสำหรับการจัดวางการชุดทดลองให้มีพิกัดที่ชัดเจน มั่นคง และสะดวกในการปรับเปลี่ยนตำแหน่ง



รูปที่ 4.2 แสดงการจัดวางตัวแยกลำแสงและเลเซอร์พร้อมทั้งปุ่มปรับยึดตัวแยกลำแสงและปุ่มปรับกระจกสะท้อนลำแสงสำหรับการจัดลำแสงขนาน

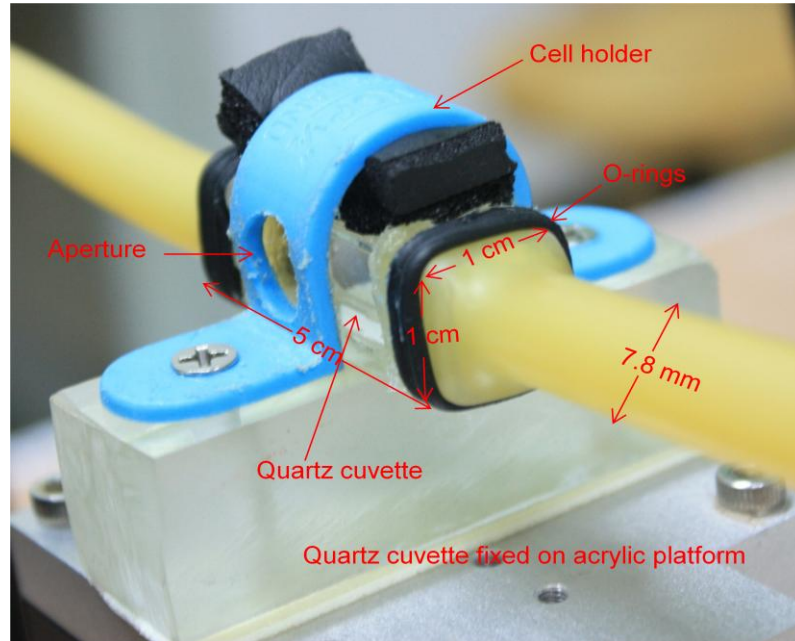


รูปที่ 4.3 แสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อให้ได้ลำแสงที่ขนานกันและห่างกันเป็นระยะ 1.0 cm

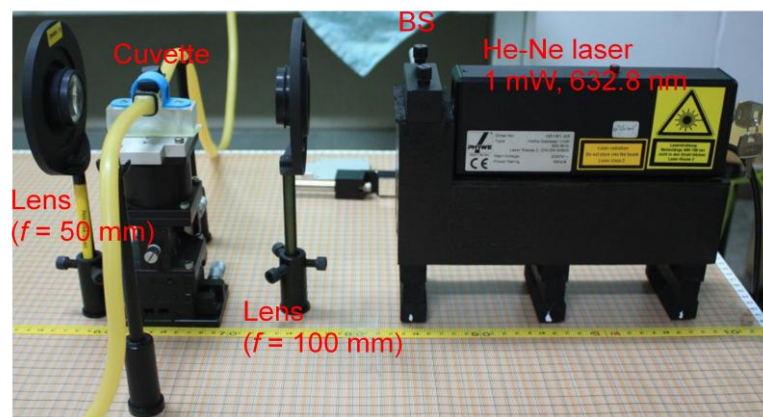


รูปที่ 4.4 แสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อทำการคำนวณหาค่ามุมระหว่างลำแสงที่ตัดกัน

เมื่อได้มุมตามที่กำหนดแล้ว นำเซลล์ควอตซ์ทรงสี่เหลี่ยมขนาด $1 \times 1 \times 5 \text{ cm}^3$ ที่ต่อเข้ากับสายยางซิลิโคน (Silicone tube) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.8 mm และยึดบนแท่นอะคริลิก (Acrylic platform) ด้วยสายรัดท่อประปา (Pipe clamp) ที่มีช่องเปิดให้แสงผ่าน (Aperture) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 มาไว้ที่ตำแหน่งซึ่งห่างจากเลนส์ความยาวโฟกัส 100 mm เป็นระยะ 10 cm โดยให้ตำแหน่งที่ลำแสงทั้งสองลำตัดกันอยู่กึ่งกลางเซลล์พอดี สายยางและเซลล์จะถูกปรับให้อยู่ในระดับเดียวกัน โดยใช้ตัวจับยึดสายยาง ดังแสดงในรูปที่ 4.6

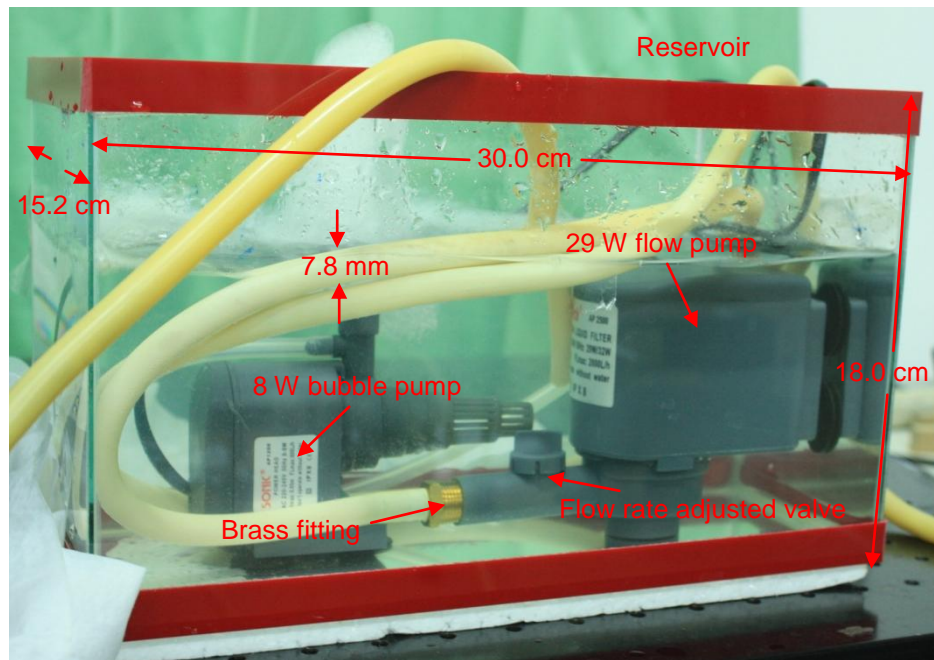


รูปที่ 4.5 แสดงเซลล์ที่เชื่อมต่อเข้ากับสายยาง

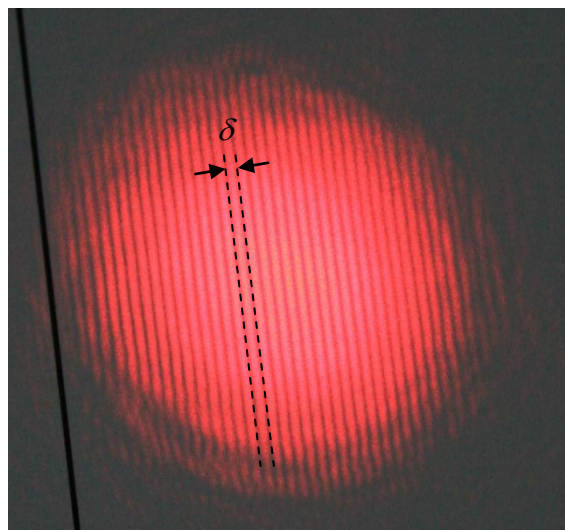


รูปที่ 4.6 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ของระบบทางแสง

ภายในเซลล์จะมีของไหลที่ต้องการวัดอัตราการไหลไหลผ่าน ซึ่งในงานวิจัยนี้ของไหลตัวอย่าง คือน้ำประปาโดยจะถูกควบคุมให้มีอุณหภูมิ $26 \pm 1^\circ\text{C}$ ตลอดการทดลอง ที่มีฟองอากาศและจุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ การไหลของน้ำประปาและการสร้างฟองอากาศถูกควบคุมโดยระบบของไหลตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ระบบหมุนเวียนน้ำ เพื่อหมุนเวียนน้ำจากอ่างเก็บน้ำ (Reservoir) ขนาด $15.2 \times 30.0 \times 18.0 \text{ cm}^3$ ให้ไหลผ่านเซลล์ซึ่งต่ออยู่กับสายยางซิลิโคนแล้วกลับไปยังอ่างเก็บน้ำ โดยใช้ปั๊มน้ำชนิดมีวาล์ว (Flow pump with valve) ขนาด 29 W (LifeTech, AP2500) อัตราการไหลสูงสุด 2000 L/h ในการควบคุมอัตราการไหลของของไหลตัวอย่าง และระบบเติมฟองอากาศที่ใช้ปั๊มน้ำ (Bubble pump) ขนาด 8 W (Sonic, AP1200) อัตราการไหลสูงสุด 600 L/h ทำหน้าที่เป็นปั๊มลมเติมฟองอากาศให้กับน้ำในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



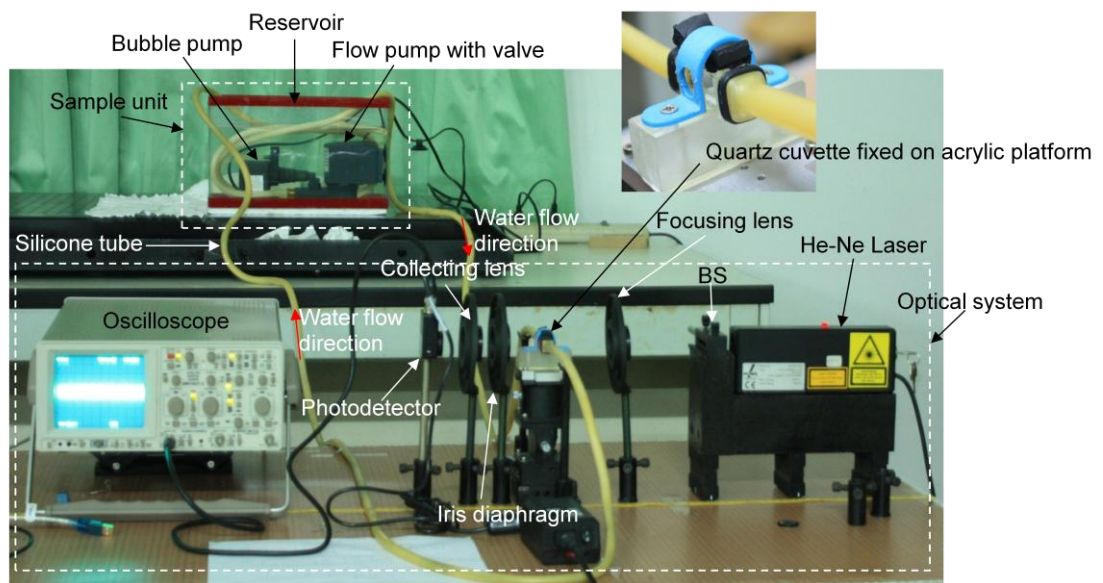
รูปที่ 4.7 แสดงระบบของไหลตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วย ระบบหมุนเวียนน้ำ และระบบเติมฟองอากาศ ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์สัญญาณแสง ต้องตรวจสอบว่าลำแสงตัดกันที่กึ่งกลางของเซลล์เกิดเป็นห่วงแหงการวัดและเกิดริ้วการแทรกสอดหรือไม่ โดยใช้เลนส์ความยาวโฟกัส 50 mm วางห่างจากกึ่งกลางเซลล์เป็นระยะ 5 cm เพื่อรวมแสงที่กระเจิงจากห่วงแหงการวัด ให้ไปตกลงบนฉากรับแสงที่อยู่ห่างออกไปเป็นระยะ 4 m ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงริ้วการแทรกสอดของแสงจากห่วงแหงการวัดบนฉากที่ระยะห่าง 4 m

เมื่อจัดวางอุปกรณ์ของระบบทางแสงจนเกิดริ้วการแทรกสอดขึ้นแล้ว นำเลนส์ที่มีความยาวโฟกัส 50 mm ออก วางไอริสไดอะแฟรมให้ชิดกับเซลล์ เพื่อกั้นลำแสงให้เหลือเฉพาะแสงที่กระเจิงจากจุดตัด

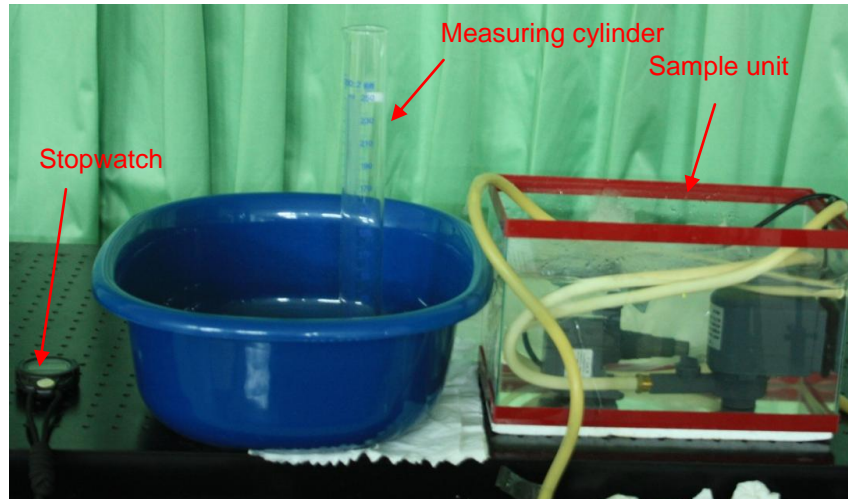
ของลำแสงทั้งสองลำเท่านั้น จากนั้นใช้เลนส์ที่มีความยาวโฟกัส 50 mm วางที่ระยะห่าง 5 cm จากไอริสไดอะแฟรม เพื่อรวมแสงที่ได้หลังจากผ่านไอริสไดอะแฟรมให้ไปตกลงบนหัววัดแสงชนิดซิลิกอนแอมพลีไฟด์ (THORLABS, PDA8A) ที่มีย่านการวัดอยู่ในช่วง 320 – 1000 nm ที่ตำแหน่งห่างจากเลนส์ที่มีความยาวโฟกัส 50 mm เป็นระยะ 5 cm หัววัดแสงนี้ต่ออยู่กับออสซิลโลสโคป (HAMEG, HM1507-3) ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์พกพา (HEWLETT-PACKARD, 6530B) ผ่านพอร์ต RS-232 ในส่วนของระบบวิเคราะห์และประมวลผลใช้โปรแกรม SP107E ทำหน้าที่บันทึกสัญญาณจากออสซิลโลสโคป เพื่อใช้วิเคราะห์หาค่าความถี่ดอปเพลอร์จากสัญญาณแสงที่กระเจิงจากหัวแห่งการวัด การติดตั้งชุดการทดลองสำหรับวัดอัตราการไหลของของไหลโดยใช้วิธีเลเซอร์ดอปเพลอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.9



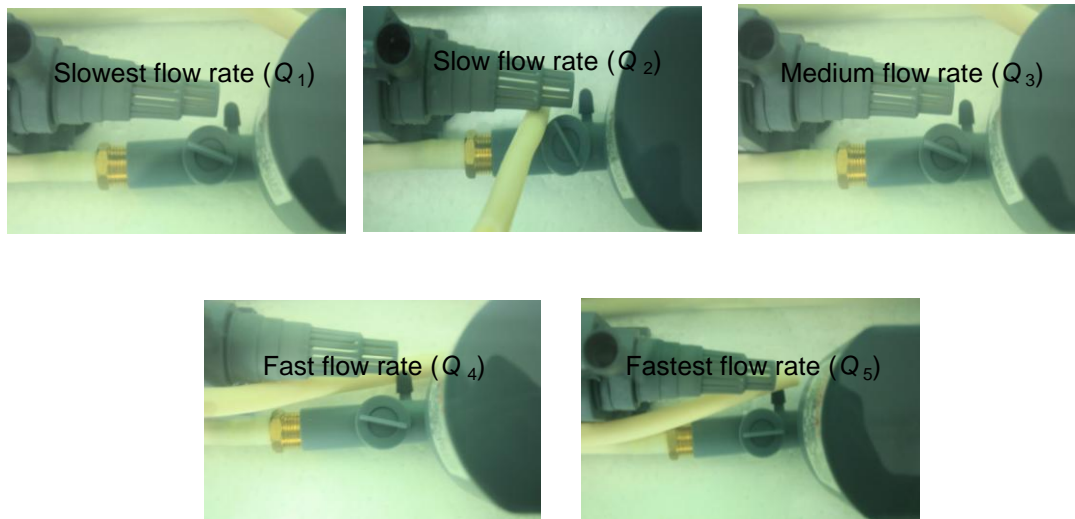
รูปที่ 4.9 แสดงการติดตั้งชุดการทดลองสำหรับวัดอัตราการไหลของของไหลโดยใช้วิธีเลเซอร์ดอปเพลอร์

4.2 การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความถี่ดอปเพลอร์

การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรกับความถี่ดอปเพลอร์ของสัญญาณแสงในงานวิจัยนี้ ทำการวัดอัตราการไหลของน้ำด้วยวิธีการจับเวลา โดยใช้นาฬิกาจับเวลาและกระบอกตวงขนาด 250 mL ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เพื่อบันทึกค่าปริมาตรของน้ำภายในกระบอกตวงที่ตวงได้ในช่วงเวลาที่ต่างกันของอัตราการไหลแต่ละระดับ ตามรูปที่ 4.11 อัตราการไหลของน้ำถูกกำหนดขึ้น 5 ระดับ คือ Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 และ Q_5 ตามลำดับ เมื่อ Q_1 คือ อัตราการไหลช้าที่สุด และ Q_5 คือ อัตราการไหลเร็วที่สุด จากการปรับวาล์วซึ่งต่ออยู่กับปั๊มควบคุมการไหล



รูปที่ 4.10 แสดงอุปกรณ์เพื่อใช้ในการวัดอัตราการไหลด้วยวิธีจับเวลา



รูปที่ 4.11 แสดงการปรับอัตราการไหลด้วยวาล์วทั้ง 5 ระดับ จากช้าที่สุด (Q_1) ถึงเร็วที่สุด (Q_5)

จากการจับเวลาบันทึกค่าปริมาตรของน้ำภายในกระบอกตวงที่ตวงได้ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ณ อัตราการไหลแต่ละระดับ ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.1 – 4.5 เมื่อนำผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำในกระบอกตวงกับช่วงเวลา จะได้กราฟดังรูปที่ 4.12 – 4.16

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณน้ำภายในกระบอกตวงที่เวลาต่างๆ ณ ระดับอัตราการไหล Q_1

ปริมาณน้ำภายในกระบอกตวง (mL)	เวลา (s)
66	2.407
75	2.806
92	3.426
104	3.846
116	4.296
124	4.68
136	5.046
152	5.726
158	5.828
168	6.336
182	6.721
200	7.526
218	8.241
226	8.606
235	8.818
246	9.222

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณน้ำภายในกระบอกตวงที่เวลาต่างๆ ณ ระดับอัตราการไหล Q_2

ปริมาณน้ำภายในกระบอกตวง (mL)	เวลา (s)
62	2.239
82	2.936
98	3.528
118	4.566
132	4.786
154	5.766
162	6.136
172	6.466
178	6.586
180	6.746
186	6.936
190	7.206
206	7.729
214	8.08
222	8.288
245	9.147

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณน้ำภายในกระบอกตวงที่เวลาต่างๆ ณ ระดับอัตราการไหล Q_3

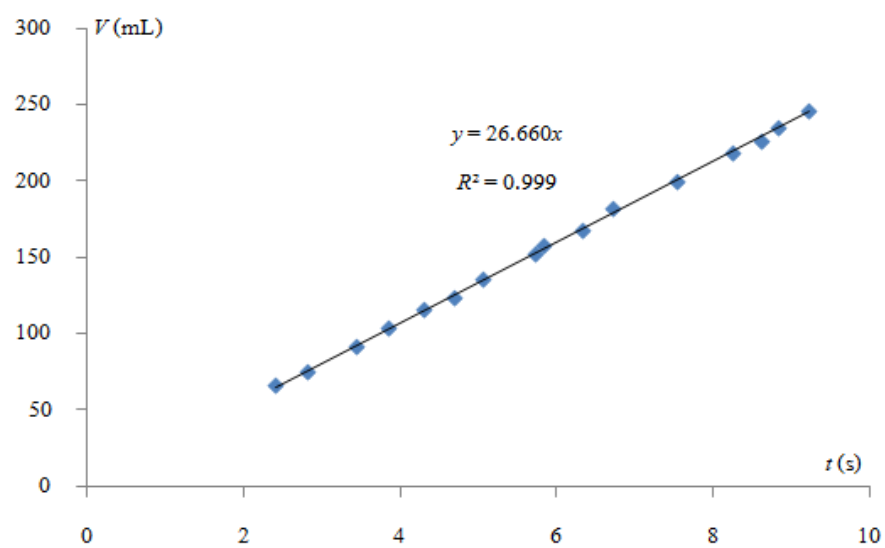
ปริมาณน้ำภายในกระบอกตวง (mL)	เวลา (s)
66	2.286
72	2.587
86	3.156
95	3.466
100	3.736
116	4.246
134	4.817
140	5.086
155	5.968
166	6.146
170	6.166
188	6.836
195	7.186
212	7.756
222	8.366
242	9.22

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณน้ำภายในกระบอกตวงที่เวลาต่างๆ ณ ระดับอัตราการไหล Q_4

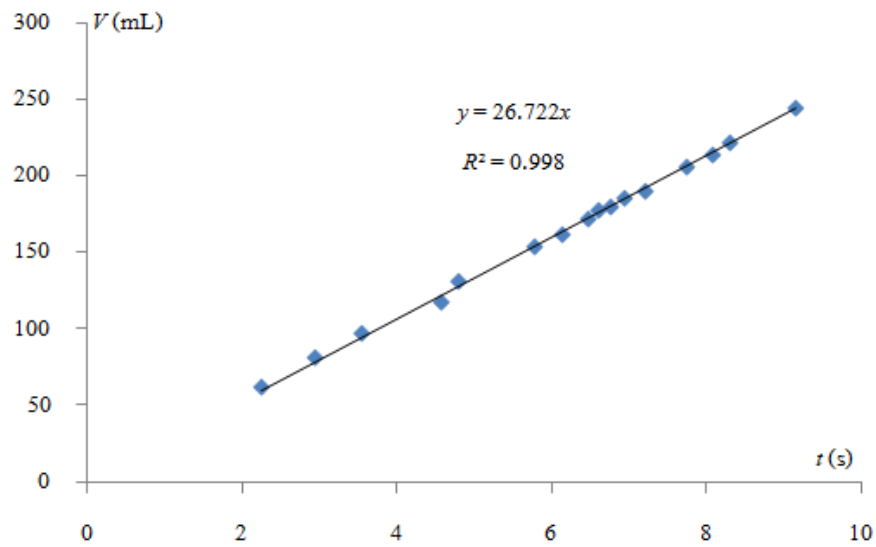
ปริมาณน้ำภายในกระบอกตวง (mL)	เวลา (s)
60	2.246
65	2.416
74	2.992
90	3.168
104	3.926
112	4.106
122	4.606
132	4.916
143	5.246
150	5.456
156	5.969
177	6.486
196	7.126
206	7.482
226	8.286
250	9.246

ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณน้ำภายในกระบอกตวงที่เวลาต่างๆ ณ ระดับอัตราการไหล Q_5

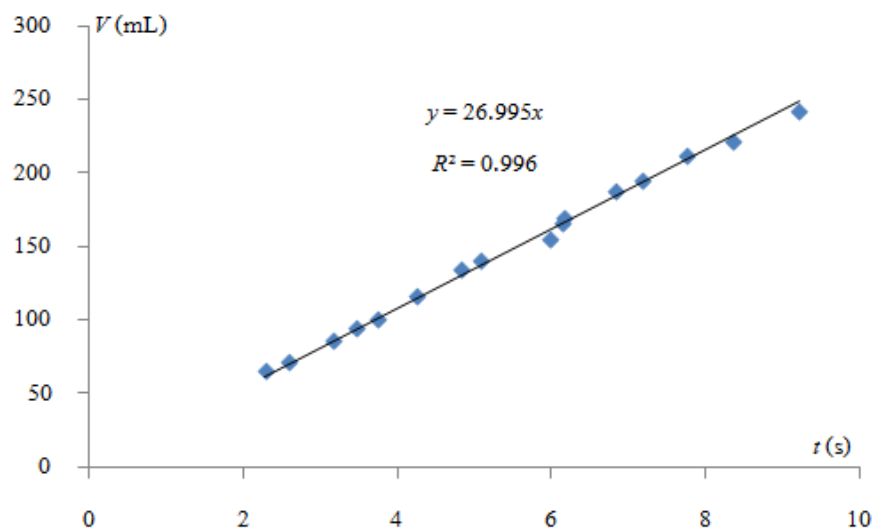
ปริมาณน้ำภายในกระบอกตวง (mL)	เวลา (s)
55	1.906
66	2.256
78	2.826
84	3.028
98	3.356
105	3.656
125	4.486
136	4.947
158	5.676
162	5.966
180	6.677
194	7.006
200	7.276
207	7.449
228	8.326
248	9.116



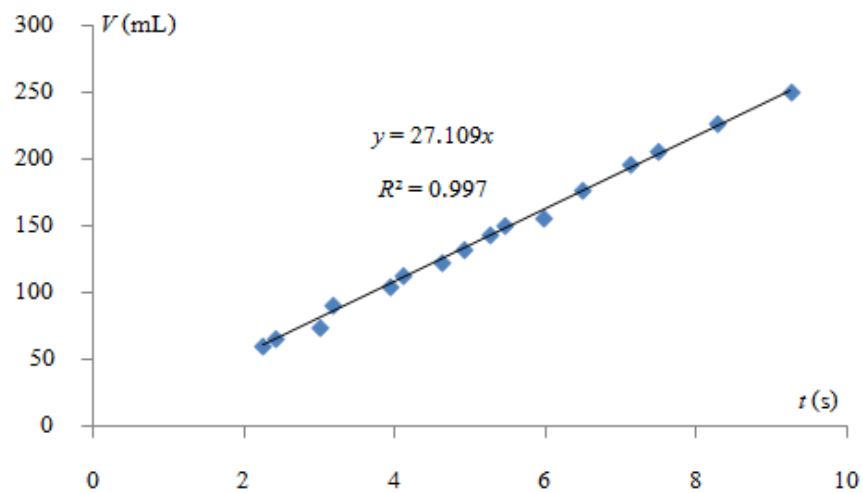
รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำภายในกระบอกตวงเทียบกับเวลา ณ ระดับอัตราการไหล Q_1



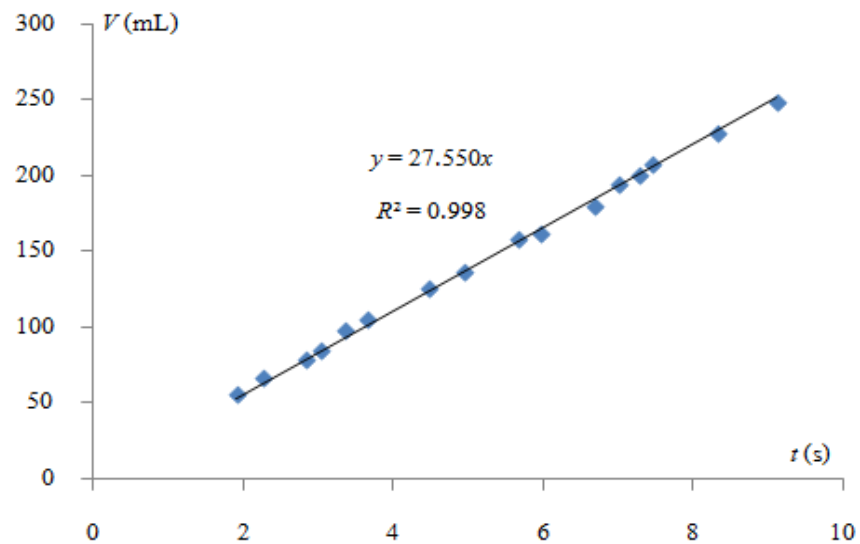
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำภายในกระบอกตวงเทียบกับเวลา ณ ระดับอัตราการไหล Q_2



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำภายในกระบอกตวงเทียบกับเวลา ณ ระดับอัตราการไหล Q_3



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำภายในกระบอกตวงเทียบกับเวลา ณ ระดับอัตราการไหล Q_4



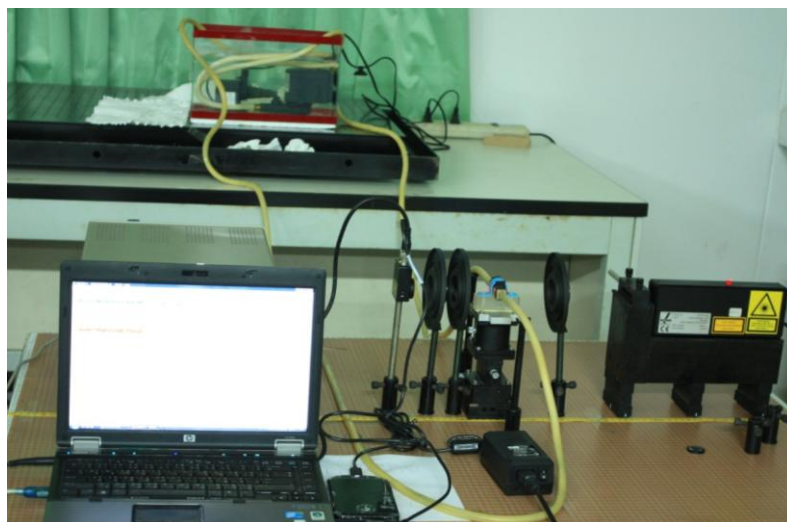
รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำภายในกระบอกตวงเทียบกับเวลา ณ ระดับอัตราการไหล Q_5

ค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.12 – 4.16 จะแสดงถึงอัตราการไหล โดยตารางสรุปอัตราการไหลที่แต่ละระดับแสดงดังตารางที่ 4.6

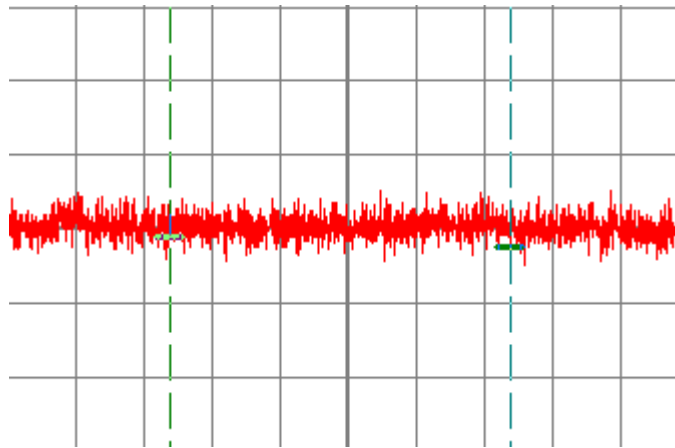
ตารางที่ 4.6 แสดงอัตราการไหลที่แต่ละระดับอัตราการไหล

ระดับอัตราการไหล	อัตราการไหล (mL/s)
Q_1	26.660
Q_2	26.722
Q_3	26.995
Q_4	27.109
Q_5	27.550

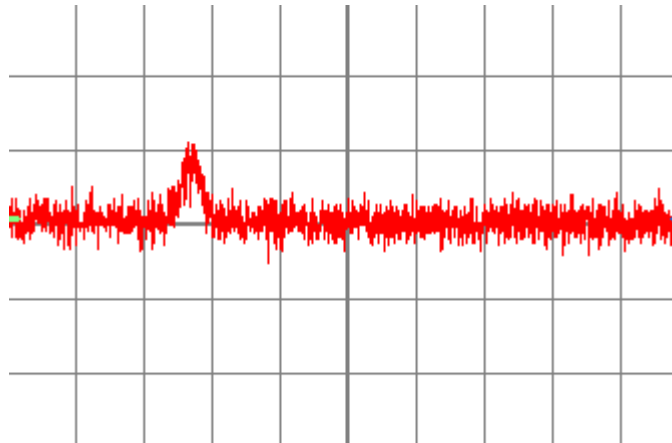
ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแต่ละระดับกับความถี่คอปเพลอร์ จะต้องบันทึกสัญญาณแสงลงบนฮาร์ดดิสก์ เพื่อเก็บภาพสัญญาณมาวิเคราะห์หาค่าความถี่คอปเพลอร์โดยใช้โปรแกรม SP107E เนื่องจากการกระเจิงของแสงจากบริเวณที่ไม่ใช่กึ่งกลางจะมีความเข้มแสงน้อยกว่าที่หัววัดแสงจะตรวจจับได้ ถึงแม้ว่าจะสามารถมองเห็นได้ว่าการกระพริบระยิบระยับของแสงขึ้นภายในเซลล์ก็ตาม การจับวางชุดการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.17 จากการทดลอง ขณะที่ไม่มีฟองอากาศหรือจุลินทรีย์เคลื่อนที่ตัดผ่านหัวแห่งการวัดภายในเซลล์นั้น สัญญาณที่บันทึกได้จะเป็นดังรูปที่ 4.18 คือ ไม่มีพัลส์สัญญาณเกิดขึ้น แต่เมื่อมีฟองอากาศหรือจุลินทรีย์เคลื่อนที่ตัดผ่านบริเวณกึ่งกลางหัวแห่งการวัดภายในเซลล์ จะเกิดพัลส์สัญญาณขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.17 แสดงการบันทึกค่าสัญญาณจากหัววัดแสงลงสู่ฮาร์ดดิสก์

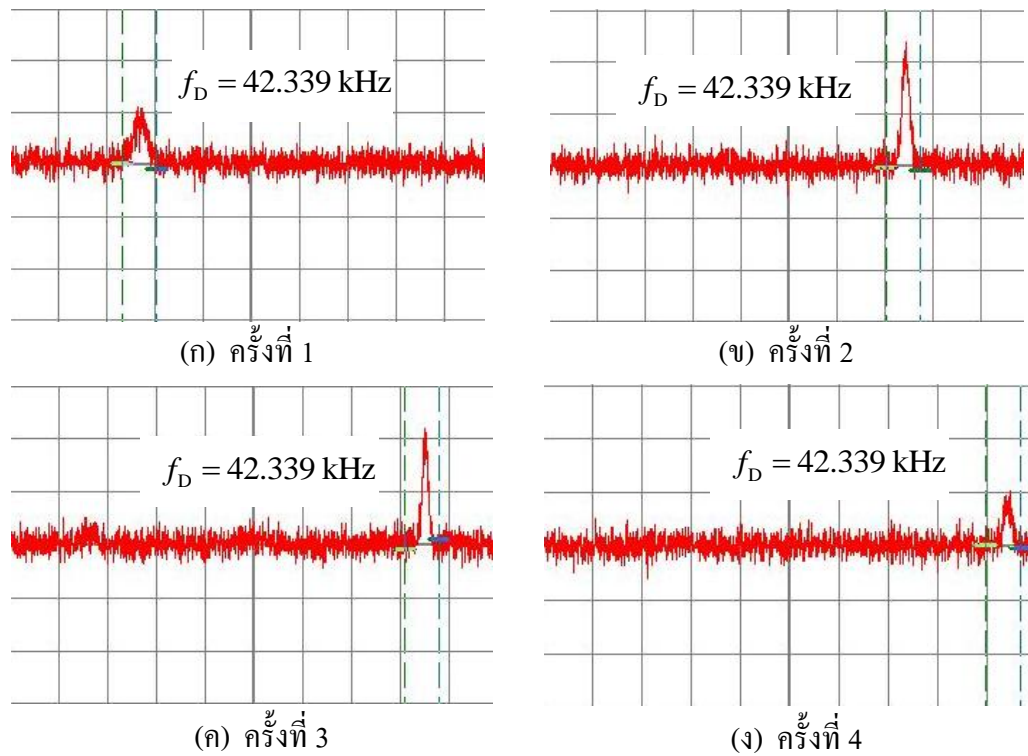


รูปที่ 4.18 แสดงค่าสัญญาณจากหัววัดแสงขณะปราศจากอนุภาคเคลื่อนที่ตัดผ่านหัวแห่งการวัด
เมื่อแกน x เป็นแกนของเวลา (ms) และแกน y เป็นแกนของความเข้มแสง (a.u.)

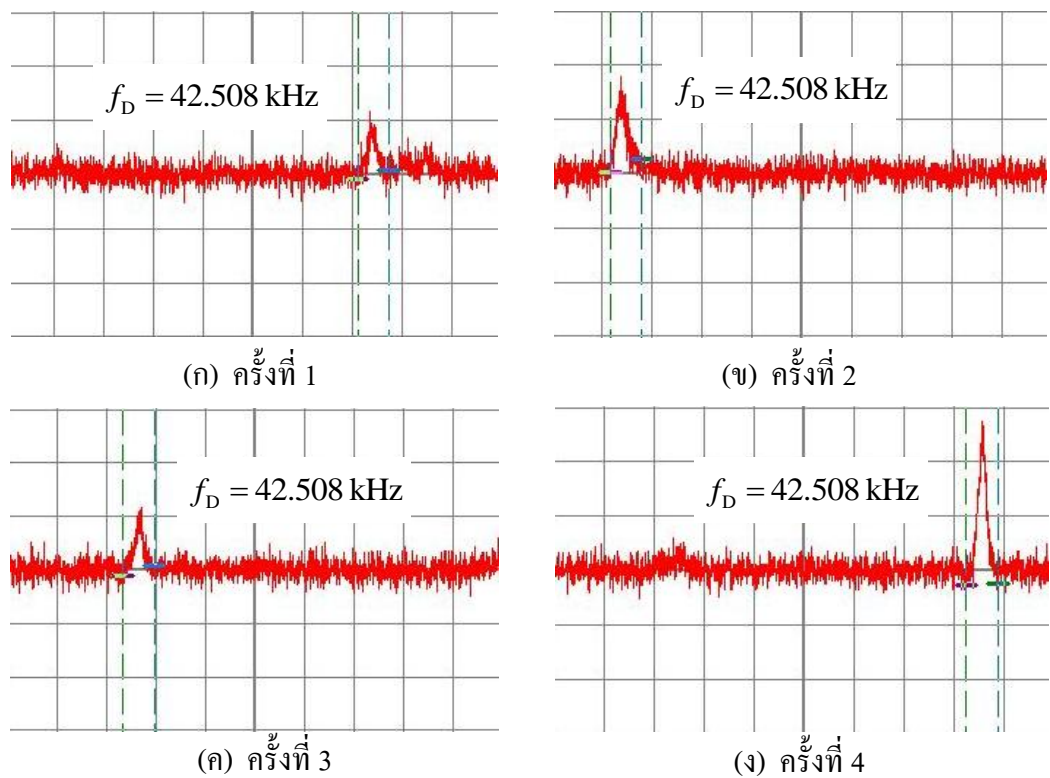


รูปที่ 4.19 แสดงค่าสัญญาณจากหัววัดแสงขณะมีอนุภาคเคลื่อนที่ตัดผ่านหัวแห่งการวัด
เมื่อแกน x เป็นแกนของเวลา (ms) และแกน y เป็นแกนของความเข้มแสง (a.u.)

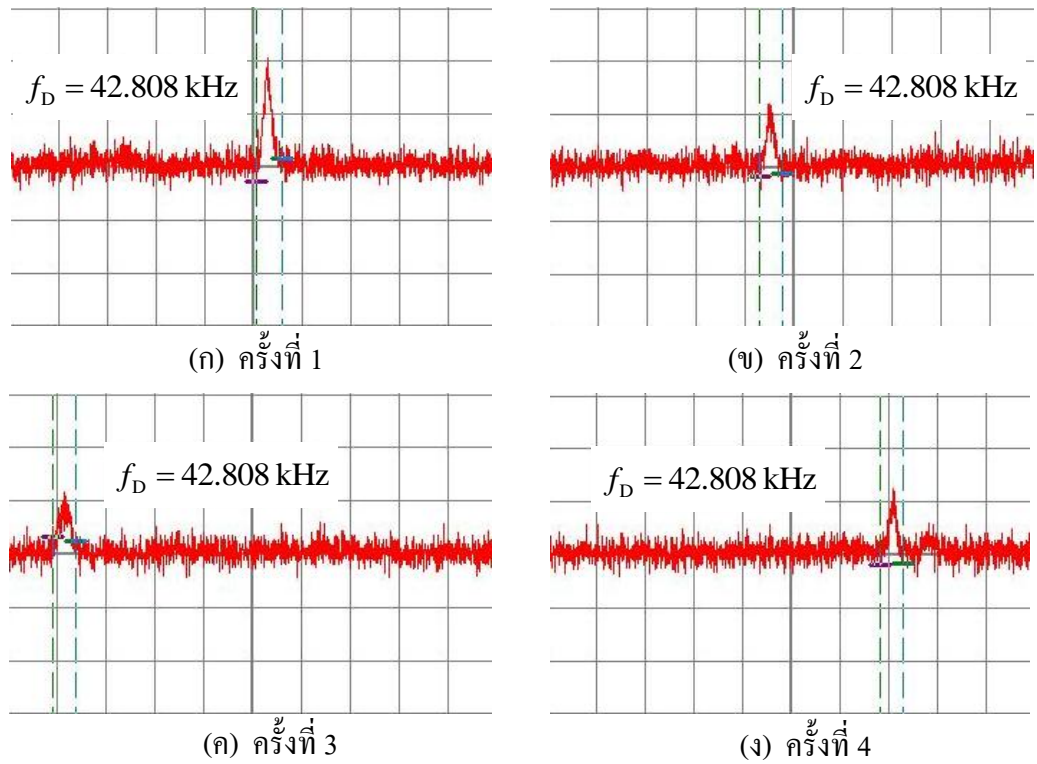
จากการทดลอง เมื่อทำการปรับอัตราการใช้ให้คงที่ในแต่ละระดับตามตารางที่ 4.6 แล้วบันทึกภาพสัญญาณที่แต่ละระดับของอัตราการใช้ด้วยโปรแกรม SP107E โดยที่แต่ละระดับอัตราการใช้จะทำการบันทึกสัญญาณทั้งหมด 4 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าความถี่คืออปเพลอร์ พบว่าได้ภาพสัญญาณที่มีสัญญาณพัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 – 4.24 ซึ่งค่าเฉลี่ยของความถี่คืออปเพลอร์จากภาพสัญญาณที่แต่ละระดับอัตราการใช้ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.7



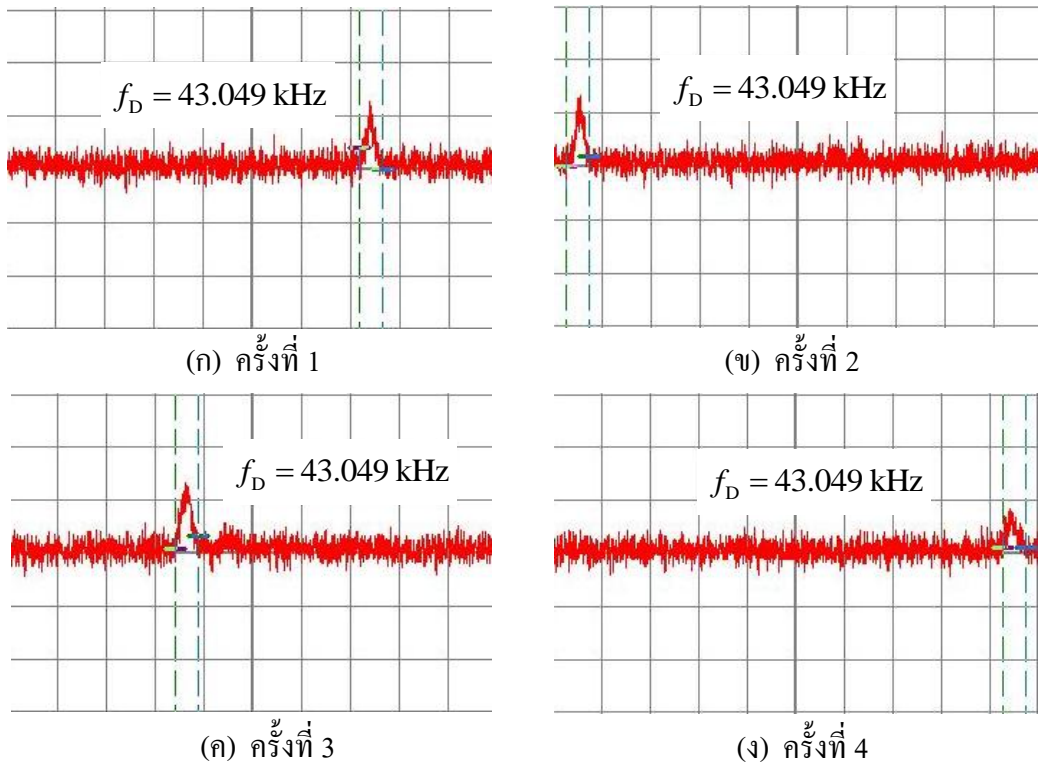
รูปที่ 4.20 แสดงภาพสัญญาณที่บันทึกได้ที่ระดับอัตราไหล Q_1 เมื่อแกน x เป็นแกนของเวลา (ms) และแกน y เป็นแกนของความเข้มแสง (a.u.)



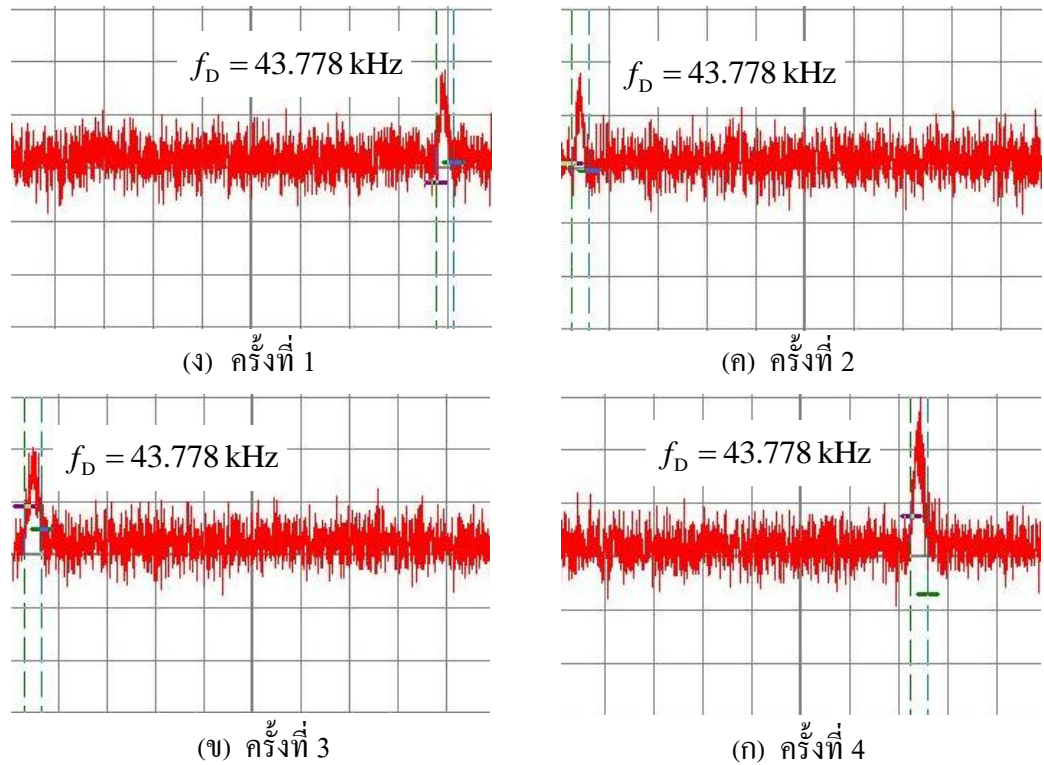
รูปที่ 4.21 แสดงภาพสัญญาณที่บันทึกได้ที่ระดับอัตราไหล Q_2 เมื่อแกน x เป็นแกนของเวลา (ms) และแกน y เป็นแกนของความเข้มแสง (a.u.)



รูปที่ 4.22 แสดงภาพสัญญาณที่บันทึกได้ที่ระดับอัตราการใช้ Q_3 เมื่อแกน x เป็นแกนของเวลา (ms) และแกน y เป็นแกนของความเข้มแสง (a.u.)



รูปที่ 4. 23 แสดงภาพสัญญาณที่บันทึกได้ที่ระดับอัตราการใช้ Q_4 เมื่อแกน x เป็นแกนของเวลา (ms) และแกน y เป็นแกนของความเข้มแสง (a.u.)

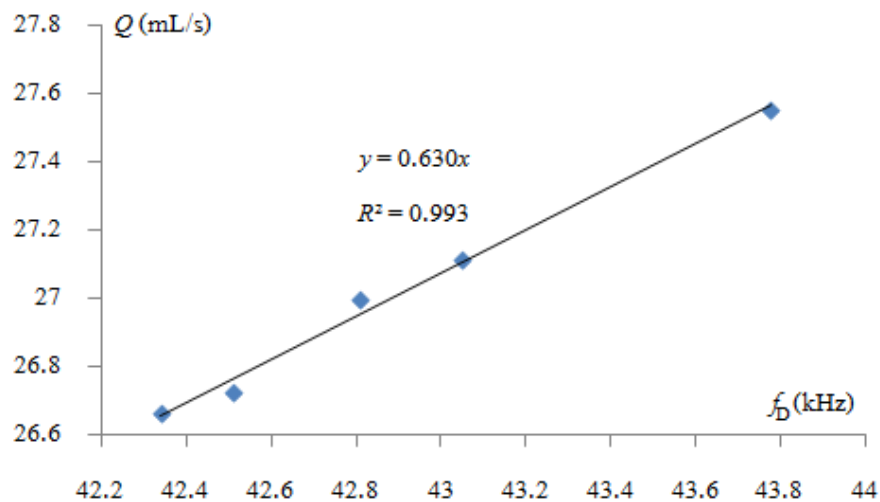


รูปที่ 4.24 แสดงภาพสัญญาณที่บันทึกได้ที่ระดับอัตราการไหล Q_5 เมื่อแกน x เป็นแกนของเวลา (ms) และแกน y เป็นแกนของความเข้มแสง (a.u.)

ตารางที่ 4.7 แสดงอัตราการไหลกับความถี่ดอปเพลอร์จากภาพสัญญาณที่แต่ละระดับอัตราการไหล

ระดับอัตราการไหล	อัตราการไหล (mL/s)	ความถี่ดอปเพลอร์ (kHz)					เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
Q_1	26.660	42.339	42.339	42.339	42.339	42.339	
Q_2	26.722	42.508	42.508	42.508	42.508	42.508	
Q_3	26.995	42.808	42.808	42.808	42.808	42.808	
Q_4	27.109	43.049	43.049	43.049	43.049	43.049	
Q_5	27.550	43.778	43.778	43.778	43.778	43.778	

จากข้อมูลที่ได้ในตารางที่ 4.7 พบว่าที่แต่ละระดับอัตราการไหล ไม่ว่าจะทำการบันทึกภาพสัญญาณกี่ครั้งก็ตามจะได้ค่าความถี่ดอปเพลอร์เท่าเดิม แสดงให้เห็นว่าชุดการทดลองสำหรับวัดอัตราการไหลของของไหลโดยใช้วิธีเลเซอร์ดอปเพลอร์มีความแม่นยำสูง ซึ่งสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความถี่ดอปเพลอร์ ได้ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความถี่ดอปเพลอร์

ดังนั้น จะได้สมการความสัมพันธ์

$$Q = 0.630f_D \quad (4.1)$$

เป็นสมการที่ใช้ในการหาอัตราการไหลจากความถี่ดอปเพลอร์ ซึ่งมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) R^2 เท่ากับ 0.993

เพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นว่าสมการความสัมพันธ์นี้มีความแม่นยำและใช้งานได้จริง จึงต้องทำการทดสอบในหัวข้อต่อไป

4.3 การทดสอบสมการความสัมพันธ์

ในหัวข้อนี้จะทดสอบสมการความสัมพันธ์โดยสุ่มปรับวาล์วเพื่อให้ได้อัตราการไหลซึ่งไม่ทราบค่า 3 ระดับ ได้แก่ U_1 , U_2 และ U_3 แล้ววัดค่าอัตราการไหลด้วยวิธีการจับเวลา พร้อมทั้งวัดความถี่ดอปเพลอร์ที่ระดับอัตราการไหล U_1 , U_2 และ U_3 จากนั้นใช้สมการที่ 4.1 คำนวณหาอัตราการไหลจากความถี่ดอปเพลอร์ เพื่อทำการเปรียบเทียบหาความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของอัตราการไหลจากวิธีทั้งสองของแต่ละระดับอัตราการไหล ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.8 – 4.10 เมื่อนำผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในกระบอกตวงกับช่วงเวลา จะได้กราฟดังรูปที่ 4.26 – 4.28

ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณน้ำภายในกระบอกตวงที่เวลาต่างๆ ณ ระดับอัตราการไหล U_1

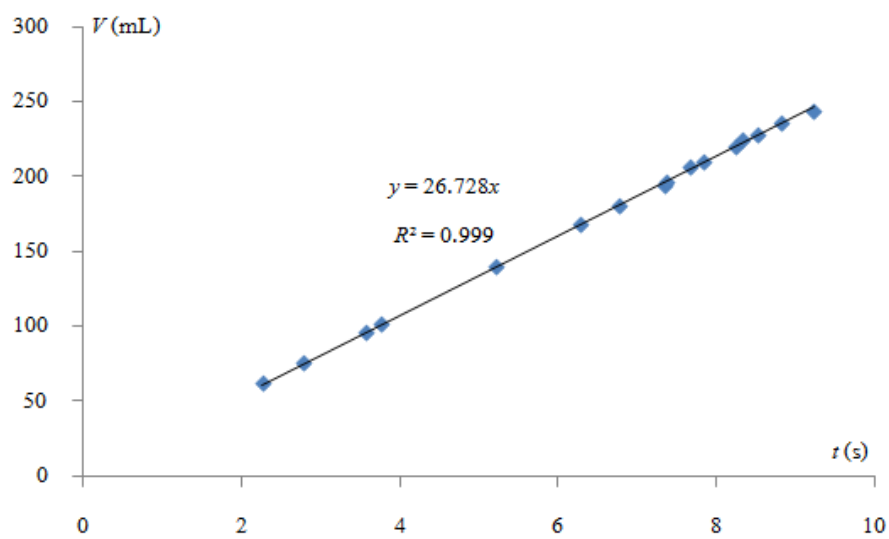
ปริมาณน้ำภายในกระบอกตวง (mL)	เวลา (s)
62	2.256
76	2.786
96	3.566
102	3.756
140	5.206
168	6.271
180	6.766
194	7.336
196	7.366
207	7.666
210	7.846
220	8.246
224	8.336
228	8.529
236	8.82
244	9.226

ตารางที่ 4.9 แสดงปริมาณน้ำภายในกระบอกตวงที่เวลาต่างๆ ณ ระดับอัตราการไหลที่ U_2

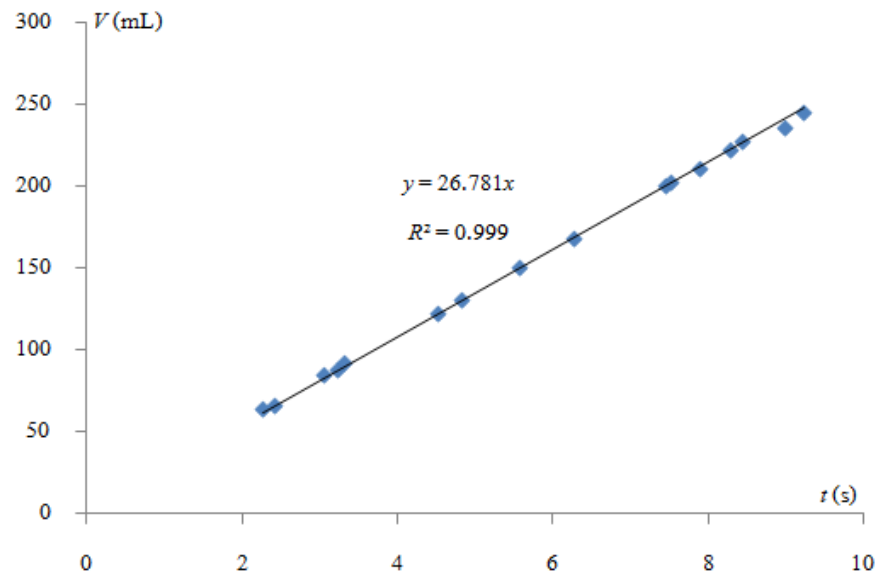
ปริมาณน้ำภายในกระบอกตวง (mL)	เวลา (s)
64	2.266
66	2.416
84	3.046
88	3.226
92	3.306
122	4.521
130	4.826
150	5.56
168	6.276
200	7.447
202	7.522
211	7.886
222	8.286
227	8.44
236	8.986
245	9.236

ตารางที่ 4.10 แสดงปริมาณน้ำภายในกระบอกตวงที่เวลาต่างๆ ณ ระดับอัตราการไหลที่ U_3

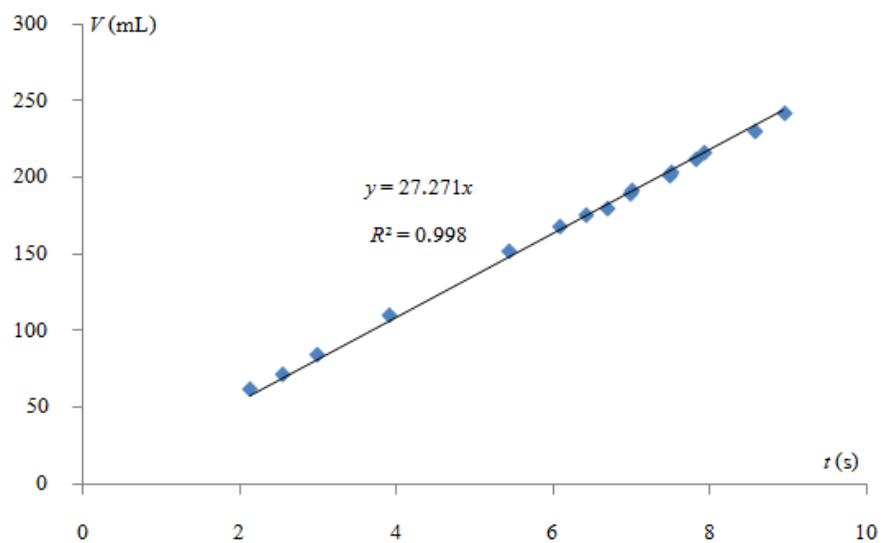
ปริมาณน้ำภายในกระบอกตวง (mL)	เวลา (s)
62	2.121
72	2.542
85	2.986
110	3.888
152	5.43
168	6.086
176	6.416
180	6.686
190	6.986
192	7.006
202	7.486
204	7.506
212	7.816
217	7.919
230	8.562
242	8.946



รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำภายในกระบอกตวงเทียบกับเวลา ณ ระดับอัตราการไหล U_1



รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำภายในกระบอกตวงเทียบกับเวลา ณ ระดับอัตราการไหล U_2



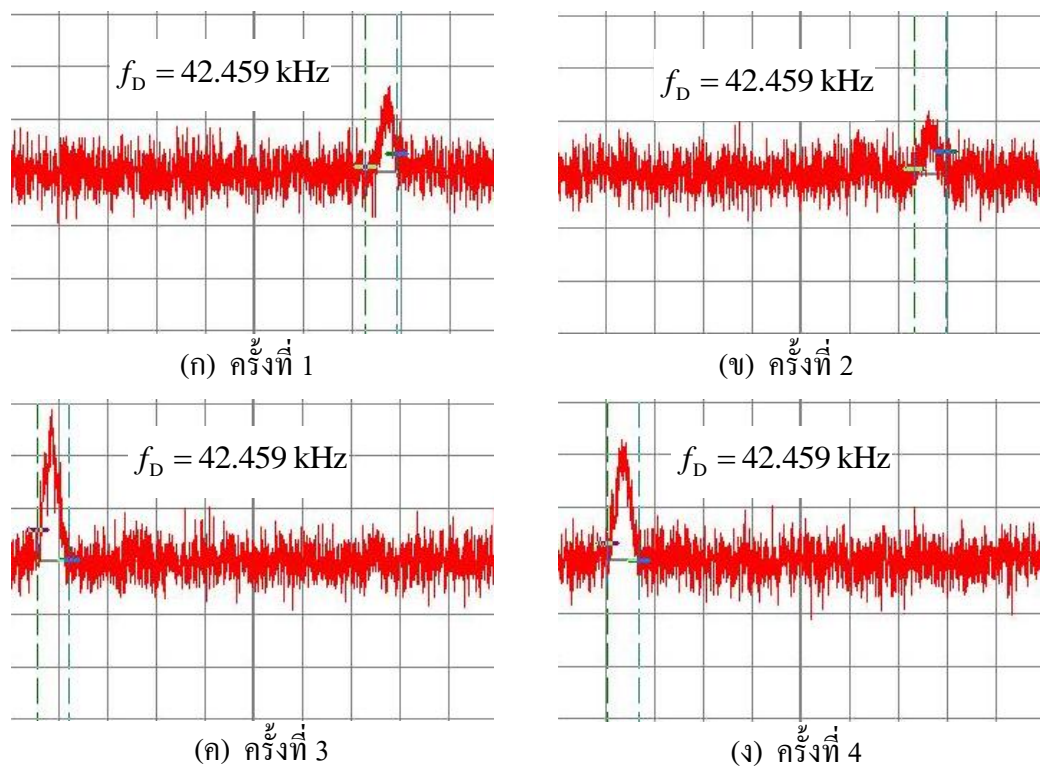
รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำภายในกระบอกตวงเทียบกับเวลา ณ ระดับอัตราการไหล U_3

ค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.26 – 4.28 จะแสดงถึงอัตราการไหล โดยตารางสรุปอัตราการไหลที่แต่ละระดับแสดงดังตารางที่ 4.11 อัตราการไหลที่หาได้จากวิธีการจับเวลานี้กำหนดให้เป็นค่าที่แท้จริง (Theoretical result)

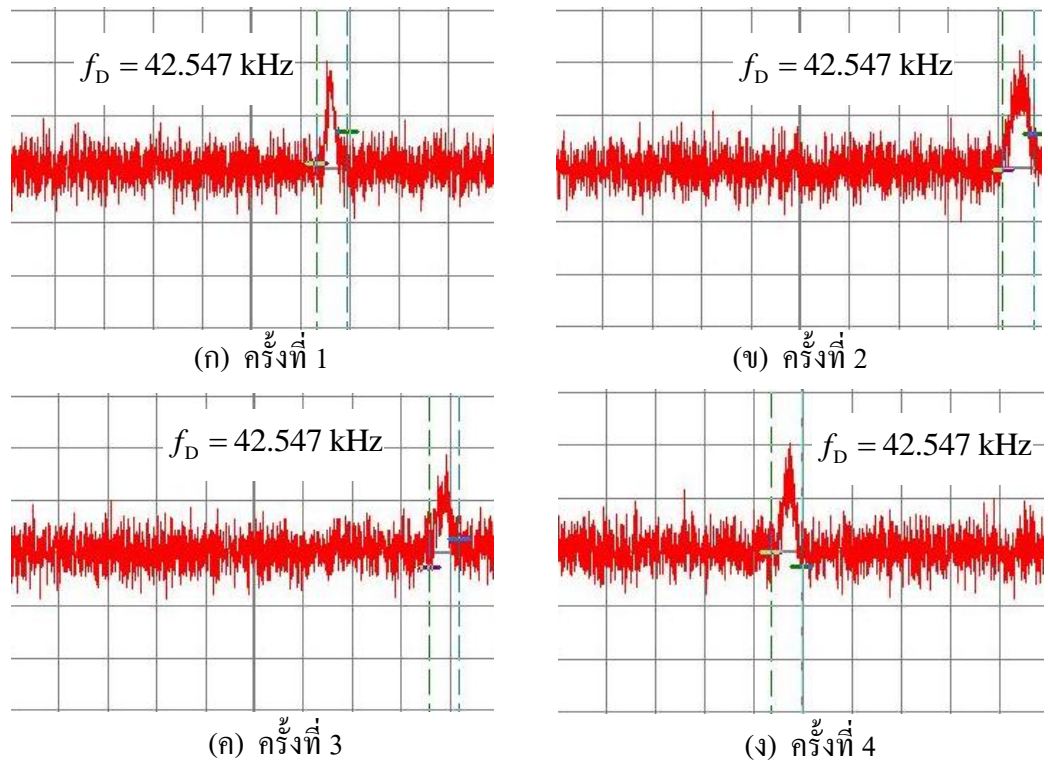
ตารางที่ 4.11 แสดงอัตราการไหลของแต่ละระดับอัตราการไหลที่ได้จากการสุ่มปรับวาล์ว

ระดับอัตราการไหล	อัตราการไหล (mL/s)
U_1	26.728
U_2	26.781
U_3	27.271

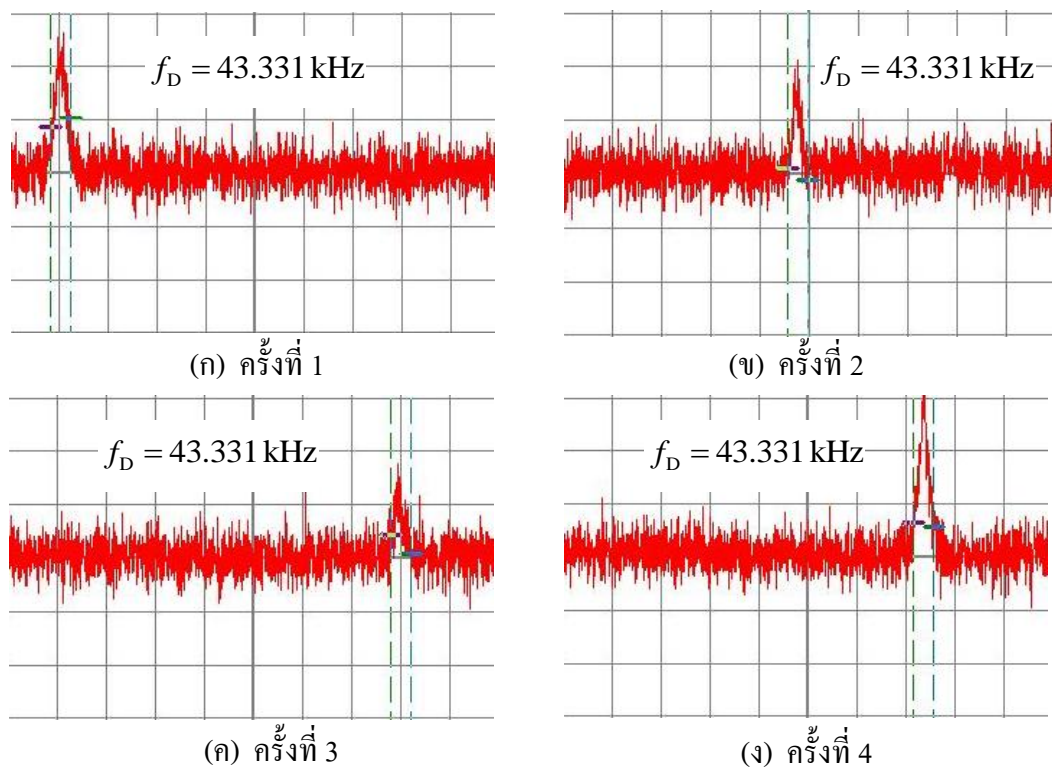
จากการทดลอง เมื่อทำการปรับอัตราการไหลให้คงที่ในแต่ละระดับตามตารางที่ 4.11 แล้วบันทึกภาพสัญญาณที่แต่ละระดับของอัตราการไหลด้วยโปรแกรม SP107E โดยที่แต่ละระดับอัตราการไหลจะทำการบันทึกสัญญาณทั้งหมด 4 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าความถี่ดอปเพลอร์ พบว่าได้ภาพสัญญาณที่มีสัญญาณพัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 – 4.31



รูปที่ 4.29 แสดงภาพสัญญาณที่บันทึกได้ที่ระดับอัตราการไหล U_1 เมื่อแกน x เป็นแกนของเวลา (ms) และแกน y เป็นแกนของความเข้มแสง (a.u.)



รูปที่ 4.30 แสดงภาพสัญญาณที่บันทึกได้ที่ระดับอัตราไหล U_2 เมื่อแกน x เป็นแกนของเวลา (ms) และแกน y เป็นแกนของความเข้มแสง (a.u.)



รูปที่ 4.31 แสดงภาพสัญญาณที่บันทึกได้ที่ระดับอัตราไหล U_3 เมื่อแกน x เป็นแกนของเวลา (ms) และแกน y เป็นแกนของความเข้มแสง (a.u.)

ซึ่งค่าเฉลี่ยของความถี่คือปเฟลอร์จากภาพสัญญาณที่แต่ละระดับอัตราการไหลจากการสู่มปรับวาล์วสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงอัตราการไหลกับความถี่คือปเฟลอร์จากภาพสัญญาณที่แต่ละระดับอัตราการไหลจากการสู่มปรับวาล์ว

ระดับอัตราการไหล	อัตราการไหล (mL/s)	ความถี่คือปเฟลอร์ (kHz)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย
U_1	26.728	42.459	42.459	42.459	42.459	42.459
U_2	26.781	42.547	42.547	42.547	42.547	42.547
U_3	27.271	43.331	43.331	43.331	43.331	43.331

ผลการทดลองที่ได้สามารถคำนวณหาอัตราการไหลจากสมการความสัมพันธ์โดยใช้สมการที่ (4.1) และความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์โดยใช้สมการที่ (3.1) แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 แสดงอัตราการไหลของแต่ละระดับอัตราการไหลจากการสู่มปรับวาล์วที่หาจากวิธีการจับเวลาเทียบกับอัตราการไหลที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ และความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์

ระดับอัตราการไหล	อัตราการไหลจาก วิธีการจับเวลา (mL/s)	อัตราการไหลที่คำนวณ จากสมการความสัมพันธ์ (mL/s)	ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (%)
U_1	26.728	26.749	0.079
U_2	26.781	26.804	0.086
U_3	27.271	27.298	0.099

จากผลการทดสอบสมการความสัมพันธ์ในตารางที่ 4.13 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 0.1 จึงกล่าวได้ว่าระบบการวัดอัตราการไหลของของไหลโดยใช้วิธีเลเซอร์คือปเฟลอร์ที่สร้างขึ้นและสมการความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (4.1) สามารถนำไปใช้หาอัตราการไหลเชิงปริมาตรได้จริง และให้ผลที่มีความถูกต้องสูงมาก