

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ก่อนที่จะแสดงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ผู้ทำการวิจัยจะแสดงข้อมูลพื้นฐาน เช่นค่าคงที่ที่ใช้คำนวณ ความละเอียดของการใช้อุปกรณ์การทดลอง และลักษณะของพื้นผิวของไมโครเซนแนล เพื่อเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งจะนำไปสู่ความถูกต้องน่าเชื่อถือของผลการทดลอง ดังนี้

4.1 ค่าคงที่ในการทดลอง

ค่าคงที่ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

- g ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง เลือกใช้ค่าตามห้องปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นฐานคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มีค่า $9.7843 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
- ρ_{Hg} ความหนาแน่นปรอทที่อุณหภูมิ 25 เซลเซียส มีค่า $13,546.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- ρ_{Water} ความหนาแน่นน้ำที่อุณหภูมิ 25 เซลเซียส มีค่า $998 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- A_{syring} พื้นที่หน้าตัดของกระบอกฉีดยาความจุ 1 มิลลิลิตร มีค่า $1.67 \pm 0.01 \times 10^{-5}$ ตารางเมตร
- D_{tube} เส้นผ่านศูนย์กลางท่อนำของไหล มีค่า 0.7 มิลลิเมตร
- T_{room} อุณหภูมิที่ใช้ในห้องทดลองปรับอากาศ มีค่า 25 เซลเซียส (298.5 เคลวิน)
- η ความหนืดของน้ำ (dynamic viscosity) ที่อุณหภูมิ 25 เซลเซียส มีค่า $0.8904 \text{ mPa} \cdot \text{s}$

4.2 ความละเอียดของเครื่องมือวัด

ความละเอียดของการถ่ายภาพวัดระยะทาง

เนื่องจากการติดตามปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงความดันไม่สามารถทำได้ในทันทีพร้อมกันหลายจุด จึงต้องใช้การถ่ายภาพและวัดระยะทาง ในการหาค่าความดันและ อัตราการไหลดังที่กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อ 3.12 และ 3.21 ด้วยความแตกต่างกันของอุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายภาพการทดลอง จึงสรุปการหาค่าความละเอียดและค่าคลาดเคลื่อนจากการวัดของกล้องแต่ละตัว ไว้ดังนี้

กล้อง *Fuji Finepix E510*

การวัดระยะทางจากภาพบริเวณรอยต่อระหว่างน้ำและอากาศ ในรูปที่ 3.15 ได้ความละเอียด $6 \mu\text{m}/\text{pixel}$ เป็นผลทำให้เมื่อวัดระยะคลาดเคลื่อนไป $\pm 1 \text{ pixel}$ ซึ่งผลคลาดเคลื่อนดังกล่าวประมาณจากความผิดพลาดที่เป็นไปได้โดยการวัดของผู้ทำการทดลองซึ่งมีโอกาสผิดพลาด

ได้มากเนื่องจากการแยกความต่างสีบริเวณเส้นขอบภาพในระดับ *pixel* นั้นเป็นไปได้ยากด้วย เพราะสีของรูปภาพบริเวณใกล้เคียงกันนั้นไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน จึงได้ทำการทดลองเก็บ ข้อมูลมากจุดขึ้น และประมาณว่าค่าที่ผิดพลาดจากผู้ทำการทดลองจะทำให้วัดค่าระยะทางคลาดเคลื่อน ไป $\pm 1 \text{ pixel}$ ซึ่งเป็นผลทำให้ระยะที่ของเหลวเคลื่อนที่ไปในท่อคลาดเคลื่อนไป $\pm 6 \mu\text{m}$

กล้อง Sony Cyber Shot 4.1 M pixel

การวัดระยะทางจากภาพบริเวณรอยต่อระหว่างน้ำและอากาศ (ใช้ถ่ายภาพรอยต่อระหว่าง น้ำและอากาศที่หลุดจากกรอบภาพของกล้อง Fuji Finepix E510) ในรูปที่ 3.15 เมื่อพิจารณา เช่นเดียวกันจะ ได้ว่าความละเอียดของการวัดจะอยู่ที่ $25 \mu\text{m} / \text{pixel}$

กล้อง Cannon IXUS 65

-วัดระดับความสูงจากภาพระดับน้ำที่ความละเอียด $\approx 132 \mu\text{m} / \text{pixel}$ ทำให้ประมาณได้ ว่าค่าคลาดเคลื่อนจากการวัดค่า *pixel* คลาดเคลื่อนไป ± 1 จุด โดยใช้สมการ (3.2) จะทำให้ความ ดันคลาดเคลื่อนไป $\pm 1.5 \text{ Pa}$

-วัดระดับความสูงจากภาพระดับปรอทที่ความละเอียด $\approx 132 \mu\text{m} / \text{pixel}$ ทำให้ประมาณ ได้ว่าค่าคลาดเคลื่อนจากการวัดค่า *pixel* คลาดเคลื่อนไป ± 1 จุด จะทำให้ความดันคลาดเคลื่อนไป $\pm 17.5 \text{ Pa}$ แต่ทว่าสิ่งที่นำมาคำนวณผลต่างความดันคือผลต่างระดับปรอททั้งสองด้านของกระเปาะ แก้วดังนั้นการคำนวณค่าผิดพลาดรวมโดยประมาณของผลต่างความดันของระดับปรอทจะมีค่า $\pm 27.4 \text{ Pa}$

ความละเอียดของเครื่องวัดความดัน

ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.13 ค่าความละเอียดของเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นสามารถวัดได้ ละเอียดในระดับ 0.01 มิลลิเมตรปรอท พิจารณาจากรูปที่ 3.9 ทว่ากระบวนการแปลงค่าสัญญาณ จากอะนาล็อกเป็นตัวเลขดิจิทัล นั้นมีค่าคลาดเคลื่อนแบบสุ่มตาม เอกสารของ (Linear Tech, 1994) จึงประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดเป็น ± 0.1 มิลลิเมตรปรอท หรือ $\pm 13.3 \text{ Pa}$ เพื่อ ความถูกต้องในการวัด

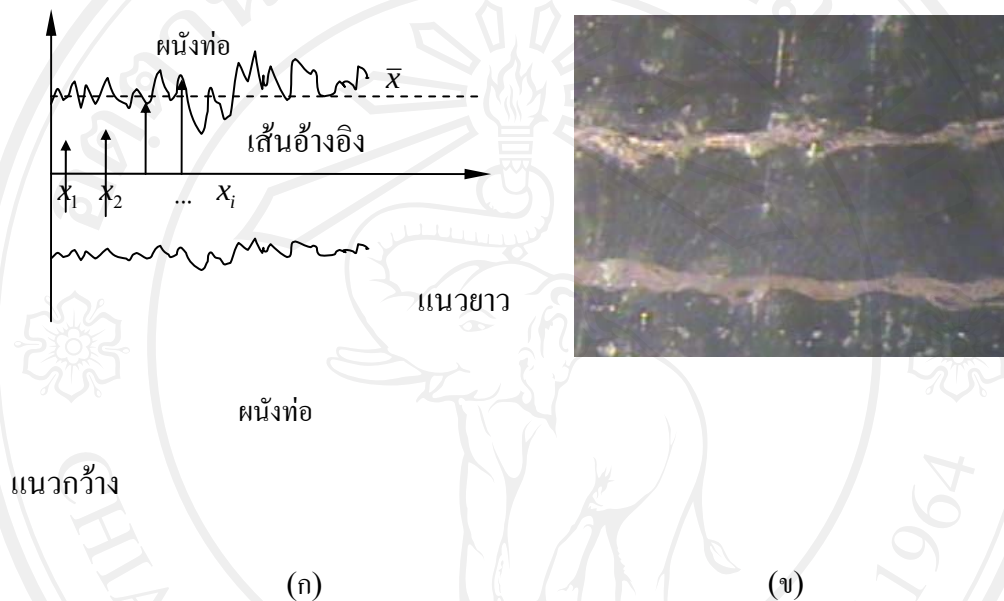
4.3 พื้นผิวของไมโครแฮนเนล

สภาพพื้นผิวของไมโครแฮนเนลที่สร้างขึ้นจะถูกตรวจสอบและวัดความกว้าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์จากเครื่องวัดความแข็งวัสดุ (MXT-CX digital microhardness tester) ซึ่งสามารถวัดระยะ ตั้งฉากกับผนังท่อที่จุดต่างๆที่ห่างกันเป็นระยะทางคงที่ ไปยังเส้นอ้างอิงในแนวนานกับผนังท่อ โดยประมาณว่าความขรุขระมีลักษณะสม่ำเสมอทั้งตามแนวความสูงและตามแนวของผนังท่อ ซึ่ง จะใช้ตัวแทนการวัดตามแนวยาวนานกับผนังท่อ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุด

ข้อมูลนี้เองคือค่าความขรุขระเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square roughness: R_{rms}) ซึ่งแสดงถึงค่าความยาวที่เบี่ยงเบนไปจากเส้นแนวเฉลี่ยของผนังท่อได้ ดังสมการ (4.1)

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.1)$$

เมื่อ N คือจำนวนจุดข้อมูลที่ทำการวัด x_i คือระยะห่างตั้งฉากจากเส้นอ้างอิงที่จุดใดๆ และ $\bar{x}$ คือค่าเฉลี่ยระยะทางจากระยะที่วัดได้จาก จุดข้อมูลทั้งหมด (Gadelmawla et. al, 2002)



รูปที่ 4.1 (ก) แสดงการวัดระยะทางตามแนวกว้างและยาวของไมโครเซนแนลเพื่อคำนวณค่าความขรุขระ R_{rms} (มองจากด้านบน)

(ข) ลักษณะพื้นผิวของไมโครเซนแนลถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ขยาย 250 เท่าของไมโครเซนแนลความกว้างเฉลี่ย $720 \mu m$

สำหรับผลการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของแต่ละขั้นตอนของการสร้างไมโครเซนแนลที่มีขนาดต่างๆกันตามลำดับ จะแสดงดังตาราง 4.1 จากตารางค่าความกว้างหลังจากแม่แบบผ่านกระบวนการต่างๆ จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับขนาดมาตรฐานการพิมพ์ที่ 1 พอยต์ (point) โดย 1 พอยต์ เท่ากับความยาว 352.7 ไมโครเมตร สังเกตได้จากตัวเลขค่าเฉลี่ยร้อยละท้ายตาราง ซึ่งแม่แบบสำหรับหล่อ PDMS จะมีขนาดลดลงจากขนาดที่ออกแบบไว้ประมาณ 30% ซึ่งจะทำให้ขนาดของไมโครเซนแนลมีค่าลดลงจากที่ออกแบบไว้โดยถือว่าเป็นขนาดเดียวกัน และสาเหตุที่เลือกวัดความ

ขรุขระของแม่แบบเนื่องมาจากสามารถสังเกตได้ง่ายและชัดเจนกว่า PDMS ที่โปร่งใสและยึดหยุ่นได้บ้าง

สำหรับค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณจากการวัดความกว้างของไมโครเซนแนล โดยมีระยะห่างแต่ละจุดจำนวน 5 จุดไปตามแนวยาวของท่อประมาณ 200 ไมโครเมตรของแม่แบบแต่ละขนาด จะประมาณผลเป็นค่าความขรุขระเฉลี่ยกำลังสองเนื่องจากข้อจำกัดของเวลาที่ใช้วัด โดยที่ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือมีค่า ± 0.1 ไมโครเมตร เมื่อพิจารณาความขรุขระที่เกิดขึ้นจะพบว่าความขรุขระของแม่แบบจะมีค่าเพิ่มหลังจากผ่านกระบวนการล้างแม่แบบด้วยสารละลายเบส (หัวข้อ 3.36) ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความขรุขระหลังจากกัดกรด

ตาราง 4.1 ความกว้างเฉลี่ยจากการวัดขนาดของแม่แบบไมโครเซนแนลด้วยกล้องจุลทรรศน์ และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความกว้างที่คำนวณได้จากตำแหน่งการวัดต่างๆ ในขั้นตอนหลังจากการถ่ายฟิล์ม การล้างสารไวแสงออก และหลังการกัดกรดตามลำดับ

ความกว้าง (point)	ความกว้าง (μm)	ความกว้างบนฟิล์มแม่แบบ (μm)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)	ความกว้างหลังล้างฟิล์มไวแสงออก (μm)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)	ความกว้างหลังกัดกรด (μm)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)
¼	88	83.3	0.24	-	-	-	-
½	176	176.9	0.32	108.8	5.83	108.7	3.25
¾	265	261.0	0.63	195.6	7.36	178.9	6.28
1	353	325.6	0.46	270.9	3.12	227.2	6.81
1 ¼	441	414.4	0.75	360.3	5.66	326.1	4.66
1 ½	529	500.84	0.98	422.6	1.61	394.4	7.57
ขนาดเฉลี่ย	100%	95.7%	(-4.26%)	74.8%	(-25.2%)	68.4%	(-31.6%)

(หมายเหตุ “-” หมายถึงแม่แบบขาดจากกันจึงไม่ทำการวัด)

เมื่อพิจารณาสัดส่วนของความขรุขระกับขนาดความกว้างของท่อจะพบว่าค่าความขรุขระจะมีค่าอยู่ในช่วง 3-8 ไมโครเมตร เมื่อทดลองนำค่าความขรุขระไปเขียนกราฟกับขนาดของไมโครเซนแนลเพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ว่าในแต่ละขั้นตอนขนาดความกว้างมีผลต่อความขรุขระใน

รูปแบบเชิงเส้นหรือไม่ โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient : R) ที่ได้จาก การทดลองซึ่ง $-1 < R < 1$ โดยที่

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2\right)\left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2\right)}} \quad (4.2)$$

เมื่อ x, y เป็นตัวแปรอิสระ และ $\bar{x}, \bar{y}$ เป็นค่าเฉลี่ยของทั้งสองตัวแปรตามลำดับ

ในความเป็นจริงไม่สามารถเก็บข้อมูลจำนวนมากจนครบทุกค่าจึงต้องอนุมานค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่แท้จริง ρ_s โดยเงื่อนไขที่ตัวแปร x และ y ไม่ขึ้นต่อกันจะได้ว่า $\rho_s = 0$ ส่วนสมมติฐานรองคือ $\rho_s \neq 0$ จากนั้นกำหนดระดับนัยสำคัญ 10% (หมายถึงมีโอกาส 10% ที่จะปฏิเสธว่า $\rho_s = 0$ ทั้งๆที่สมมติฐานนี้เป็นจริง) เนื่องจากทำการวัดน้อยครั้งจึงใช้สถิติ T-test ในการทดสอบสมมติฐานดังนี้

1. กำหนดสมมติฐานหลัก และรอง $H_0 : \rho_s = 0$, $H_1 : \rho_s \neq 0$
2. อาณาเขตวิกฤตค่านัยสำคัญที่ $\alpha = 0.1$ โดยมีองศาอิสระ $d.f. = N - 2$ จะอยู่ในช่วง $t < -1.701, t > 1.701$

$$3. \text{ ตัวสถิติทดสอบ } t = \frac{R}{\sqrt{\frac{1-R^2}{N-2}}} \quad (4.3)$$

ตาราง 4.2 ค่าสถิติ t_{cal} ที่คำนวณได้จาก (4.2) ของความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของท่อที่วัดจากแม่แบบกับค่าความขรุขระในกระบวนการต่างๆ

หลังจากถ่ายฟิล์ม	หลังจากล้างฟิล์มไวแสงออก	หลังจากกัดกรด
3.868	1.671	1.429

จากตาราง 4.2 เมื่อพิจารณาค่าสถิติ t_{cal} พบว่าค่า t_{cal} อยู่ในช่วงวิกฤต แสดงว่าต้องปฏิเสธว่าค่าความกว้างของแม่แบบกับความขรุขระไม่ขึ้นต่อกัน นั่นคือค่าความขรุขระของฟิล์มต้นแบบที่ถ่ายด้วยเทคนิค Image setter กับความกว้างขึ้นต่อกันเป็นเชิงเส้นซึ่งมีข้อสังเกตว่าอาจเกิดจากเครื่องฉายฟิล์ม และการเล็งวัดค่าความกว้างของผู้ทดลอง แต่อย่างไรก็ตามช่วงของค่าดังกล่าวมีค่าความขรุขระน้อยในระดับ 0.1 - 0.9 ไมโครเมตร ไม่มากเท่าขั้นต้นตอนจาก การล้างฟิล์มไวแสงออก และหลังจากการกัดกรด โดยมีค่าความขรุขระของท่อประมาณ 3-8 ไมโครเมตร เมื่อพิจารณาค่า t_{cal} ใน

ตาราง 4.2 จะได้ว่าค่าความขรุขระกับความกว้างของแม่แบบจะไม่ขึ้นต่อกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.1 โดยมีโอกาส 90% ที่จะยอมรับว่าค่าความขรุขระและความกว้างขึ้นต่อกัน

ซึ่งสรุปว่าความขรุขระที่เกิดขึ้นหลังจากการล้างฟิล์มไวแสงออกและการกัดกรวด เกิดขึ้นอย่างสุ่มไม่ขึ้นกับค่าความกว้างของท่อ เนื่องจากค่าความขรุขระที่เบี่ยงเบนไปมีลักษณะอยู่ในช่วงค่าคงที่ค่าหนึ่ง

4.4 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความต้านทานการไหล R_h ให้คงที่ค่าหนึ่ง โดยให้อัตราการไหลของปั๊ม Q ผ่านไมโครเซนแนลเปลี่ยนเป็นค่าต่างๆ แล้ววัดผลต่างความดัน Δp ระหว่างปลายทั้งสองด้านของไมโครเซนแนล

4.4.1 รูปแบบการไหลที่วัดได้จากระบบวัดที่ใช้มานอมิเตอร์และการถ่ายภาพวัดระยะทาง ผลการทดลองที่ได้จากชุดการทดลองที่จัดขึ้นดังรูปที่ 3.14 เมื่อทำการวัดค่าความดันและอัตราการไหลด้วยมานอมิเตอร์โดยใช้วิธีถ่ายภาพด้วยอัตราคงที่แล้ววัดระยะทางเพื่อคำนวณค่าผลต่างความดัน Δp และวัดอัตราการไหลในท่อ โดยกำหนดให้ Q_1 เป็นอัตราการไหลเข้าไปในมานอมิเตอร์ Q_2 เป็นอัตราการไหลผ่านไมโครเซนแนล และ Q_{total} คืออัตราการไหลรวมซึ่งต้องมีค่าเท่ากับอัตราการไหลออกจาก syringe pump

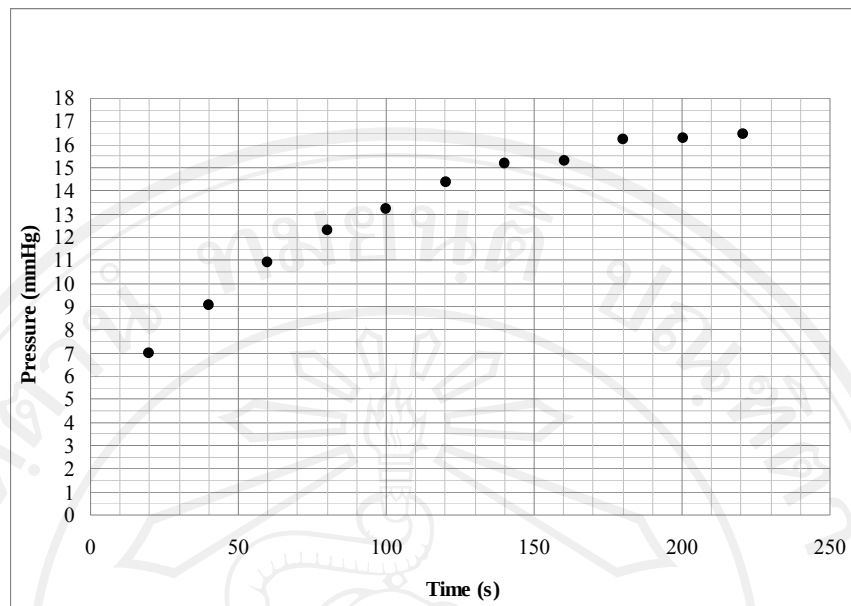
เมื่อเขียนกราฟระหว่างผลต่างความดัน Δp กับเวลา t และอัตราการไหลที่จุดต่างๆ จะได้กราฟลักษณะเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.2 สำหรับกรณีนี้ได้พิจารณาเก็บผลการทดลองถึงระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลแล้วเท่านั้นเนื่องจาก การทดลองดังกล่าวใช้เวลาในการเก็บข้อมูลและวัดค่ามาก และการเปลี่ยนแปลงของระบบยังคงประพุดิตัวเช่นเดิม ในที่นี้จึงเลือกนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ผลเพียงหนึ่งตัวอย่าง โดยมีเงื่อนไขการทดลอง ดังกล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.1 โดยที่กำหนดให้

อัตราการปั๊มของไหล $\tau = 10 \text{ ms/step}$

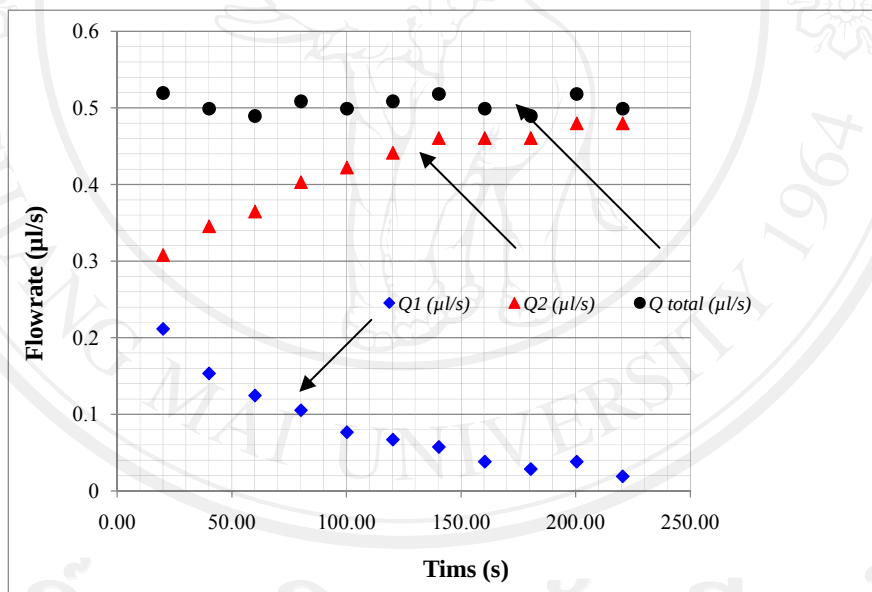
อัตราการไหลจากการคำนวณด้วยสมการ (3.3) จะได้ $Q_{total}^{cal} = 0.50 \pm 0.01 \text{ } \mu\text{l/s}$

ขนาดเฉลี่ยของไมโครเซนแนล $327 \text{ } \mu\text{m} \times 47.7 \text{ } \mu\text{m} \times 14 \text{ mm}$

จะได้กราฟดังรูปที่ 4.2



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 (ก) กราฟระหว่างผลต่างความดันกับเวลา (ข) กราฟระหว่างอัตราการไหลกับเวลา

จากรูปที่ 4.2 จะพบว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุล ค่าความดันและอัตราการไหลจะถูกล็อกค่าหนึ่ง โดยความดันสุดท้ายจะมีค่า $(2.35 \pm 0.03) \times 10^3 \text{ Pa}$ ส่วนอัตราการไหลผ่านไมโครแชนแนลจะถูกล็อกอัตราการไหลรวมของระบบ Q_{total}^{exp} หรืออัตราการไหลของปั๊ม จากกราฟซึ่งหาค่าเฉลี่ยแล้วคือ

$(5.04 \pm 0.03) \times 10^{-1} \mu\text{l/s}$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากพารามิเตอร์ของปั๊มซึ่ง Q_{total}^{cal}
 $= (5.01 \pm 0.01) \times 10^{-1} \mu\text{l/s}$

เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของผลการทดลองกับกฎของ Poiseuille (2.174) หรือ
 เทียบเท่ากับการพิจารณาค่าความต้านทานการไหลใน EC theory เมื่อหาอัตราส่วนความดันกับอัตราการ
 การไหลหรือค่าความต้านทานการไหล จะได้ว่า

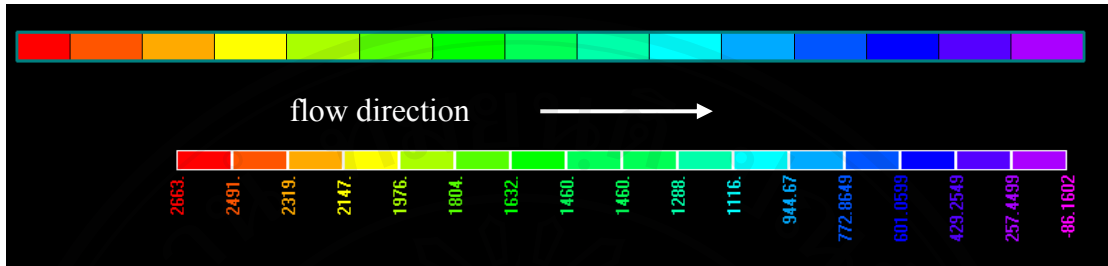
$R_h = \Delta p / Q = (2.35 \pm 0.03) \times 10^3 \text{ Pa} / (5.04 \pm 0.03) \times 10^{-1} \mu\text{l/s} = (4.66 \pm 0.06) \times 10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{s} / \text{m}^3$
 เปรียบเทียบกับการคำนวณค่า R_h จากสมการ (2.80) โดยใช้ขนาดไมโครเซนแนลที่กำหนดไว้
 ข้างต้นจะได้ว่า $R_h = 4.662 \times 10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{s} / \text{m}^3$ ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งในที่นี้
 จะประมาณว่าความขรุขระมีผลน้อยมากกับการไหลระบบไมโครฟลูอิดิกชิปซึ่งสร้างจากเทคนิค
 EWBT หรืออีกนัยหนึ่งคือไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือที่มีอยู่

เมื่อพิจารณาตัวเลขเรย์โนลด์ Re ซึ่งคำนวณจากสมการ (2.48) และ (2.49) จะได้ว่า การไหล
 ในไมโครเซนแนลจะมีเลขเรย์โนลด์ประมาณ 3 ซึ่งอยู่ในช่วงการไหลแบบราบเรียบแต่เมื่อพิจารณา
 การประมาณทางทฤษฎีแล้วสัดส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงหนืดไม่ได้มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าแรง
 เฉื่อยของของไหลมีค่ามากกว่าแรงหนืด เพื่อศึกษาเพิ่มเติมจึงใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์
 (computer simulation) ในรูปแบบ 2 มิติมาช่วยทำความเข้าใจให้เห็นภาพลักษณะการไหลชัดเจนขึ้น
 งานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Easy FEM (ปราโมทย์, 2008) ในการจำลองการไหลในระบบ
 2 มิติ ของของไหลหนืดบีบอัดไม่ได้ (incompressible viscous flow) โดยเทียบสัดส่วนของระบบ
 จำลองกับระบบจริงผ่านเลขเรย์โนลด์ และอัตราส่วนกว้างยาวเดียวกัน ซึ่งผลสุดท้ายจะได้การลดลง
 ของความดันจากปลายด้านหนึ่งของไมโครเซนแนลไปยังอีกปลายด้านหนึ่ง ดังรูปที่ 4.3 (ก) และ
 ลักษณะของการกระจายความเร็วเป็นไปตามรูปที่ 4.3 (ข)

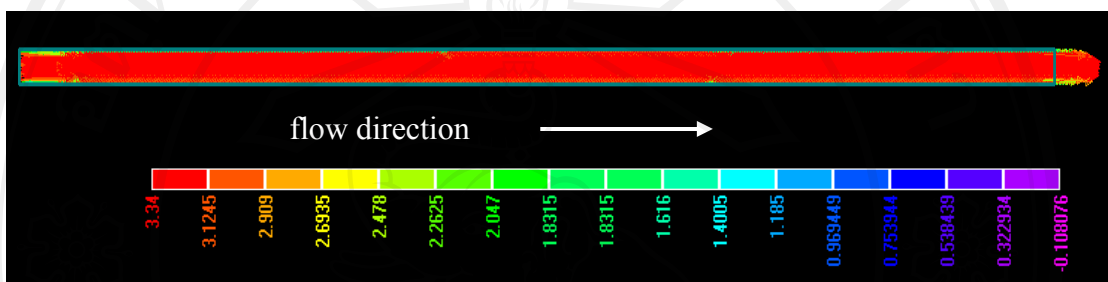
เมื่อสังเกตภาพขยายจะพบว่าความเร็วตามแนวยาวของไมโครเซนแนล และความเร็วทาง
 แนวขวางของไมโครเซนแนล มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งแสดงถึงผลการมีอยู่ของพจน์ไม่เชิงเส้น หรือ
 อาจสังเกตได้ที่บริเวณปลายทางออก ของไมโครเซนแนลในรูปที่ 4.3 (ข) ที่ลักษณะของความเร็ว
 คล้ายรูปพาราโบลาแม้ไม่เห็นอย่างชัดเจน แต่จากการทดลองพบว่าที่เลขเรย์โนลด์ในช่วงที่แรงหนืด
 และแรงเฉื่อยมีค่าใกล้เคียงกันที่ระบบสมดุลยังเป็นไปตาม กฎของ Poiseuille ซึ่งพิจารณาได้จากค่า
 ความต้านทานการไหล R_h ที่เป็นค่าคงที่การแปรผันตรงของความดันที่เพิ่มขึ้นกับอัตราการไหล

ส่วนลักษณะของความดันทางด้านทางเข้าไมโครเซนแนล และอัตราการไหลผ่านไมโคร
 เซนแนลของน้ำที่มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงภาวะสมดุล ซึ่งสวนทางกับอัตราการไหลของน้ำ ในแนวตั้งที่
 เชื่อมต่อเข้ากับมานอมิเตอร์ (รูปที่ 3.14) ยังคงเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์มวลโดย $Q_{total} = Q_1 + Q_2$

ดังรูปที่ 4.3 (ข) เมื่อพิจารณาลักษณะการเพิ่มขึ้นของความดันกับเวลาจะพบว่าคล้ายกับค่าความต่างศักย์ในวงจรอค์ประจุ ซึ่งจะทดลองให้เห็นภาพชัดเจนในหัวข้อต่อไป



(ก)

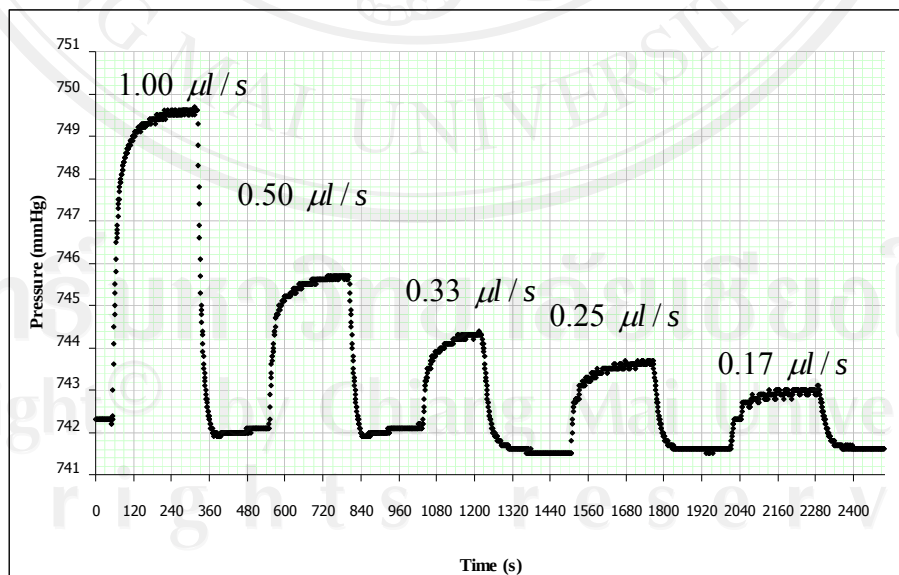


(ข)

รูปที่ 4.3 (ก) แสดงค่าความดันที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่เลขเรย์โนลด์ 3

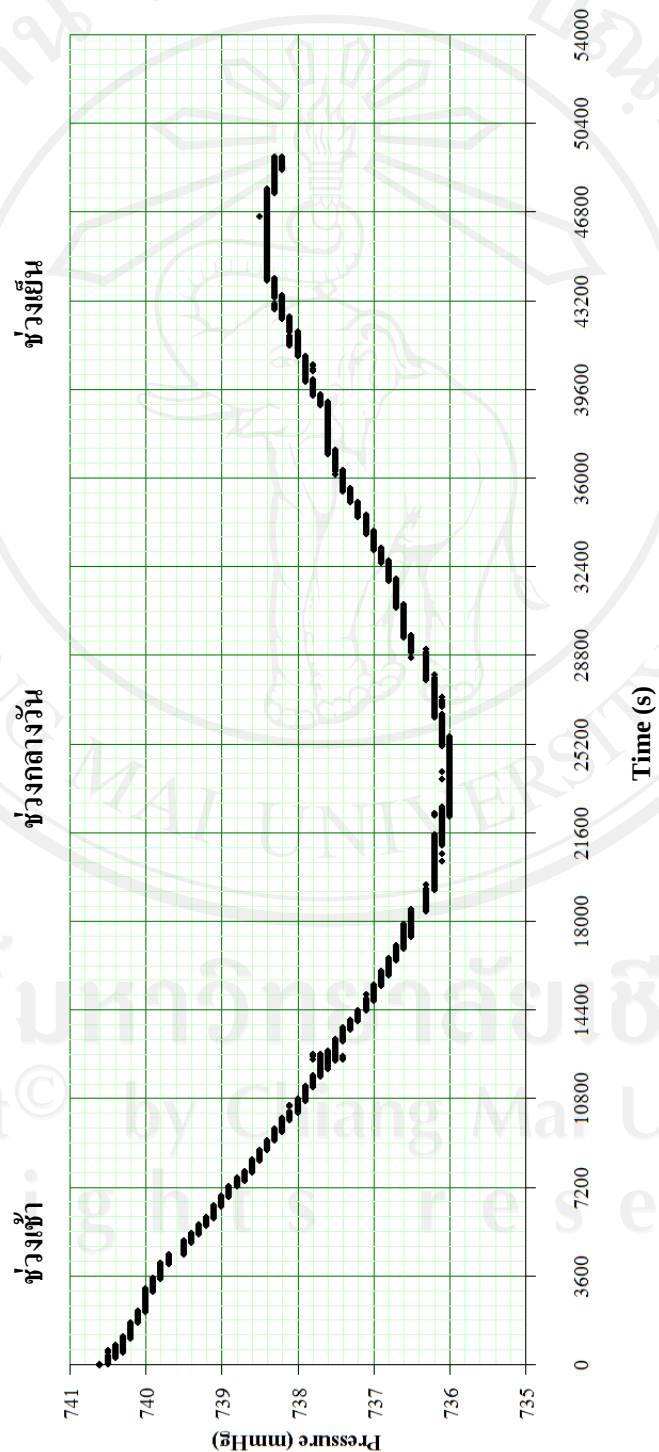
(ข) แสดงลักษณะของสนามความเร็ว (velocity field) ในไมโครเซนแนล

4.4.2 รูปแบบผลต่างความดันที่วัดได้จากเครื่องวัดความดัน



รูปที่ 4.4 แสดงค่าความดันที่วัดได้จากเครื่องอ่านค่าความดันที่ประดิษฐ์ขึ้น เมื่อขับปั๊มและหยุดปั๊มน้ำด้วยอัตราการไหล $1.00 \mu\text{l/s}$, $0.50 \mu\text{l/s}$, $0.33 \mu\text{l/s}$, $0.25 \mu\text{l/s}$, $0.17 \mu\text{l/s}$ ในไมโครเซนแนลที่มีพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมตรง

จากรูปที่ 4.4 พบว่าทุกอัตราการไหลค่าความดันจะเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่งเสมอไม่ว่าอัตราการไหลจะมีค่าแตกต่างกันไปก็ตาม แต่มีข้อน่าสังเกตคือระดับความดันของระบบที่ลดลงที่สภาวะสมดุลกลับมีค่าแตกต่างกันดังรูปที่ 4.4 ในที่นี้ตั้งสมมติฐานว่าเป็นผลจากค่าความดันบรรยากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงไปไม่คงที่ตลอด ดังที่ได้ทำการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อยืนยันสมมติฐานดังกล่าว ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟความดันบรรยากาศในห้องทดลองที่เปลี่ยนแปลงไปในระยะเวลา 13 ชั่วโมง 40 นาที

จากรูปที่ 4.4 เมื่อความดันบรรยากาศมีการเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา ดังนั้นค่าผลต่างความดันจะใช้ค่าผลต่างระหว่างความดันที่สภาวะสมดุลกับความดันต่ำสุดเมื่อปิดปั๊มเนื่องจากเป็นจุดที่มีเวลาไม่ต่างกันมากนัก เมื่อหาค่าสัดส่วนระหว่าง ผลต่างความดันและอัตราการไหลหรือค่า R_h ของไมโครเซนแนลอันเดียวกันจะได้ผลใกล้เคียงกันดังตาราง 4.3

ตาราง 4.3 แสดงค่าผลต่างความดันทั้งสองปลายของไมโครเซนแนล อัตราการไหลในไมโครเซนแนล และความต้านทานการไหลที่คำนวณได้จากค่าทั้งสองผ่านสมการ (2.174)

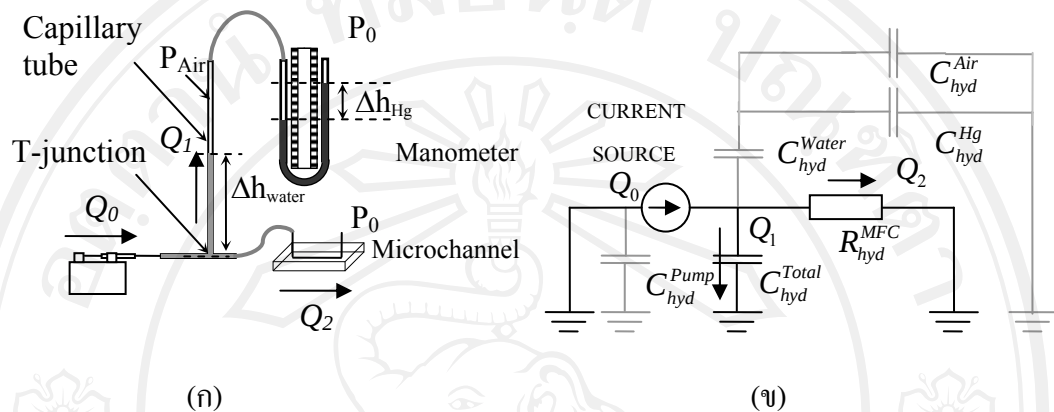
ผลต่างความดัน วัดจาก เครื่องวัดความดัน ($\times 10^3 \text{ Pa}$)	อัตราการไหลที่ สภาวะสมดุล ($\mu\text{l/s}$)	ความต้านทานการไหล R_h ($\times 10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$)
1.026 ± 0.013	1.00 ± 0.01	1.02 ± 0.02
0.507 ± 0.013	0.50 ± 0.01	1.01 ± 0.03
0.360 ± 0.013	0.34 ± 0.01	1.06 ± 0.04
0.267 ± 0.013	0.25 ± 0.01	1.06 ± 0.05
0.173 ± 0.013	0.17 ± 0.01	1.04 ± 0.08

ดังนั้นจะสามารถใช้เพียงการวัดค่าผลต่างความดันระหว่างปลายทั้งสองของไมโครเซนแนลจากกราฟความดันกับเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลความดันคงที่ เป็นพารามิเตอร์ในการหาค่าผลต่างความดัน และความต้านทานการไหลที่อัตราการไหลคงที่ได้

จากกราฟความดันกับเวลาที่วัดได้ด้วยวิธีการทั้งสองพบว่าลักษณะกราฟผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกันคือมีความดันเพิ่มขึ้นแล้วคงที่ดังรูปที่ 4.2 (ก) และ 4.4 เมื่อทำการคำนวณและแปรผลการทดลองที่ระบบสมดุลพบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับกฎของ Poiseuille และการคำนวณเป็นอย่างดี เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไปสำหรับชุดการทดลองซึ่งใช้ syringe pump ขับดันของไหลด้วยอัตราการไหลคงที่จะสามารถหาค่าความต้านทานการไหลได้จากการวัดเพียงค่าผลต่างความดัน เมื่อกำหนดอัตราการไหลของปั๊มคงที่

สำหรับลักษณะของค่าความดันที่เพิ่มขึ้นก่อนที่ระบบจะเข้าสู่สมดุลจะวิเคราะห์และอธิบายผลการทดลองด้วย EC theory เนื่องจากการวัดความดันบริเวณทางเข้าของไมโครเซนแนลด้วยการวัดความดันทั้งสองแบบโดยต่อท่อออกมาจากระบบการไหลของไมโครเซนแนลนั้น ให้ระบบ

สูญเสียปริมาตรเข้าไปในท่อของส่วนวัดความดันซึ่งทำให้ระบบเปลี่ยนแปลงไป หรือการวัดเช่นนี้เป็นการรบกวนระบบ เมื่อลดทอนรายละเอียดจากรูปที่ 3.13 ลง จะได้วัฏจักรและกำหนดตัวแปรต่างๆ ดัง 4.6



รูปที่ 4.6 (ก) แผนภาพการทดลองที่ลดทอนรายละเอียดจากรูปที่ 3.13 และกำหนดตัวแปร
(ข) แผนภาพวงจรสมมูลที่แปลงมาจากภาพการทดลอง

4.4.3 การสร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายการทดลองจาก EC Theory

ในการใช้ EC Theory กับระบบดังกล่าวจะคิดว่า syringe pump เป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ ทั้งนี้เนื่องจากสามารถเป็นแหล่งจ่ายปริมาตรของไหลได้ด้วยอัตราคงที่

สำหรับการจำลองแบบค่าความจุของไหลและค่าความต้านทานของไหลในส่วนต่างๆจะแสดงดังนี้

1. C_{hyd}^{Pump}

เนื่องจากกระบอกฉีดที่ใช้ขับเคลื่อนของเหลวเป็นวัสดุทำจากพลาสติก และลูกสูบซึ่งทำจากยางซึ่งมีความยืดหยุ่นและขยายตัว และสามารถกักเก็บปริมาตรของไหลไว้ในตัวได้และทำให้เกิดผลต่างความดัน ตามนิยามในสมการ (2.186) จึงประมาณว่ากระบอกฉีดมีค่าความจุของไหลเป็น C_{hyd}^{Pump} แต่ทว่าเมื่อเทียบกับการกักเก็บปริมาตรในระบบตรวจวัดค่าความดันแล้วถือว่าน้อยกว่ามากในที่นี้จึงไม่คิดค่าความจุของไหลของกระบอกฉีดพลาสติก C_{hyd}^{Pump} โดยประมาณว่ากระบอกฉีดเป็นวัตถุแข็งเกร็งได้

2. C_{hyd}^{Hg} กับ C_{hyd}^{Air}

เนื่องจากระดับความสูงของอากาศบริเวณรอยต่อระหว่างอากาศและน้ำ กับรอยต่อระหว่างอากาศและปรอทไม่แตกต่างกันมากจึงประมาณว่า ความดันอากาศในพื้นที่ปิดมีค่าเท่ากัน

ทั้งหมด ดังนั้นผลต่างความดันของอากาศในระบบเทียบกับความดันบรรยากาศจะมีค่าเท่ากับผลต่าง ความดันเนื่องจากความสูงของปรอทกับความดันบรรยากาศ เมื่อใช้ EC theory ในการสร้างแบบจำลองจะได้ว่า ค่าความจุของไหลของปรอทในมานอมิเตอร์ต้องขนานกับค่าความจุของไหลของอากาศ เนื่องจากมีจุดอ้างอิงที่ความดันบรรยากาศเดียวกันและค่าความดันที่ปลายข้างหนึ่งซึ่งไม่ต่อกับความดันบรรยากาศมีค่าเท่ากัน เมื่อพิจารณาปริมาตรของไหลที่หายไปจากระบบในรูปอนุพันธ์จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาตรรวมของอากาศที่อัดตัวได้กับปรอทจะมีค่า

$$-dV_{Air // Hg} = -dV_{Air} - dV_{Hg} \quad (4.4)$$

หารสมการ (4.4) ตลอดด้วย dp ดังที่กล่าวมาแล้วว่าค่าผลต่างความดันที่เกิดขึ้นเทียบกับความดันบรรยากาศมีค่าเท่ากัน และใช้นิยาม ในสมการ (2.186) จะได้ว่า

$$C_{hyd}^{Air // Hg} = C_{hyd}^{Air} + C_{hyd}^{Hg} \quad (4.5)$$

3. C_{hyd}^{Water} กับ $C_{hyd}^{Air // Hg}$

ค่าความจุของไหลเนื่องจากปริมาตรน้ำซึ่งหายไปจากระบบ (ในท่อแนวตั้ง) หรือ C_{hyd}^{Water} กับค่าความจุของไหลรวมของอากาศและปรอทนั้นไม่สามารถทำการรวมกันได้ดังเช่นที่กล่าวมาเนื่องจาก ค่าความดันรวมบริเวณ T-junction เทียบกับบรรยากาศ (Δp_{Mano}) นั้นเป็นผลรวมของค่าความดันของน้ำ และความดันของอากาศหรือปรอท

$$\Delta p_{Mano} = \Delta p_{Water} + \Delta p_{Air // Hg}$$

(4.6)

จากกฎการอนุรักษ์มวลของของไหลบีบอัดไม่ได้หรืออัตราการไหลในท่อเดียวกันมีค่าเท่ากันจะได้ว่า

$$-\Delta V_{Mano} = -\Delta V_{Water} = -\Delta V_{Air // Hg} \quad (4.7)$$

หาร (4.6) ด้วย (4.7) ตลอดแล้วใช้นิยามในสมการ (2.186) เมื่อประมาณการเปลี่ยนแปลงความดันเป็นเชิงเส้นกับปริมาตรจะได้ว่า

$$\frac{1}{C_{hyd}^{Mano}} = \frac{1}{C_{hyd}^{Water}} + \frac{1}{C_{hyd}^{Air // Hg}} \quad (4.8)$$

ซึ่งมีรูปแบบคล้ายกับการรวมค่าความจุในวงจรไฟฟ้า เมื่อรวมค่าความจุของไหลเข้าด้วยกันทั้งหมดจะนิยามค่าความจุของไหลรวมของระบบเป็น C_{hyd}^{Total} แสดงในรูปที่ 4.6 (ข) เส้นทึบ

4. R_{hyd}^{MFC}

ค่าความต้านทานการไหลส่วนอื่นในระบบ จะประมาณว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนไมโครเซนเซอร์ซึ่งมีค่ามากที่สุด จากการคำนวณโดยประมาณค่าความต้านทานของไหลในส่วนท่อ

หรือสายยางที่ใช้ในการทดลองจะมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานของไหลของไมโครเซนแนล ประมาณ 1000 -500 เท่าจากความละเอียดของเครื่องมือวัดที่วัดได้ละเอียดที่ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ซึ่ง จะไม่สามารถวัดค่าความต้านทานการไหลขององค์ประกอบอื่นได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึง อนุมานว่าจะเหลือเพียงค่าความต้านทานการไหลของไมโครเซนแนล R_{hyd}^{MFC} ที่มีผลต่อระบบ

จากการสร้างแบบจำลองระบบจาก EC theory ออกมาในลักษณะของวงจรของไหล ซึ่งใช้ syringe pump เป็นแหล่งจ่ายปริมาตรมีอัตราการไหล Q_0 โดยของไหลจะแยกไหลเข้ามานอมิเตอร์ ด้วยอัตราการไหล Q_1 และไหลผ่านไปยังไมโครเซนแนลด้วยอัตราการไหล Q_2 เมื่อพิจารณาค่า ความดันที่เพิ่มขึ้นบริเวณ T – junction เทียบกับบรรยากาศ หรือค่าประมาณผลต่างความดันระหว่าง ปลายทั้งสองของไมโครเซนแนลด้วยกฎการอนุรักษ์มวล ซึ่งแทนค่า Q_1 ด้วยนิยาม (2.186) และ Q_2 ด้วยกฎของ Poiseuille ซึ่งยืนยันด้วยผลการทดลองที่สถานะสมดุล ดังนั้นจะได้ว่า

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 = C_{hyd}^{Total} \frac{d\Delta p}{dt} + \frac{\Delta p}{R_{hyd}^{MFC}} \quad (4.9)$$

เมื่อแก้สมการ (4.9) จะได้ว่า

$$\Delta p(t) = Q_0 R_{hyd}^{MFC} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{hyd}^{MFC} C_{hyd}^{Total}}} \right) + \Delta p(0) e^{-\frac{t}{R_{hyd}^{MFC} C_{hyd}^{Total}}} \quad (4.10)$$

เมื่อ $t \rightarrow \infty$ จะพบว่า สมการ (4.10) จะกลายเป็นกฎของ Poiseuille ในทางกลับกัน เมื่อใช้เงื่อนไข เริ่มต้นซึ่งกำหนดให้ความดันมีค่าหนึ่งเมื่อ $t = 0$ จะพบว่าสมการ (4.10) จะกลายเป็นสมการการ ลดลงของความดันแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล โดยนิยาม เวลาที่ค่าความดันลดลงเป็น $1/e$ เท่า ของความดันเริ่มต้นว่าเป็น characteristic time ซึ่งขึ้นกับค่าความต้านทานของไหลและค่าความจุ ของไหลของระบบ

$$\tau_{hyd} \equiv R_{hyd}^{MFC} C_{hyd}^{Total} \quad (4.11)$$

4.4.4 การคำนวณค่าความต้านทานการไหลและความจุการไหลสำหรับใช้ใน EC Theory

การคำนวณค่าความต้านทานของไหล R_{hyd}^{MFC} ค่าความต้านทานของไหลทางทฤษฎี R_{hyd} หา ได้โดยการคำนวณจากค่าความยาวตามลักษณะรูปร่างของท่อ และค่าความหนืดของของไหล โดย แยกเป็นกรณีดังนี้

-กรณีที่ท่อมีลักษณะพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยม ค่าความต้านทานการไหลจะหาได้จาก

อัตราส่วนระหว่างผลต่างความดันของปลายท่อทั้งสองด้านกับอัตราการไหล โดยใช้สมการ (2.78) จะได้ว่า

$$R_{hyd} = \frac{1}{h^3 w} \frac{12\eta L}{\left[1 - \sum_{n, odd} \frac{1}{n^5} \frac{192}{\pi^5} \frac{h}{w} \tanh(n\pi \frac{w}{2h})\right]} \approx \frac{1}{h^3 w} \frac{12\eta L}{[1 - 0.63(h/w)]}, h \ll w \quad (4.12)$$

-กรณีที่มีลักษณะพื้นที่หน้าตัดวงกลม ค่าความต้านทานการไหลจะหาได้จาก (2.185)

$$R_{hyd} = \frac{8\eta L}{\pi R^2} \quad (4.13)$$

การคำนวณค่าความจุของไหล C_{hyd} จะสามารถหาได้จากสมการ (2.186) โดยแยกเป็น 3 กรณีดังนี้

-ค่าความจุของไหลที่เกิดจากของไหลไหลออกจากระบบเข้าสู่ท่อในแนวตั้ง

ความหมายเชิงกายภาพ ของสมการ (2.186) สามารถกล่าวได้ว่าปริมาตรของของไหลที่หายออกไปจากระบบเข้าสู่ท่อในแนวตั้งจะทำให้ความดันภายในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งคือค่าความจุการไหลจะกักเก็บพลังงานจลน์ในการไหลไว้ในรูปพลังงานศักย์นั่นเอง จาก (2.186) เมื่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเป็นเชิงเส้นกับความดันจะได้ว่า

$$C_{hyd} = -\frac{dV_f}{dp} \approx -\frac{\Delta V_f}{\Delta p} = -\frac{(A\Delta h)}{\rho g \Delta h} = \frac{A}{\rho g} \quad (4.14)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความจุของไหลในที่นี้เป็นค่าคงที่สำหรับระบบการไหลหนึ่งๆ โดยค่า C_{hyd} จะขึ้นกับพื้นที่หน้าตัด A ของท่อบรรจุของไหลซึ่งเป็นสมบัติของระบบ แปรผันกันกับค่าความหนาแน่นของของไหล ρ และค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง g

- ค่าความจุของไหลที่เกิดจากสมบัติของของไหลที่ยุบตัวได้

เช่นเดียวกันเมื่อพิจารณา (2.186) ในกรณีที่มิของไหลที่ยุบตัวได้เช่นแก๊ส หรืออากาศ อยู่ในระบบกับของไหลที่ยุบตัวไม่ได้ เช่นปริมาตรอากาศที่ถูกกักในท่อน้ำปลายปิดหรือสภาพมีแรงต้านทานการไหลที่ปลายทางออกของท่อ เมื่อพิจารณาของไหลที่ยุบตัวได้ถูกอัดตัว ขณะถูกอัดความดันภายในของไหลจะเพิ่มขึ้น เป็นการสะสมพลังงานศักย์ยืดหยุ่นไว้ในปริมาตรของไหลดังกล่าว เมื่อประมาณว่าทำการทดลองที่อุณหภูมิคงที่ กระบวนการทั้งหมดจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ จากนิยามของ bulk modulus β ของกระบวนการอุณหภูมิคงที่ isothermal process โดย

$$\beta = -V_0 \left(\frac{\partial p}{\partial V_f} \right)_T \quad (4.15)$$

เมื่อ V_0 คือปริมาตรเริ่มต้นของก๊าซที่ถูกบีบอัด ดังนั้นจะได้ว่า

$$C_{hyd} \approx \frac{V_0}{\beta} \quad (4.16)$$

โดยค่า $\beta = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ที่อุณหภูมิ 25 เซลเซียส

-ค่าความจุของไหลที่เกิดจากสมบัติท่อที่ยืดตัวได้

ค่าความจุของไหลชนิดนี้มักถูกพิจารณาเมื่อท่อการไหลมีลักษณะยืดหยุ่นดังเช่นที่ประมาณมาแล้วในหัวข้อ 4.2.2 (1) และนอกจากนี้ในบางกรณีที่ใช้ความดันสูงกับการไหลใน PDMS microfluidic chip จะเป็นผลทำให้ไมโครเซนแนลเกิดการเปลี่ยนรูปทรงไป โดยค่าความจุของไหลที่เกิดจากสมบัติของท่อนี้ยังคงใช้สมการ (2.186) ในการอธิบายระบบ แต่อย่างไรก็ตามรูปทรงที่เปลี่ยนแปลงไปมักซับซ้อนไม่สามารถประมาณได้ด้วยการคำนวณโดยตรง ดังนั้นเมื่อทำการทดลองที่ความดันไม่สูงมากนัก และระบบมีค่าความจุของไหลอื่นที่มีค่ามากกว่ามากๆ จะสามารถตัดผลจากสมบัติดังกล่าวออกได้

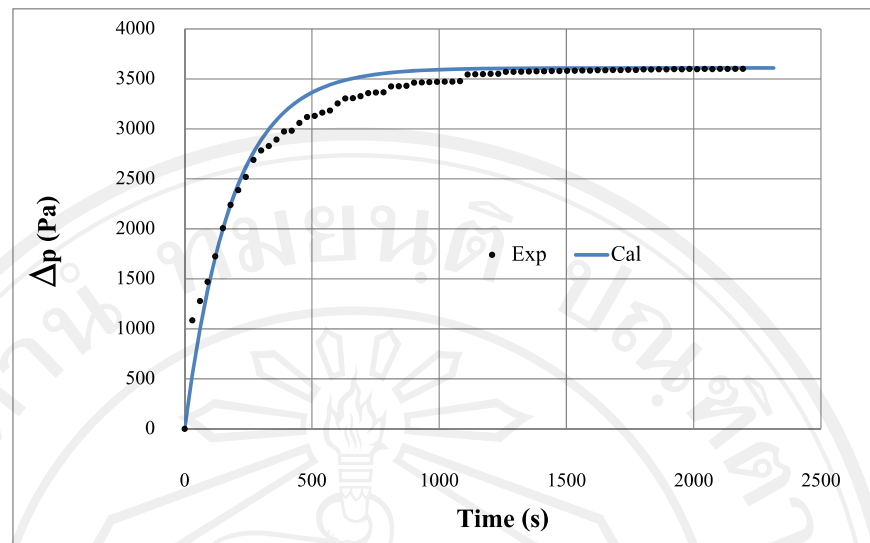
4.4.5 กราฟเปรียบเทียบความดันกับเวลาระหว่างผลการทดลองกับการคำนวณโดย EC theory

เมื่อวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ และแทนค่าความหนืด ค่า bulk modulus เพื่อหาค่า R_h และ C_{hyd} แล้วแทนค่าปริมาณทั้งหมดลงใน (4.10) โดยใช้เงื่อนไขเริ่มต้นที่ว่าผลต่างความดันระหว่างปลายทั้งสองด้านของไมโครเซนแนลประมาณได้ว่ามีค่าเท่ากับระยะของไหลอยู่ในสมดุลสถิตหรือไม่มีการไหลดังกล่าวอธิบายในหัวข้อ (2.2) มาเขียนกราฟระหว่างผลต่างความดันที่เกิดขึ้นจากการผลักดันมวลของไหลสู่ไมโครเซนแนลจาก syringe pump เทียบกับเวลา แล้วนำมาเปรียบเทียบกับกราฟระหว่างผลต่างความดันที่วัดได้จากการทดลองกับเวลา

โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามหัวข้อ 4.1 และขนาดของไมโครเซนแนล $251.5 \mu m \times 31.3 \mu m \times 14.0 mm$ เมื่อที่อัตราการไหลที่ทำการทดลองมีค่า $0.17 \mu l / s$ ส่วนค่าความต้านทานการไหล และความจุของไหลที่ได้จากการคำนวณจากพารามิเตอร์ของระบบ มีค่าดังนี้

$$R_{hyd}^{MFC} = 2.01 \times 10^{13} Pa \cdot s \cdot m^{-3}, C_{hyd}^{Total} = 6.13 \times 10^{-12} m^3 / Pa$$

ที่สถานะสมดุล เลขเรย์โนลด์มีค่า 1.44 ซึ่งจะได้กราฟดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบกราฟระหว่างผลต่างความดันระหว่างปลายทั้งสองด้านของไมโครเซนแนลที่ได้จากการทดลอง (เส้นประ) กับที่ได้จากการคำนวณโดยสมการ (4.10) (เส้นทึบ)

จากกราฟจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี จากกราฟที่เวลามีค่ามากเมื่อระบบเข้าสู่สมดุล ค่าผลต่างความดันจะเข้าสู่ค่าหนึ่งซึ่งสอดคล้องกับกฎของ Poiseuille ดังที่กล่าวมาแล้ว ส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันกับเวลานั้นพบว่าผลจากการคำนวณมีค่ามากกว่าการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากการรวมค่าความจุของไหลทั้งระบบในการคำนวณนั้นได้ละทิ้งค่าความจุของไหลในหลายส่วนเช่น ค่าความจุที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของไมโครเซนแนล การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของกระบอกฉีดเนื่องจากแรงดันของไหลภายใน ฯลฯ ทั้งนี้ระดับความแม่นยำของการคำนวณและอธิบายระบบด้วย EC theory จะพิจารณาด้วยผลการทดลองในตอนต่อไป

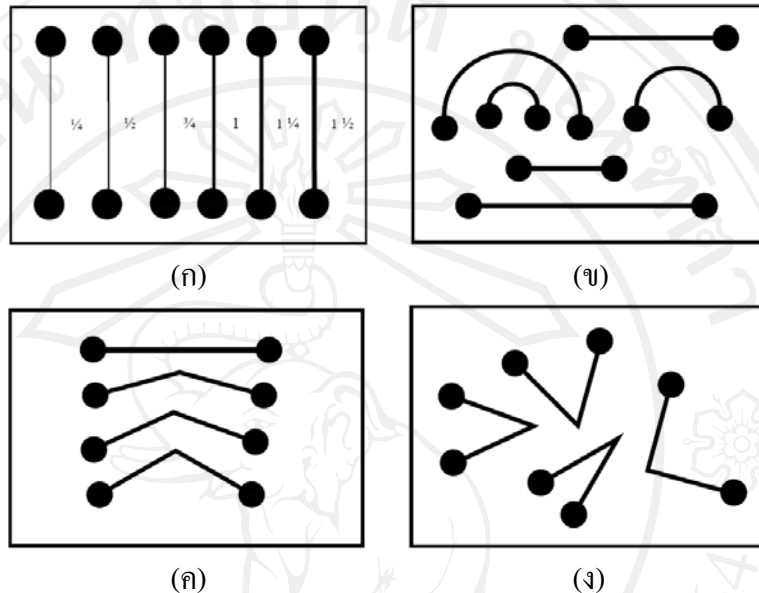
4.5. ผลการทดลองเมื่อควบคุมอัตราการไหลของปั๊ม Q ให้คงที่ค่าหนึ่ง โดยเปลี่ยนความต้านทานการไหล R_h เป็นค่าต่างๆ แล้ววัดผลต่างความดัน Δp

การทดลองนี้เป็นการตรวจสอบความสอดคล้องของ EC theory กับการอธิบายระบบซึ่งมีรูปร่างลักษณะแตกต่างกัน โดยแบ่งการวิเคราะห์ผลและเปรียบเทียบค่าความต้านทานการไหลที่ได้จากการทดลองจำแนกตามรูปร่างลักษณะของไมโครเซนแนล เป็น 3 กลุ่มดังนี้คือ

1. กลุ่มที่มีความยาวเท่ากัน มีพื้นที่หน้าตัดต่างกันดังรูปที่ 4.8 (ก)
2. กลุ่มที่มีความกว้างของไมโครเซนแนลเท่ากันแต่รัศมีความโค้งต่างกันดังรูปที่ 4.8 (ข)

ซึ่งประกอบด้วยไมโครเซนแนลตรงที่มีความกว้างเท่ากันแต่ความยาวเท่ากับความยาวส่วนโค้งเพื่อทดลองเปรียบเทียบกัน แม้ในทางปฏิบัติจะทำได้เพียง ทำให้ไมโครเซนแนลมีขนาดใกล้เคียงกันเท่านั้น

3. กลุ่มที่มีมุมของไมโครเซนแนลเบนไปเป็นองศาต่างๆ ดังรูปที่ 4.8 (ก) และ (ง)



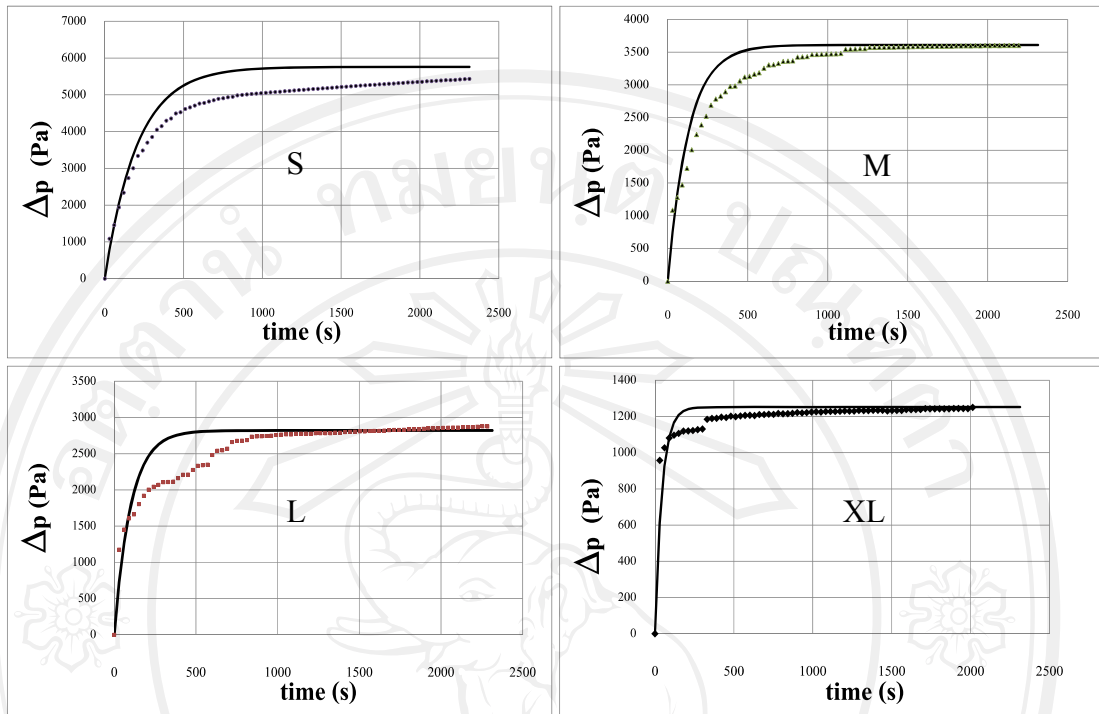
รูปที่ 4.8 ภาพแม่แบบไมโครฟลูอิดิกชิปที่ใช้ทำการทดลอง

4.5.1 การเปลี่ยนแปลงผลต่างความดันในไมโครเซนแนลพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมตรง

สำหรับไมโครเซนแนลตามรูปที่ 4.8 (ก) ที่ใช้ทำการทดลองได้กำหนดเบอร์ วัสดุขนาด และค่าความขรุขระไว้ดังแสดงในตาราง 4.4

ตาราง 4.4 ขนาดของไมโครเซนแนลเบอร์ต่างๆที่ใช้ทำการทดลอง

เบอร์		S		M		L		XL	
อัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (h/w)		0.18		0.12		0.09		0.08	
แนวที่วัดขนาด	ยาว	สูง	กว้าง	สูง	กว้าง	สูง	กว้าง	สูง	กว้าง
ขนาดเฉลี่ย (μm)	14,000	30.86	171.5	31.34	251.5	30.42	342.9	36.61	415.1
ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความขรุขระ	-	0.66	6.29	0.89	6.82	0.78	4.67	2.12	7.57



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบกราฟระหว่างผลต่างความดันระหว่างปลายทั้งสองด้านของไมโครแชนแนล ที่ได้จากการทดลอง (เส้นประ) กับที่ได้จากการคำนวณสมการ(4.10) (เส้นทึบ)ของไมโครแชนแนลเบอร์ต่างๆ

จากกราฟการทดลองเมื่อใช้ EC theory หาค่า R_{hyd}^{MFC} และค่า C_{hyd}^{Total} โดยค่า R_{hyd}^{MFC} จะหาได้จากอัตราส่วนผลต่างค่าความดันที่ระบบเข้าสู่สมดุล และอัตราการไหลของระบบเมื่อระบบสมดุล ซึ่งจะเท่ากับอัตราการไหลของของไหลที่ขับเคลื่อนด้วย syringe pump ส่วนค่า C_{hyd}^{Total} ของระบบจะหาค่าจากการหาค่าเวลา characteristic time ในสมการ (4.11) จากกราฟระหว่างผลต่างค่าความดันกับ

เวลา โดย $C_{hyd} = \frac{\tau_{hyd}}{R_{hyd}}$ เมื่อคำนวณเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจะได้ผลดังแสดงในตาราง 4.5

ตาราง 4.5 ค่า R_{hyd}^{MFC} และค่า C_{hyd}^{Total} ที่คำนวณได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี

	$R_{hyd}^{MFC} [\times 10^{11} \frac{Pa \cdot s}{m^3}]$				$C_{hyd}^{Total} [\times 10^{-12} \frac{m^3}{Pa}]$			
เบอร์	XL	L	M	S	XL	L	M	S
ค่าจากการทดลอง	72.38	165.23	209.40	315.86	8.66	8.92	8.77	9.44
ค่าที่คำนวณจากทฤษฎี	72.97	164.39	210.37	335.57	8.86	8.86	8.86	8.86
*% คลาดเคลื่อน	-0.81	0.51	-0.46	-5.87	- 2.26	0.68	-1.02	6.55

จากรูปที่ 4.9 และตาราง 4.5 จะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองเมื่อเทียบกับผลการคำนวณมีค่าน้อยกว่า 10% ซึ่งพอจะสรุปได้ว่า EC theory สามารถที่จะอธิบายระบบได้เมื่อยอมรับค่าความผิดพลาดได้ที่มีความละเอียดประมาณ 0.1 เท่าของค่าที่วัดได้ ทั้งนี้ได้ตั้งข้อสังเกตถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความดันขณะที่จะระบบเข้าสู่สมดุลซึ่งทำให้การคำนวณค่า R_{hyd}^{MFC} คลาดเคลื่อนไป โดยมีสมมติฐานว่าการเลือกใช้ค่าความดันบรรยากาศเป็นความดันอ้างอิงตามรูปที่ 4.6 โดยประมาณว่าคงที่ ซึ่งแท้จริงแล้วไม่คงที่ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ ผลต่างค่าความดันเปลี่ยนแปลงไปโดยขึ้นอยู่กับค่าความดันบรรยากาศ

สำหรับส่วนของความดันที่ลดลงในไมโครเซนแนลนั้นตั้งสมมติฐานไว้ว่ามาจากการหลุดออกของหยดของเหลวบริเวณปลายท่อซึ่งเป็นผลของ ความตึงผิว ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.5 ซึ่งจะได้ทดลองเพื่อทดสอบสมมติฐานต่อไป

หากพิจารณาถึงผลของความขรุขระที่จะต้องทำให้สูญเสียความดันเพิ่มมากขึ้นดังผลการศึกษาของ Kulkarni (2004) นั้น กลับพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยรูปร่างไมโครเซนแนลทั้ง 4 ที่เป็นอุดมคติกลับมีค่ามากกว่า ค่าที่วัดได้จากการทดลอง ซึ่งทำให้สรุปในเบื้องต้นว่ายังไม่สามารถตรวจวัดผลของการสูญเสียความดันที่เกิดจากค่าความขรุขระของไมโครเซนแนลได้จากการทดลอง จึงละทิ้งผลของความขรุขระภายในไมโครเซนแนลที่มีเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 5 ได้ โดยไม่นำมาพิจารณาในการทดลองในตอนต่อไป ส่วนสาเหตุที่ทำให้เกิดผลดังกล่าวได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่า

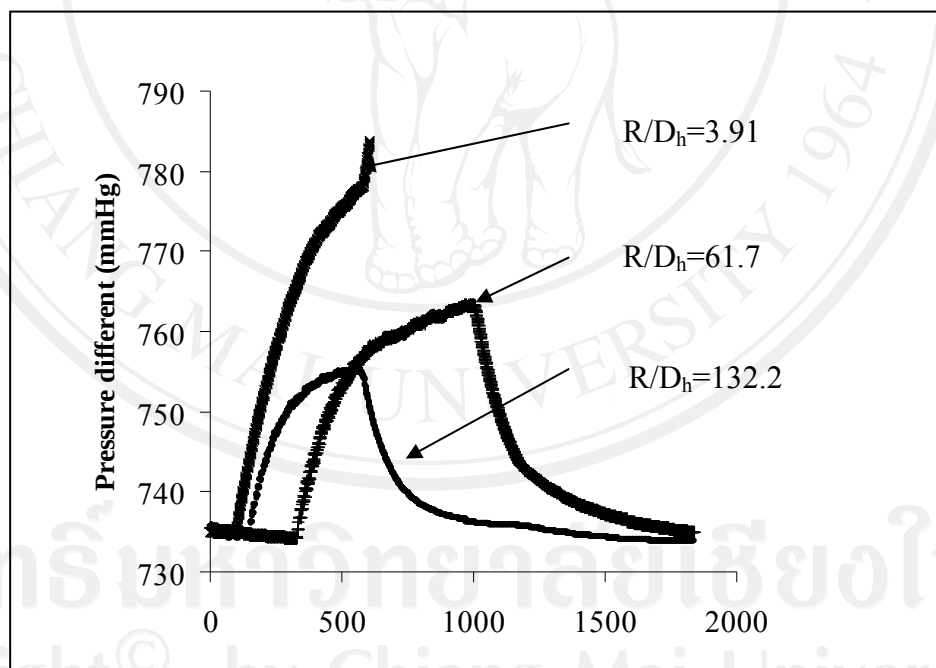
น่าจะเกิดจากผลของความยืดหยุ่นของ PDMS ดังที่ Vdel (2006) ได้รายงานไว้ในส่วนของผลจากความจุของไหลของผนังท่อ PDMS

4.5.2 การเปลี่ยนแปลงผลต่างความดันในไมโครเซนแนลพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมโค้ง

เมื่อทำการทดลองวัดค่าความต้านทานการไหลของไมโครเซนแนลโค้ง ที่มีขนาดความกว้าง และความสูงใกล้เคียงกัน เมื่อให้รัศมีความโค้งต่างกัน โดยจัดการทดลองตามรูปที่ 4.6 แต่เปลี่ยนมานอมิเตอร์เป็นเครื่องวัดค่าความดัน ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ (parameter) ต่างๆดังนี้

τ (ms)	300
Q ($\mu\text{l/s}$)	0.167
ความหนาแน่นของไหล (kg/m^3)	998
ความหนืด (Pa.s)	0.0008904

จะได้ผลการทดลองที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความดันไปกับเวลา ของไมโครเซนแนลที่มีรัศมีความโค้งต่างกัน ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.10 กราฟระหว่างผลต่างความดันระหว่างปลายทั้งสองของไมโครเซนแนลสี่เหลี่ยมโค้งกับเวลา เมื่ออัตราส่วนระหว่างความยาวรัศมีและเส้นผ่านศูนย์กลางของไหลต่างกันคือ 39.1, 61.7 และ 132.2 ตามลำดับ

จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อรัศมีความโค้งเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลของของไหลมีค่าน้อยค่าผลต่างความดันที่เกิดขึ้นระหว่างปลายไมโครเซนแนลที่มีของไหลไหลเข้า กับด้านที่มีของไหลไหลออกจะมีค่าน้อยกว่า ไมโครเซนแนลที่มีรัศมีมากกว่า ที่อัตราการไหลค่าเดียวกัน เมื่อหาค่าเลขเรย์โนลด์เพื่อตรวจสอบลักษณะการไหลโดยเลขเรย์โนลด์มีค่า 1.24, 1.10, 1.18 ตามลำดับขนาดรัศมี ซึ่งอยู่ในสภาวะการไหลแบบราบเรียบซึ่งมีพฤติกรรมการไหลคล้ายกัน แล้วคำนวณค่าความต้านทานการไหลจากอัตราส่วนผลต่างความดันที่ระบบเข้าสู่สมดุลกับอัตราการไหล (สมการ 2.174) และคำนวณความต้านทานการไหลจาก (2.148) ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดจากเสดสูญเสียรอง (minor head loss) ซึ่งเป็นผลของความโค้งของท่อในสมการ (2.182 ค) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานตามสมการ (2.181) และความยาวสมมูลจากรูปที่ 2.19 (ก) จากนั้นเทียบกับผลการคำนวณความต้านทานการไหลของท่อตรง จากการคำนวณความต้านทานการไหลโดยการใช้นิยาม (2.147) กับอัตราการไหลที่หาได้จากสนามความเร็ว ตามสมการ (2.78) จะได้ผลดังตาราง 4.6

ตาราง 4.6 เปรียบเทียบค่าความต้านทานของไหลที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณ ของไมโครเซนแนลพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยม โค้งครึ่งวงกลม

ความยาวส่วนโค้ง (cm)	2.670	1.256	0.785
ความสูงไมโครเซนแนล(μm)	36.30	36.30	36.30
ความกว้างไมโครเซนแนล(μm)	281.06	302.48	264.42
$R_h^{cal} (Pa \cdot s / m^3)^*$	5.13×10^{13}	2.19×10^{13}	1.59×10^{13}
$R_h^{exp} (Pa \cdot s / m^3)$	$3.50 \times 10^{13} **$	2.04×10^{13}	1.56×10^{13}
% คลาดเคลื่อนจากการคำนวณ	-31.85	-6.47	-1.79

* คำนวณความยาวสมมูลโดยเทียบสัดส่วนจากกราฟในรูปที่ 2.19 (ก)

** ใช้ค่าประมาณผลต่างความดันในการคำนวณความต้านทานการไหล ในรูปที่ 4.8 เนื่องจาก

ข้อจำกัดทางเทคนิคที่ว่าของไหลได้ไหลเข้าท่วมตัววัดความดัน ทำให้ค่าความดันที่อ่านได้เป็นการวัดแรงดันจากแรงกดของน้ำบนตัวเซ็นเซอร์แทนที่จะเป็นการวัดค่าความดันของอากาศ

จากตารางพบว่าค่าความต้านทานการไหลที่ได้จากการทดลองและคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อกำหนดความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10% (ไม่นับรวมการไหลในไมโครเซนแนลโค้งยาว 2.670 ซม.) ส่วนค่าคลาดเคลื่อนระหว่างการทดลองกับการคำนวณที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีความโค้ง

มีค่ามากขึ้นนั้น ได้ตั้งข้อสังเกตถึงสาเหตุว่าอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการคำนวณนั้นอาศัยการหาค่าความยาวสมมูลจากกราฟในรูปที่ 2.19 (ก) ซึ่งอัตราส่วน r/D_h อยู่นอกพิสัยของกราฟจึงทำการเทียบสัดส่วนโดยใช้สมการการถดถอยเชิงเส้นทำการประมาณค่าความยาวสมมูลต่อจากกราฟในรูปที่ 2.19 (ก) ในช่วง $r/D_h > 10$ ซึ่งได้สมการการถดถอยเชิงเส้น เป็น $(L_e/D) = 4.5077(r/D_h) - 5.1204$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 = 0.9976$ เนื่องจากไม่สามารถหาฐานข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบได้ โดยค่าที่แท้จริงของความยาวสมมูลอาจไม่เป็นเชิงเส้น ดังการประมาณการถดถอยเชิงเส้น

เมื่อเทียบอัตราส่วนค่าความต้านทานของไหลของไมโครเซนแนลสี่เหลี่ยม โค้งครึ่งวงกลม จากการคำนวณและการทดลองกับไมโครเซนแนลสี่เหลี่ยมตรงที่มีค่าความยาวเท่ากัน จะได้ผลดังตาราง 4.5

ตาราง 4.7 เปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าความต้านทานของไหลของไมโครเซนแนลสี่เหลี่ยม โค้งครึ่งวงกลม จากการทดลองและการคำนวณ กับค่าความต้านทานการไหลไมโครเซนแนลสี่เหลี่ยมตรงที่ได้จากการคำนวณ โดยสมการ (2.174) และ (2.80)

ความยาวส่วนโค้ง (cm)	2.670	1.256	0.785
ความสูงไมโครเซนแนล(μm)	36.30	36.30	36.30
ความกว้างไมโครเซนแนล(μm)	281.06	302.48	264.42
$R_h^{curve_cal} / R_h^{straight_cal}$	2.22	2.18	2.19
$R_h^{curve_exp} / R_h^{straight_cal}$	1.51	2.03	2.15

เมื่อเทียบสัดส่วนกับผลการคำนวณค่าความต้านทานการไหลในท่อโค้ง(ในกรณีที่ $r/D_h > 10$) กับผลการคำนวณค่าความต้านทานการไหลในท่อตรงพบว่าค่าความต้านทานการไหลของไมโครเซนแนลโค้งครึ่งวงกลมมีค่าความต้านทานการไหลประมาณ 2 เท่า ของไมโครเซนแนลตรงที่มีความยาวและพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไมโครเซนแนลมีผลกับค่าความต้านทานการไหลตามทฤษฎี ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เรื่องเสถียรภาพในระบบท่อ

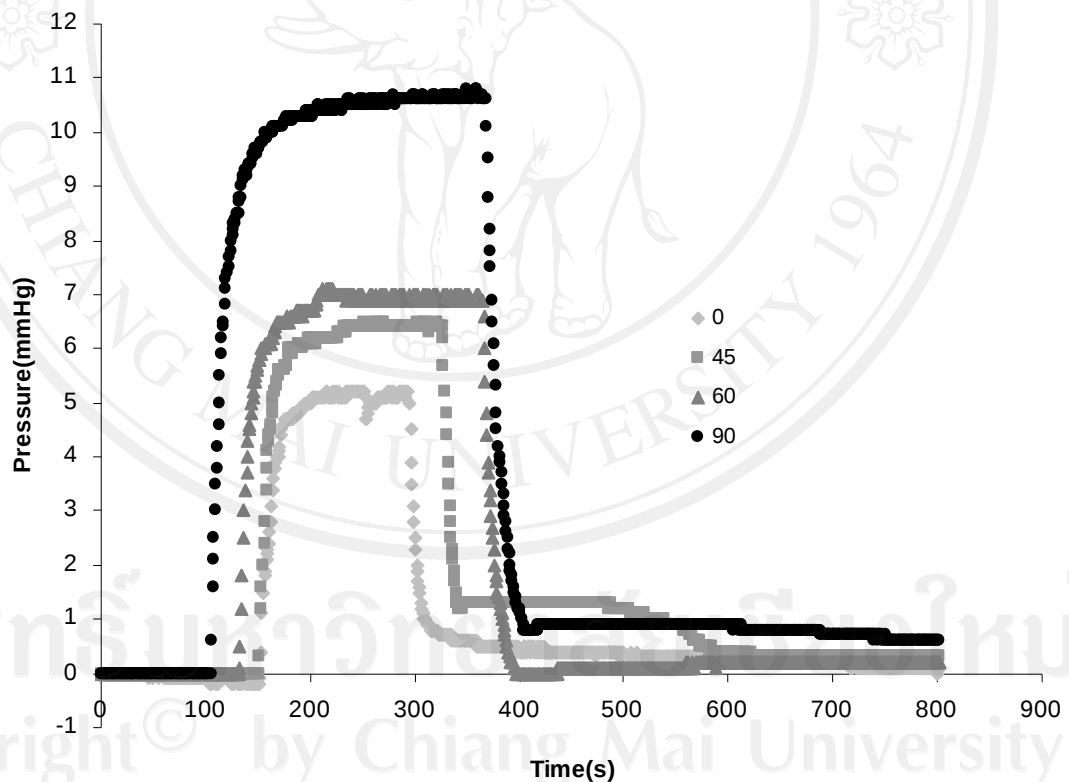
จึงสรุปว่าการทดลองและการคำนวณให้ผลที่มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยการพิจารณาความสอดคล้องกันของค่าความต้านทานการไหลของไมโครเซนแนลโค้งครึ่งวงกลมที่ได้จากการทดลองและการคำนวณโดยละเอียด อาจเทียบผลเพิ่มเติมจากผลการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขหาคำตอบ หรือออกแบบการทดลองโดยเฉพาะเพื่อหาค่าโดยละเอียดต่อไป

4.5.3 การเปลี่ยนแปลงผลต่างความดันในไมโครเซนแนลพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมหักมุม

เมื่อทำการทดลองวัดค่าความต้านทานการไหลของไมโครเซนแนลหักมุมดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ค) และ (ง) ที่มีขนาดความกว้าง ความสูง และความยาวใกล้เคียงกัน แต่ให้มีมุมต่างกัน โดยจัดการทดลองตามรูปที่ 4.6 โดยเปลี่ยนมานอมิเตอร์เป็นเครื่องวัดค่าความดัน โดยมีค่าพารามิเตอร์ (parameter) ต่างๆดังนี้

τ (ms)	300
Q ($\mu\text{l/s}$)	0.167
ความหนาแน่นของไหล (kg/m^3)	998
ความหนืด (Pa.s)	0.0008904

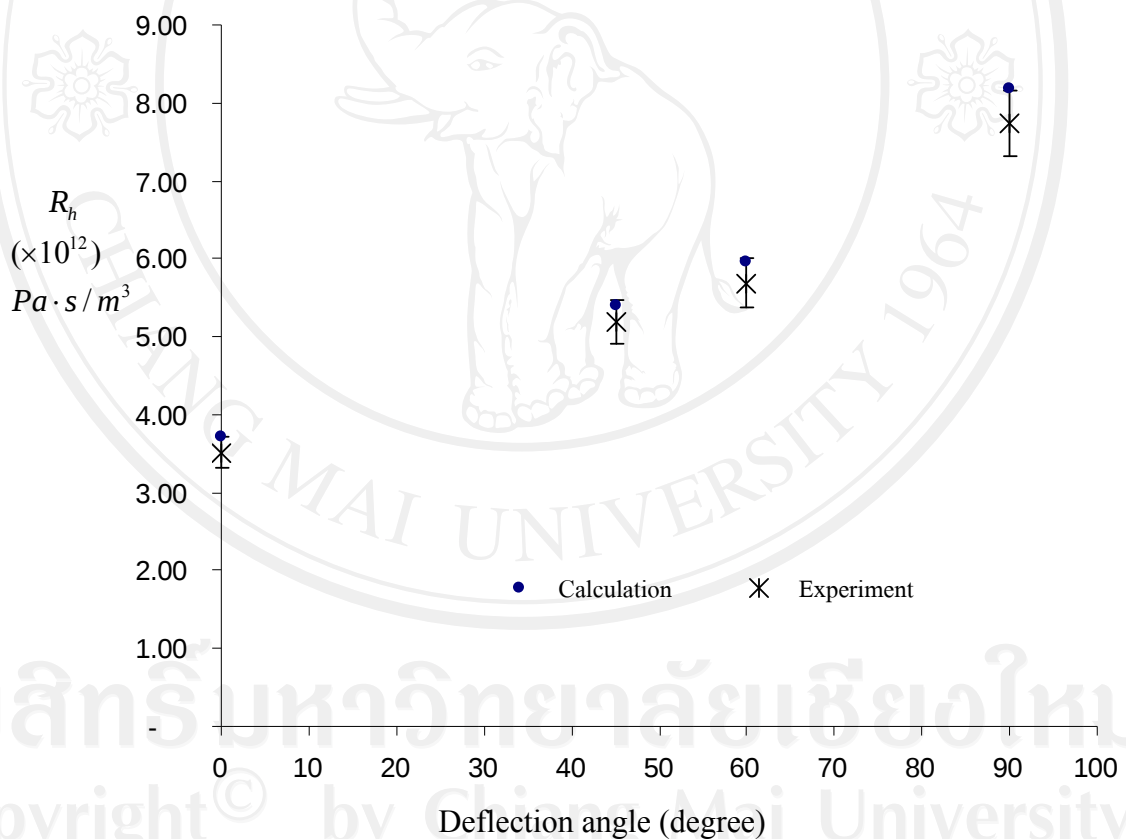
เมื่อทำการคำนวณค่า ความต้านทานการไหล เทียบกับผลการทดลอง เช่นเดียวกันกับหัวข้อ 4.5.2 แล้วนำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบระดับความดันที่เวลาต่างๆจะได้ผลดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.11 ตัวอย่างค่าความดันที่บันทึกได้ที่เวลาต่างๆจากการทดลองการไหลในไมโครเซนแนลสี่เหลี่ยมหักมุม ที่มุมเบี่ยงเบนไปจากแนวตรง 4 ค่าคือ 0, 45, 60 และ 90 องศา

จากรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อมุมเบี่ยงของไมโครเซนแนลมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความดันระหว่างปลายท่อทั้งสองจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของความยาวสมมูลบริเวณไมโครเซนแนลที่หักมุม ตามรูปที่ 2.19 (ข) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในท่อ (friction factor) เพิ่มขึ้น

เมื่อนำค่าความต้านทานการไหลจากการคำนวณโดยสมการ (2.182) เทียบกับค่าความต้านทานการไหลจากการทดลองที่ได้จากอัตราส่วนความดันและอัตราการไหล มาเขียนกราฟเปรียบเทียบกันจะได้ลักษณะแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าความยาวสมมูลตามรูปที่ 2.19 (ข)



รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบความต้านทานการไหลของไมโครเซนแนลสี่เหลี่ยมหักมุมจากการทดลองและการคำนวณ

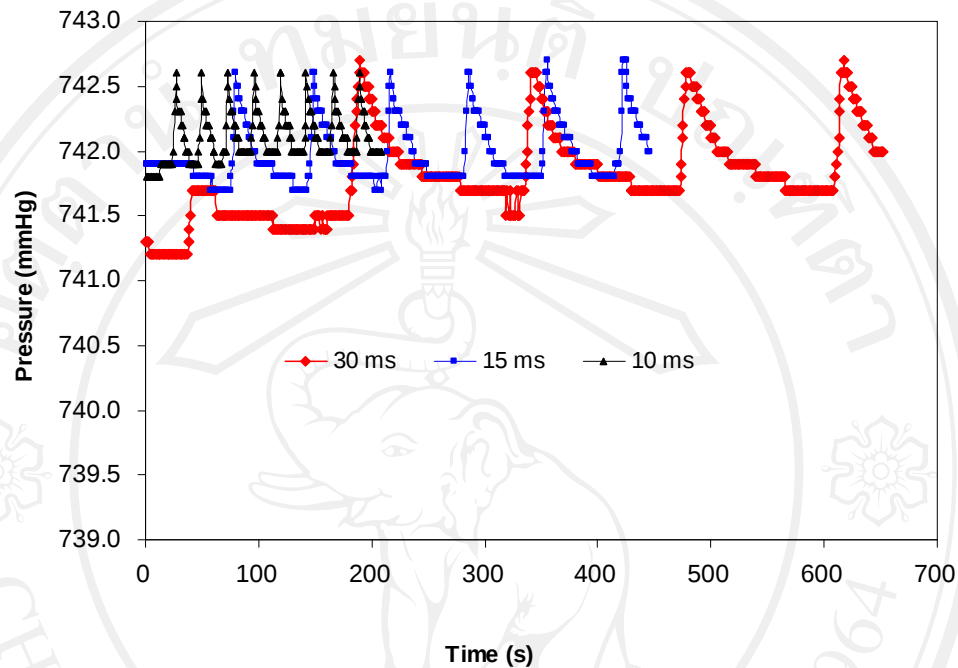
จากข้อมูลที่ได้พบว่าค่าความต้านทานการไหลที่ได้จากทั้งการคำนวณและการทดลองมีแนวโน้มสอดคล้องและเป็นไปในทางเดียวกัน โดย จากการทดลองมีค่าน้อยกว่า ค่าจากการคำนวณประมาณ 5 % ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.12 ซึ่งสามารถยอมรับได้เมื่อประมาณค่าความต้านทานการไหลจากการคำนวณด้วยวิธีการแบบฉบับดังกล่าว และจากการทดลองทำให้ตั้งสมมติฐานขัดแย้งในเรื่องของผลจากความขรุขระที่ผลการศึกษาในหัวข้อที่ 2.3.5 ที่สรุปว่าความขรุขระเป็นตัวเพิ่มสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในการไหลในระดับไมครอน แต่จากการทดลองพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองกลับมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ friction factor จาก Moody diagram ที่นิยามตัวประกอบความเสียดทานตาม (2.181) ซึ่งในที่นี้จะตั้งเป็นข้อสังเกตไว้เพียงเท่านั้น เนื่องจากค่าความละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ทำการวัดอาจไม่เพียงพอต่อการสรุป ซึ่งจะเป็นกรณีศึกษาต่อไป

จากผลการทดลองที่ได้สรุปว่าผลการทดลองสอดคล้องกับตัวทฤษฎีแบบฉบับ โดยไม่ต้องปรับแก้การคำนวณใดๆ เมื่อยอมรับความคลาดเคลื่อน น้อยกว่า 5 %

จากการวิจัยสามารถนำผลที่ได้จากการทดลอง คือการคำนวณค่าความต้านทานการไหล โดยใช้วิธีการคำนวณตามแบบฉบับ สำหรับการประมาณค่าความดันและอัตราการไหลจริงในไมโครเซนแนลรูปแบบต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว เมื่อยอมรับค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 5-10 % ได้

4.6 การทดลองเพื่อหาผลของการเปลี่ยนแปลงความดันเนื่องจากความตึงผิว ที่อัตราการไหลต่างกัน

เมื่อทำการทดลอง วัดค่าความดันของระบบดังรูปที่ 3.17 จะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.13

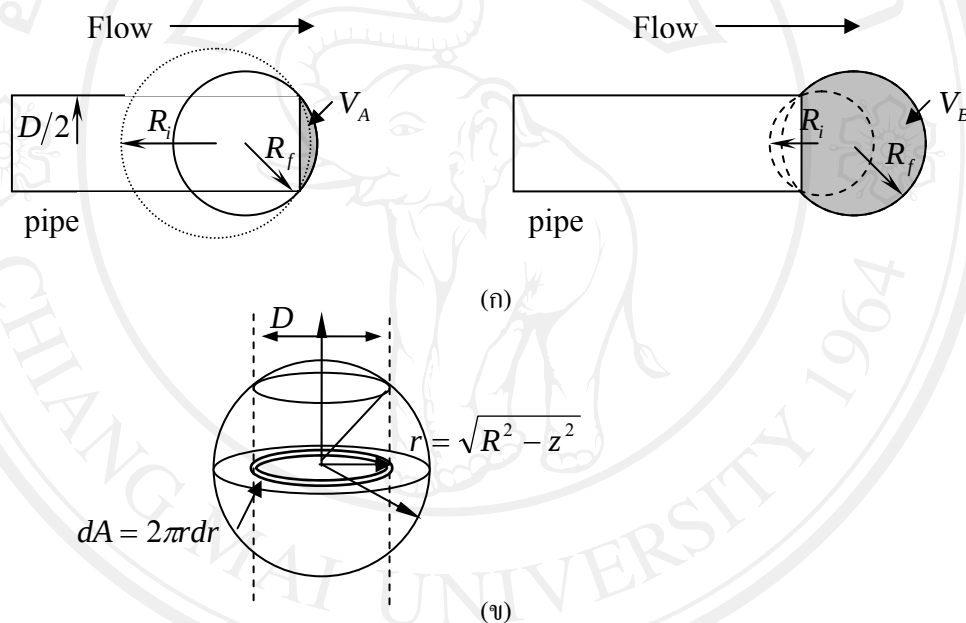


รูปที่ 4.13 ค่าความดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงตึงผิวเทียบกับเวลาที่อัตราขับปั๊ม τ 30 15 และ 10 $\mu\text{s/step}$

จากกราฟความดันเทียบกับเวลาพบว่าค่าความดันมากที่สุดของระบบ มีค่าใกล้เคียงกันและคู่เข้าสู่ค่าหนึ่ง ตามลักษณะดังเช่น รูปที่ 2.17 โดยค่าความดันมากที่สุดจะเป็นช่วงที่รัศมีของหยดของเหลวมีค่าเท่ากับความยาวของรัศมีที่ต่อตามสมการ 2.163 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่รัศมีของของไหลมีค่าน้อยที่สุด แต่เมื่อเทียบค่าความดันต่ำสุดกลับพบว่า ค่าความดันต่ำสุดที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปในทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาถึงลักษณะความดันที่เป็นคาบพบว่าคาบของการหยดออกของของไหลมีแนวโน้มลดลงตามอัตราการไหลซึ่งแปรผกผันกับค่าเวลา τ เมื่อพิจารณาความดันจากแรงตึงผิวที่วัดได้พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลหรือความดันระหว่างปลายท่อขาออกเพิ่มขึ้น

สำหรับการวิเคราะห์โดยละเอียดมากขึ้นจะทำโดยการประมาณปรากฏการณ์ดังกล่าวด้วยลักษณะปัญหาที่ใกล้เคียงกันเพื่อหา EC model ในการอธิบายการหยดออกของของไหลนี้ โดยสมมุติให้หยดของไหลที่หยดออกจากปลายท่อด้านหนึ่งมีลักษณะกลมและสมมาตรเนื่องจากผล

ของแรงตึงผิวที่พยายามทำให้ พลังงานเสรีบพื้นผิวมีค่าน้อยที่สุดซึ่ง ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ตามรูปที่ 4.12 เมื่อแบ่งออกเป็น 2 สถานะการณ์ โดยมีเส้นแบ่งเหตุการณ์คือจุดที่รัศมีหยดของไหล เท่ากับรัศมีของท่อ โดยรัศมีเริ่มแรก R_i ของไหลอาจมีค่ามากจนเป็นอนันต์ จากนั้นเมื่อของไหล ส่วนหนึ่งไหลผ่านปลายท่อรัศมีสุดท้าย R_f จะมีขนาดเล็กลงจนเท่ากับรัศมีของปลายท่อ ตามรูปที่ 4.12 (ก) จากนั้นเมื่อพิจารณาสถานะการณ์ถัดมา รัศมีเริ่มแรก R_i จะต้องมีความเท่ากันหรือใหญ่กว่า รัศมีของท่อเพื่อรองรับปริมาตรของไหลที่ไหลออกด้วยอัตราการไหลคงที่ตามกฎการอนุรักษ์มวล ดังนั้นรัศมีสุดท้าย R_f จึงต้องมีค่ามากกว่า R_i ดังนั้นจึงใช้เงื่อนไขตามลักษณะ เรขาคณิตในรูปที่ 4.12 (ข) อินทิเกรตหาปริมาตรของไหล เพื่อเชื่อมโยงกับเวลา กับปริมาตรสุดท้ายที่ของไหลหยด ออก ในภายหลัง



รูปที่ 4.14 การสร้างแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อพิจารณาผลของแรงตึงผิวกับความดันในระบบของไหล เพื่อช่วยในการสร้าง อุปกรณ์ในวงจรสมมูล (EC component) ซึ่งเกิดจากผลของแรงตึงผิวกรณีท่อปลายท่อนขนาดเล็กในระบบของไหลสู่อากาศ

จากรูปที่เมื่ออินทิเกรตหาปริมาตรจะได้ว่า

$$V_A = \frac{2}{3}\pi R^3 - \pi R^2 \left(R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2\right)^{1/2} + \frac{\pi}{3} \left(R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2\right)^{3/2} \quad (4.17 \text{ ก})$$

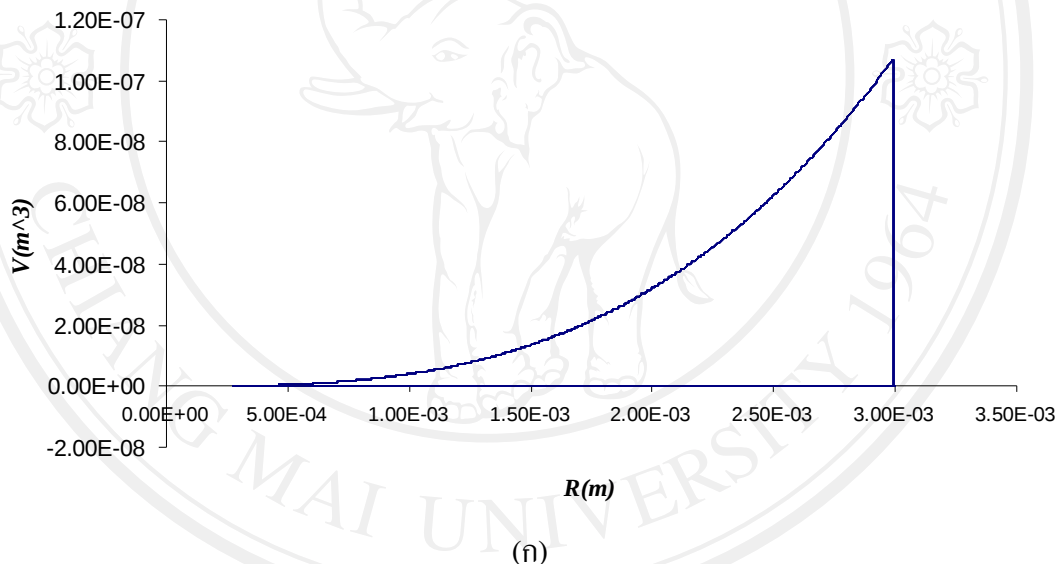
$$V_B = \frac{2}{3}\pi R^3 + \pi R^2 \left(R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2\right)^{1/2} - \frac{\pi}{3} \left(R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2\right)^{3/2} \quad (4.17 \text{ ข})$$

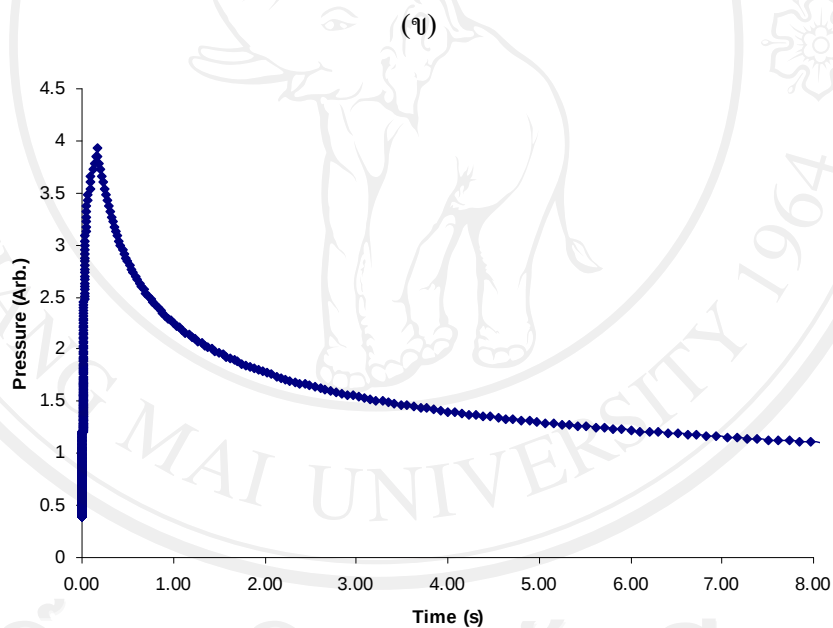
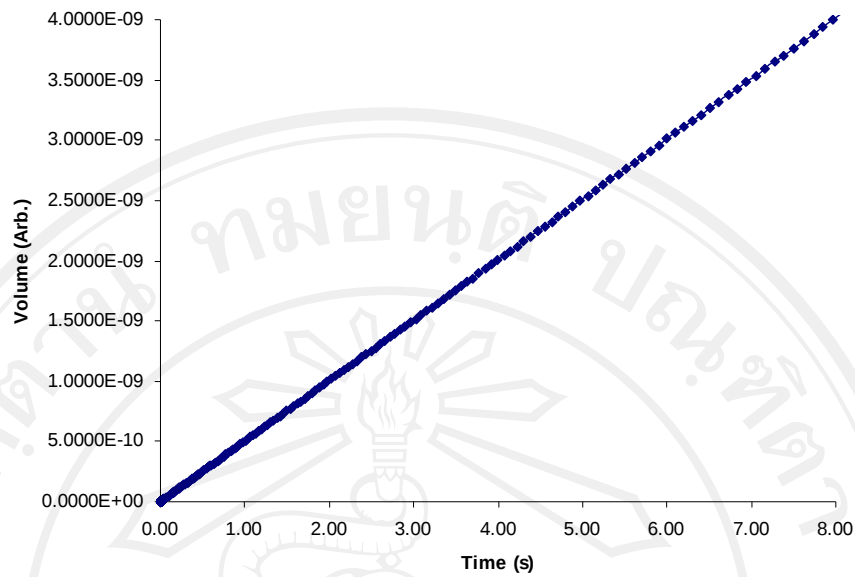
เมื่อเขียนกราฟระหว่างปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจนถึงปริมาตรสมมุติสุดท้ายที่ของเหลวจะหลุดออก เทียบกับรัศมีที่เพิ่มขึ้น จะได้ผลดังรูปที่ 4.13 (ก)

เมื่ออัตราการไหลคงที่จะได้ว่า

$$t = t_0 + \Delta t = t_0 + \Delta V(R)/Q \quad (4.18)$$

และขณะที่ รัศมีมีค่าหนึ่ง ณ เวลานั้นจะสามารถคำนวณความดันภายในหยดของเหลวด้วยสมการ (2.163) จากนั้นเขียนกราฟระหว่าง ค่าความดันกับเวลาเพื่อเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง ซึ่งจะได้กราฟดังรูปที่ 4.13 (ข)





รูปที่ 4.15 (ก) กราฟระหว่างปริมาตรและรัศมีของแบบจำลองที่สร้างขึ้น

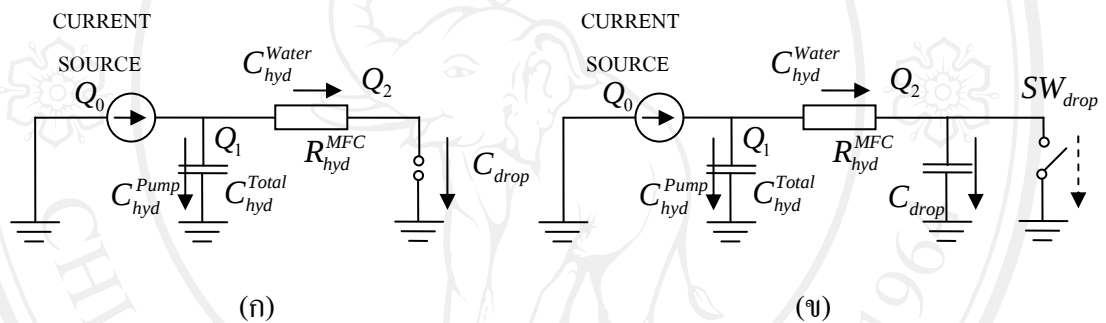
(ข) กราฟระหว่างปริมาตรที่เพิ่มขึ้นกับเวลา

(ค) กราฟระหว่างค่าความดันที่เพิ่มขึ้นกับเวลา

จากรูปที่ 4.13 จะพบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลการทดลอง จึงประมาณว่าการกำหนดให้ของไหลมีลักษณะกลมสมมาตร สามารถรองรับ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของระบบได้ แต่ทว่าการวัดค่าความดันน้อยๆด้วยระบบเช่นนี้มักมีผลกับพฤติกรรมของ

ระบบ ดังนั้นจะทำการประมาณ อุปกรณ์สมมูลในวงจรของไหล ที่สอดคล้องกับ แบบจำลองการหยดออกของของไหล โดยใช้ความคล้ายคลึงของผลการสร้างแบบจำลอง กับพฤติกรรมของอุปกรณ์สมมูลในวงจรของไหล โดยประมาณว่าการหายไปของปริมาตรของไหลที่กลายเป็นหยดนั้นมีพฤติกรรมคล้ายกับ ความจุของไหลเมื่อของไหลมีปริมาตรเพิ่มขึ้นความดันที่จุดต่อระหว่างระบบก็จะเพิ่มขึ้นตามเช่นเดียวกับการอัดประจุในวงจรไฟฟ้าที่ประจุแปรผันตรงกับความต่างศักย์

แต่ทว่าเมื่อปริมาตรใหญ่ขึ้นจนหลุดออกนั้นหมายความว่าปริมาตรหายออกไปจากระบบในทันทีทันใด คล้ายกับการลัดวงจร และหลังจากนั้นประจุก็จะถูกสะสมเพิ่มขึ้นเป็นวัฏจักร ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายกับการเบรคดาวน์ (breakdown) ของฉนวนหรือตัวเก็บประจุ หรือกระทั่ง ช่องว่างจุลระเบิด (spark gap) ในวงจรไฟฟ้าแรงดันสูง ดังนั้นจึงสร้างแบบจำลอง ระบบออกมาดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 วงจรสมมูลที่สร้างขึ้นจากรูปที่ 3.17 และการประมาณการทดลอง

- (ก) ประมาณการหยดออกของหยดของไหลเป็น spark gap ในวงจรไฟฟ้า
- (ข) ประมาณการหยดออกของหยดของไหลเป็นอุปกรณ์พื้นฐานคือความจุของไหลกับสวิตช์หรือวาล์วของไหล โดยสวิตช์หรือวาล์วดังกล่าวจะทำงานเมื่อของไหลมีปริมาตรถึงขีดจำกัด

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อความดันที่ไม่คงที่ตามสมการ (2.186) ไม่ต่อเนื่องในสถานะการณ์จริง เพราะมีปริมาตรหายออกไปจากระบบทันทีทันใด ดังรูปที่ 4.3 (ก) จึงเป็นการยากที่จะประมาณว่า ค่าความจุของไหลเป็นค่าคงที่ดังเช่นในกรณีของ ตัวمانอมิเตอร์ และเครื่องวัด โดย อาศัยกฎลูกโซ่

$$C_{hyd} = -\frac{dV_f}{dp} = -\frac{dV_f}{dR} \frac{dR}{dp} \quad (4.19)$$

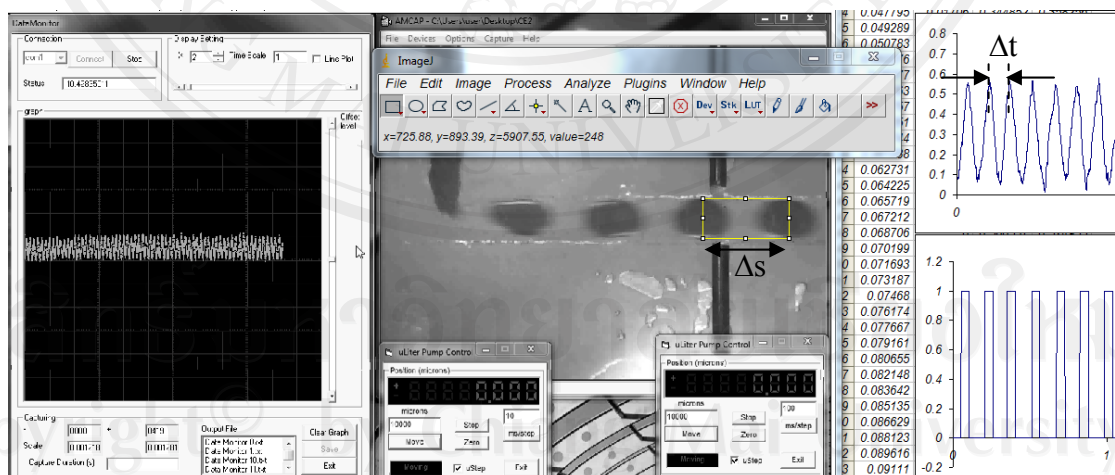
$$C_{hyd} = \left[\pi R^2 \mp \frac{\pi R^3}{2} (R^2 - (D/2)^2)^{-1/2} \mp \pi R (R^2 - (D/2)^2)^{1/2} \pm \frac{\pi R}{2} (R^2 - (D/2)^2)^{3/2} \right] \frac{R^2}{\gamma} \quad (4.20)$$

ซึ่งจะได้ว่าค่าความจุของไหลในที่นี้ไม่ได้เป็นค่าคงที่ เช่นที่ผ่านมาแต่กลับขึ้นกับรัศมีของหยดของเหลวที่หยดออกมา ดังนั้นการสร้างแบบจำลองสำหรับการหยดออกของของเหลวปลายท่อขนาดเล็ก จึงทำได้เพียงคร่าวๆ ดังรูปที่ 4.14 เท่านั้น

การทดลองนี้จึงสรุปได้เพียงว่าการเปลี่ยนแปลงความดันในระบบส่วนหนึ่งมาจากผลของแรงตึงผิวของของไหลที่เปียกและหยดออกบริเวณปลายท่อ ทั้งนี้เมื่อต้องการตัวแบบจำลองของวงจรสมมูลที่สมบูรณ์และง่ายขึ้นจะต้องทำการทดลองศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

4.7 การทดลองเพื่อพัฒนาระบบนับจำนวน microbead counter ในเบื้องต้น

สำหรับผลการทดลองขนาดของความกว้างต่อความยาวของ droplet ในโครงข่ายรูปตัวที นั้นผลการทดลองยังคงสอดคล้องกับ สมการ (2.173) และยืนยันผลการทดลองได้เป็นอย่างดี เช่น ผลงานของ Garstecki *et. al.* (2006) และ Puttaraksa *et. al.*, (2011) ในที่นี้จะพิจารณาผลการทดลองเปรียบเทียบความเร็วของ Droplet ที่วัดได้จากระบบนับจำนวน กับความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่ได้จากการคำนวณจากอัตราส่วนอัตราการไหลรวมของ syringe pump ทั้งสองกับพื้นที่หน้าตัดรวมของไมโครแชนแนลซึ่งคำนวณจากรัศมีการไหลของของไหล สำหรับวิธีการวัดความเร็วของ droplet จากสัญญาณจะแสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แสดงการวัดระยะทาง Δs จากภาพวิดีโอที่บันทึกได้ และเวลา Δt เพื่อหาค่าความเร็วของ droplet ที่สถานะสมดุล

จากผลการทดลองดังกล่าวจะได้ผลการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วของ droplet ที่วัดได้จากการทดลองและการคำนวณดังตาราง 4.8 โดยขนาดพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของไมโครเซนแนลที่ทำ การทดลองคือ $172.0\ \mu\text{m} \times 711.5\ \mu\text{m}$

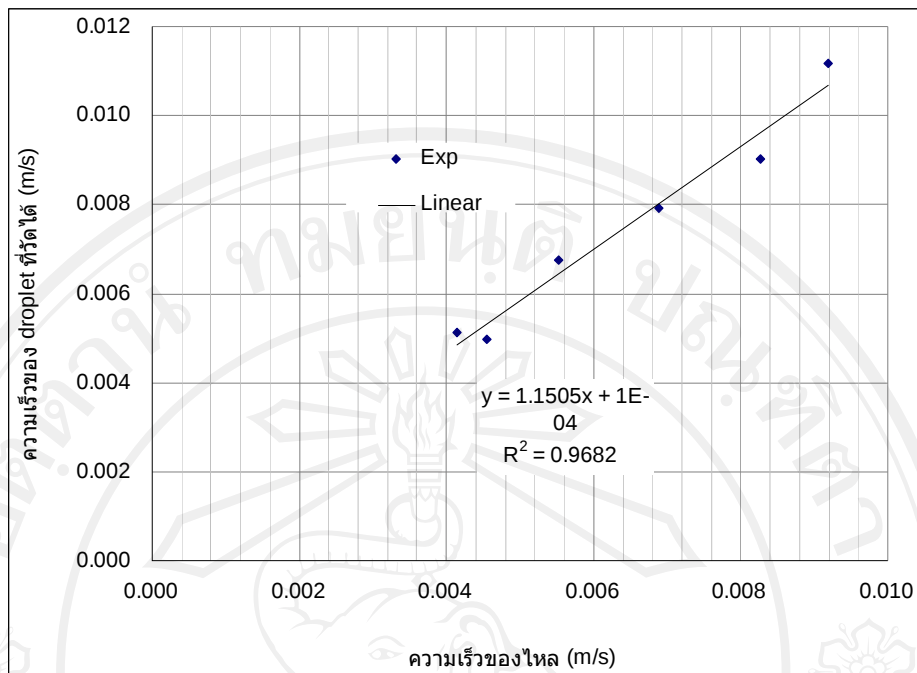
ตาราง 4.8 เปรียบเทียบความเร็ว droplet จากการคำนวณและการทดลอง

ความเร็วเฉลี่ยของไหล จากการคำนวณ (m/s)	ความเร็วของdroplet ที่ วัดได้จากการทดลอง (m/s)	% คลาดเคลื่อน
4.551×10^{-3}	4.973×10^{-3}	9.27
6.895×10^{-3}	7.928×10^{-3}	14.98
5.516×10^{-3}	6.762×10^{-3}	22.58
4.137×10^{-3}	5.111×10^{-3}	23.54
8.274×10^{-3}	9.016×10^{-3}	8.96

จากตารางพบว่า ค่าความเร็วของ droplet ที่ทดลองได้มีค่ามากกว่า ค่าที่ความเร็วเฉลี่ยของไหลที่ได้จากการคำนวณในทุกเงื่อนไขการทดลอง และมีแนวโน้มใกล้เคียงและแปรไปในทางเดียวกัน เมื่อนำค่าความเร็วเฉลี่ยของ droplet ที่ได้จากการทดลอง มาเขียนกราฟเทียบกับค่าความเร็วของของไหลที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งจะได้อัตราที่ 4.18 โดยพบว่าในช่วง ความเร็วของของไหลในท่อซึ่งมีค่าประมาณ 0.004 – 0.008 เมตร/วินาที เป็นเชิงเส้น แปรตามกัน

เมื่อใช้การถดถอยเชิงเส้นในการคำนวณเส้นแนวโน้มจะพบว่าค่าคงที่ของการแปรผันมีค่า ใกล้เคียงกับ 1 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่า 0.983 ซึ่งแสดงว่าข้อมูลทั้งสองมีความเป็นเชิงเส้นมาก โดยค่าคงที่ในสมการเชิงเส้นนั้นจะตีความว่าเป็นค่าคลาดเคลื่อนเชิงระบบจากการทดลอง ซึ่งสามารถสรุปได้ในเบื้องต้นว่าในช่วงความเร็วของอนุภาคของไหลดังกล่าวความเร็วของ droplet มีค่าประมาณความเร็วของอนุภาคของของไหลตัวพา

เมื่อใช้ค่าความเชื่อมั่น 90 % หรือระดับนัยสำคัญ 0.1 ทดสอบสมมติฐานว่าค่าความชันของกราฟเท่ากับ 1 หรือไม่ พบว่าค่าความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งสรุปได้ว่าความเร็วของ droplet มีค่าเท่ากับค่าความเร็วเฉลี่ยเมื่ออัตราการไหลมีค่า 0.004 – 0.008 เมตร/วินาที



รูปที่ 4.18 กราฟระหว่างความเร็วของ droplet ที่วัดได้กับค่าความเร็วเฉลี่ยของของไหล