

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ช
สารบัญ	ณ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎี	5
2.1 สมการที่เกี่ยวข้อง	5
2.1.1 ค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์	5
2.1.2 การประมาณความต่อเนื่อง	7
2.1.3 สมการเชิงอนุพันธ์มวล	7
2.1.4 สมการอนุพันธ์โมเมนต์	9
2.1.4.1 การไหลที่ไม่มีผลของความหนืด	11
2.1.4.2 การไหลที่มีผลของความหนืด	12
2.1.5 สมการเชิงอนุพันธ์พลังงาน	13
2.1.6 ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์	17
2.2 ของไหลในสมดุล	20
2.3 การไหลของของไหลในท่อไมโครฟลูอิดิกส์	20
2.3.1 การไหลแบบราบเรียบ และเลขเรย์โนลด์	21
2.3.2 การไหลในท่อตรงที่มีพื้นที่หน้าตัดใดๆ	23
2.3.3 การไหลในท่อตรงที่มีพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยม	26

2.3.4 การไหลในท่อโค้งที่มีพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยม	28
2.3.5 การไหลในท่อโค้ง 90 องศาที่มีพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยม	36
2.3.6 รูปแบบการไหลในท่อที่มีความซับซ้อนบนพื้นผิว	38
2.4 การไหลของของไหลที่ขึ้นกับเวลา	46
2.5 แรงตึงผิวของของไหลและหยดของไหล	50
2.6 ทฤษฎีวงจรสมมูลของไหล	56
2.6.1 แหล่งจ่ายของไหล	56
2.6.2 ความต้านทานการไหล(hydraulic resistance)	57
2.6.3 ความจุการไหล (hydraulic compliance/capacitance)	61
2.6.4 ความเหนี่ยวนำการไหล (hydraulic inductance / hydraulic inertia)	61
2.6.5 การสร้างวงจรสมมูลของไหล (equivalent circuit modeling)	62
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	63
3.1 การวัดความดันในระบบ	63
3.1.1 เครื่องวัดความดันแบบปรอท	63
3.1.2 การอ่านค่าความดันที่เวลาต่างๆ จากมานอมิเตอร์	64
3.1.3 เครื่องวัดความดันจากความต้านทานเพียโซ	65
3.1.4 การอ่านค่าความดันจากเครื่องวัดความดันจากความต้านทานเพียโซ	72
3.2 การวัดอัตราการไหลในระบบ	72
3.2.1 การวัดอัตราการไหลโดยวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อเวลา	73
3.2.2 การวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลต่อเวลา	73
3.3 การสร้างไมโครเซนเซอร์ด้วยเทคนิค EWBT	73
3.3.1 เขียนแบบรูปร่างโครงข่ายไมโครฟลูอิดิกชิป	74
3.3.2 ทำฟิล์มแม่แบบสำหรับทำแม่แบบหล่อซิลิโคน	76
3.3.3 เตรียมพื้นผิวแผ่น PCB	76
3.3.4 เคลือบ PCB ด้วยสเปรย์แสงหรือฟิล์มไวแสง	76
3.3.5 คัดลอกลายลงบนฟิล์มไวแสงหรือฉายแสง	77
3.3.6 ล้างฟิล์มไวแสงออก	77

3.3.7 การกัดกรด	77
3.3.8 การล้างทำความสะอาดแม่แบบ	78
3.3.9 การเตรียม PDMS	78
3.3.10 การหล่อไมโครฟลูอิดิกชิป	78
3.3.11 การตัดขอบการและเจาะรู ต่อท่อ	79
3.3.12 การประกบปิดท่อ	79
3.3.13 การต่อท่อ	80
3.3.14 การทดสอบก่อนใช้งาน	80
3.4 การออกแบบการทดลอง	80
3.4.1 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการใช้กับผลต่างความดันทั้งสองปลาย ของไมโครเซนแนล	81
3.4.2 การทดลองเพื่อหาผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน เนื่องจากความตึงผิว ที่อัตราการใช้ต่างกัน	87
3.4.3 การทดลองเพื่อพัฒนาระบบนับจำนวน microbead counter ในเบื้องต้น	88
บทที่ 4 ผลการทดลอง	96
4.1 ค่าคงที่ในการทดลอง	96
4.2 ความละเอียดของเครื่องมือวัด	96
4.3 พื้นผิวของไมโครเซนแนล	97
4.4 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความต้านทานการใช้ R_h ให้คงที่ค่าหนึ่ง โดยให้อัตราการใช้ของปั๊ม Q ผ่านไมโครเซนแนลเปลี่ยนเป็นค่าต่างๆ แล้ววัด ผลต่างความดัน Δp ระหว่างปลายทั้งสองด้านของไมโครเซนแนล	101
4.4.1 รูปแบบการใช้ที่วัดได้จากระบบวัดที่ใช้ไมโครเมตร และการถ่ายภาพวิเคราะห์ทาง	101
4.4.2 รูปแบบผลต่างความดันที่วัดได้จากเครื่องวัดความดัน	104
4.4.3 การสร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายการทดลองจาก EC Theory	107

4.4.4 การคำนวณค่าความต้านทานการไหลและความจุการไหล สำหรับใช้ใน EC Theory	109
4.4.5 กราฟเปรียบเทียบความดันกับเวลาระหว่างผลการทดลอง กับการคำนวณโดย EC theory	111
4.5 ผลการทดลองเมื่อควบคุมอัตราการไหลของปั๊ม Q ให้คงที่ค่าหนึ่ง โดยเปลี่ยนความต้านทานการไหล R_h เป็นค่าต่างๆ แล้ววัดผลต่างความดัน Δp	112
4.5.1 การเปลี่ยนแปลงผลต่างความดันในไมโครเซนแนล พื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมตรง	113
4.5.2 การเปลี่ยนแปลงผลต่างความดันในไมโครเซนแนล พื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมโค้ง	116
4.5.3 การเปลี่ยนแปลงผลต่างความดันในไมโครเซนแนล พื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมหักมุม	119
4.6 การทดลองเพื่อหาผลของการเปลี่ยนแปลงความดันเนื่องจากความตึงผิว ที่อัตราการไหลต่างกัน	122
4.7 การทดลองเพื่อพัฒนาระบบนับจำนวน microbead counter ในเบื้องต้น	127
บทที่ 5 สรุปผล	130
เอกสารอ้างอิง	132
ภาคผนวก	137
ภาคผนวก ก สมบัติของ PDMS	138
ภาคผนวก ข โค้ดโปรแกรมภาษา C สำหรับเครื่องวัดค่าความดัน	139
ประวัติผู้เขียน	147

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 ความกว้างเฉลี่ยจากการวัดขนาดของแม่แบบไมโครเซนแนล ด้วยกล้องจุลทรรศน์ และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความกว้างที่คำนวณได้จากตำแหน่งการวัดต่างๆ ในขั้นตอนหลังจากการถ่ายภาพ การล้างสารไวแสงออก และหลังการกัดกรวดตามลำดับ	99
4.2 ค่าสถิติ t_{cal} ที่คำนวณได้จาก (4.2) ของความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของท่อที่วัดจากแม่แบบกับค่าความขรุขระในกระบวนการต่างๆ	100
4.3 แสดงค่าผลต่างความดันทั้งสองปลายของไมโครเซนแนล อัตราการไหลในไมโครเซนแนล และความต้านทานการไหลที่คำนวณได้จากค่าทั้งสองผ่านสมการ (2.174)	106
4.4 ขนาดของไมโครเซนแนลเบอร์ต่างๆที่ใช้ทำการทดลอง	113
4.5 ค่า R_{hyd}^{MFC} และค่า C_{hyd}^{Total} ที่คำนวณได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี	115
4.6 เปรียบเทียบค่าความต้านทานของไหลที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณของไมโครเซนแนลพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมโค้งครึ่งวงกลม	117
4.7 เปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าความต้านทานของไหลของไมโครเซนแนลสี่เหลี่ยมโค้งจากการทดลองและการคำนวณกับค่าความต้านทานการไหลไมโครเซนแนลสี่เหลี่ยมตรงที่ได้จากการคำนวณโดยสมการ (2.174) และ (2.80)	118
4.8 เปรียบเทียบความเร็ว droplet จากการคำนวณและการทดลอง	128

สารบัญภาพ

รูป		หน้า
2.1	แสดงการเคลื่อนที่เฉพาะส่วนย่อยของก้อนอนุภาคของไหลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง ที่ 1 เวลา t_1 ด้วยความเร็ว $\vec{V}_1(u_1, v_1, w_1)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่มีค่าขึ้นกับ ความเร็วในแกน x, y, z ไปยังตำแหน่งที่ 2 ที่เวลา t_2 โดยที่มีความเร็วสุดท้ายเป็น $\vec{V}_2(u_2, v_2, w_2)$	5
2.2	แสดงปริมาณพลัซซ์ของมวลที่ไหลเข้าและออกจากปริมาตร $dxdydz$	8
2.3	แรงกระทำที่ผิว ($d\vec{F}_{surface}$) และแรงที่กระทำกับก้อนของไหลปริมาตร $dxdydz$ ทั้งก้อน ($d\vec{F}_{body}^{other}$) เฉพาะแนวแกน x	9
2.4	แสดงพลัซซ์ของพลังงานในทิศแกน x ที่ไหลผ่านก้อนมวลซึ่งเคลื่อนที่ไปกับการไหล ณเวลาหนึ่ง	14
2.5	การไหลแบบ Poiseuille flow ของของไหลบีบอัดไม่ได้ในท่อตรงตามแนวแกน x ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดใดๆเป็น C (บริเวณแรงเงา) และมีขอบเขตคือ ∂C ความยาว L ซึ่งทางปลายซ้ายของท่อมีความดันมากกว่าปลายด้านขวาด้วยความแตกต่าง Δp	23
2.6	ลักษณะภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมของไมโครฟลูอิดิกส์ชิปที่สร้างด้วยเทคนิค EWBT ถ่ายโดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 65 เท่า	26
2.7	แผนภาพการไหลในท่อพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยม กว้าง ω สูง h ยาว L ซึ่งมีผลต่างความดันระหว่างปลายท่อทั้งสอง Δp	26
2.8	ลักษณะภาคตัดขวางและการหมุนวนในท่อสี่เหลี่ยมโค้งในพิกัด ทรงกระบอกที่มีรัศมีความโค้งวัดจากกึ่งกลางท่อมีความยาว R โดยในที่นี้กำหนดว่า $\vec{V}(v_r, v_\theta, v_z)$ และ $\vec{V}(r, \theta, z, t)$	29
2.9	ลักษณะกราฟระหว่างสัดส่วนของอัตราการไหลที่ $k > 0$ ต่ออัตราการไหลที่ $k = 0$ กับค่า k (Dean, 1959)	33
2.10	รูปแบบของความเร็วในท่อของไหลบนระนาบ ของ $\tilde{v}_\theta$ กับ $\tilde{x}$ ที่ k ต่างกัน (Dean, 1959)	34

- 2.11 เส้นกระแสปฐมภูมิจากการคำนวณจาก velocity vector ที่ได้จากการทดลอง
ถ่ายภาพโดยใช้ (particle image velocimetry :PIV Method) ของการไหลผ่านท่อ
หักมุมที่ถูกต้องที่มุม 90 องศา ของ (Xiong and Chun.,2008) 36
- 2.12 เส้นกระแสทุติยภูมิหลังผ่านท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด $5 \times 5 \mu\text{m}$ ยาว $400+400 \mu\text{m}$
มุมงอ 90 องศา จากการคำนวณแบบตาราง(computer grid) ที่ เลขเรย์โนลด์
 $0.056, 0.56, 5.6, 56, 280$ และ 560 ตามลำดับ (Tanisell et. al.,2011) 37
- 2.13 (ก) ไมโครเซนแนลที่มองจากด้านบน ซึ่งมีความขรุขระด้านข้างมีความกว้าง
 w และมีความยาว L โดยกำหนดให้ไมโครเซนแนลมี การเปลี่ยนแปลงความ
กว้างบริเวณพื้นผิว (shape-perturbed) และถูกผลักดันด้วยความดัน Δp ที่
 $z = 0$
(ข) ความยาวไร้หน่วย $\tilde{a}, \tilde{b}$ และ $\tilde{c}$ ซึ่งนิยามขึ้นให้เป็นตัวแปรไร้หน่วย
ในขอบเขตที่มี ความกว้างและยาว 1 หน่วย 38
- 2.14 (ก) ไมโครเซนแนล 2 มิติ ที่มองจากด้านบน ซึ่งมีความเรียบด้านหนึ่งและมี
ความขรุขระด้านหนึ่ง มีความกว้าง w และมีความยาว L โดยกำหนดให้
ไมโครเซนแนลมี การเปลี่ยนแปลงความกว้างบริเวณพื้นผิว (shape-perturbed)
และถูกผลักดันด้วยความดัน Δp ที่ $z = 0$
(ข) ความยาวไร้หน่วย $\tilde{a}$ และ $\tilde{c}$ ซึ่งนิยามขึ้นให้เป็นตัวแปรไร้หน่วย ในขอบเขต
ที่มีความกว้างและยาว 1 หน่วย 42
- 2.15 ลักษณะพื้นผิวซึ่งแสดงขนาดความเร็วในทิศทางการไหลเป็นเมตรต่อวินาที
บนพื้นที่หน้าตัดของไมโครเซนแนลขนาด ความสูง×ความกว้าง $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 49
- 2.16 (ก) แสดงความดันภายในที่เกิดจากแรงตึงผิวที่ตึงพื้นผิว $dx dy$ ของหยดของไหล
ซึ่งต่อต้านการขยายออกของพื้นผิวที่ยืดออกเป็นระยะ dz ทำให้พื้นที่ผิว
ของของไหล เปลี่ยนเป็น $(1 + dz / R_1)(1 + dz / R_2)$
(ข) ภาพมองจากด้านบนแสดงระยะ dx ของผิวโค้งตามแนว R_1 ที่ขยายเพิ่มขึ้น
ตามทิศ θ เป็น $(1 + dz / R_1)dx$ 51
- 2.17 แสดงรูปแบบของค่าความดันในแต่ละขณะที่เกิดหยดของเหลวบริเวณปลายท่อ
ที่เวลาต่างๆ (Fainerman et. al., 2004) (ลูกศรในภาพแสดงว่าหยด
ของเหลวได้หลุดออกจากท่อไป) 52

2.18	แผนภาพการเกิด droplet ในระบบไมโครฟลูอิดิกส์ ของไหลต่างชนิดซึ่งไม่ผสมกันจะถูกผลักดัน ด้วยความดัน p_c และ p_d มีอัตราการไหล Q_c และ Q_d ตามลำดับไปยังบริเวณที่มีความดันต่ำกว่า คือ p_o และมีอัตราการไหล Q_o	54
2.19	(ก) ความยาวสมมูลของท่อโค้งรัศมีกับอัตราส่วน r/D (ข) ความยาวสมมูล ของท่ออหักมุม กับองศา (Robert <i>et. al.</i> , 2010)	60
3.1	แผนภาพวิธีอ่านค่าความดันจากมานอมิเตอร์ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ (3.2)	63
3.2	แสดงระบบที่ใช้ถ่ายภาพ ซึ่งควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์	64
3.3	แสดงภาพตัวอย่างที่ถ่ายได้ จากกล้องถ่ายรูป ทั้งสองกล้อง	64
3.4	โครงสร้างภายในของตัวตรวจวัดความดัน ความดันจาก pressure port จะทำให้เกิดแรงเค้นบนแผ่นซิลิกอน และทำให้ค่าความต้านทานของ Implanted piezoresistive resistor เปลี่ยนแปลงไป (Halbo and Ohlckers, 1995)	65
3.5	ตัววัดความดันเบอร์ SMD 085 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (Bosch Sensor tech GmbH, 2005)	66
3.6	รูปแผ่นวงจรสองหน้า ที่ออกแบบสำหรับใช้เป็น ตัววัดความดัน	68
3.7	วงจรอ่านค่าความดันด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A (Microchip Technology Inc , 2003)	69
3.8	รูปซ้ายแสดงโครงสร้างของตัววัดความดันที่ออกแบบไว้โดยใช้แหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่ 9V และรูปขวาแสดงภาพถ่ายตัววัดความดันที่ประกอบเสร็จ	70
3.9	ผลการสอบเทียบเครื่องวัดความดันทั้งสองที่ใช้ในการทดลองนี้ เพื่อใช้หาความสัมพันธ์ของการไหลหรือค่าคงที่การแปรผัน m ในฟังก์ชันการแปลงสมการ (3.1)	71
3.10	ซ้ายโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อรับค่าความดันจากเครื่องวัดความดันที่สร้างขึ้นจากกราฟของข้อมูลความดันซึ่งบันทึกค่าไว้ได้ทุกๆวินาที โดยมีความละเอียดในระดับ 0.1 มิลลิเมตรปรอท	72
3.11	ภาพตัวอย่างฟิล์มแม่แบบไมโครเซนแนลที่ใช้ในงานวิจัยนี้	74
3.12	แผนผังขั้นตอนการทำไมโครเซนแนลบนไมโครฟลูอิดิกชิป	75
3.13	การจัดการทดลองเพื่อตรวจสอบผลการทดลองกับ Poiseuille law	81

3.14	การจัดการทดลองโดยใช้เครื่องวัดค่าความดัน	84
3.15	การจัดการทดลองเพื่อศึกษาผลต่างความดันระหว่างปลายทั้งสอง ของไมโครเซนแนลที่มีรูปแบบต่างๆด้วยมานอมิเตอร์	84
3.16	การจัดการทดลองเพื่อศึกษาผลต่างความดันระหว่างปลายทั้งสอง ของไมโครเซนแนลที่มีรูปแบบต่างๆโดยใช้เครื่องวัดความดัน	87
3.17	การจัดการทดลองเพื่อศึกษาผลของความตึงผิวโดยใช้เครื่องวัดความดัน	87
3.18	การประมาณปัญหาสำหรับการออกแบบระบบตรวจจับอนุภาค	90
3.19	กราฟระหว่างค่าความจุที่วัดได้ระหว่างอิเล็กโทรด C_{total}^f กับค่า C^f ที่ค่า C_{PDMS} ต่างกัน	90
3.20	แผนผังกระบวนการวัดค่า C_x ที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากมีอนุภาคในไมโครเซนแนล	91
3.21	(ก) ภาพขณะที่มี droplet อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดภาพล่างภาพขณะที่ droplet มีอัตราเร็วคงที่	92
	(ข) ผลการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่วัดได้จาก droplet ที่วิ่งผ่าน ขั้วอิเล็กโทรดกับภาพที่ได้จากการบันทึกวิดีโอในขั้นตอนการทดสอบ	93
3.22	(ก) วงจร capacitive droplet detection ส่วน oscillator	93
	(ข) วงจร capacitive droplet detection ส่วน oscillator	94
3.23	การจัดการทดลองเพื่อศึกษาความเร็วของอนุภาค droplet ที่แขวนลอย ในของเหลวพาหะกับอัตราการไหลจากการขับโดย syringe pump	95
4.1	(ก) แสดงการวัดระยะทางตามแนวกว้างและยาว ไมโครเซนแนลเพื่อคำนวณ ค่าความขรุขระ R_{rms} (มองจากด้านบน)	98
	(ข) ลักษณะพื้นผิวของไมโครเซนแนลถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ขยาย 250 เท่าของไมโครเซนแนลความกว้างเฉลี่ย $720 \mu m$	98
4.2	(ก) กราฟระหว่างผลต่างความดันกับเวลา	102
	(ข) กราฟระหว่างอัตราการไหลกับเวลา	102
4.3	(ก) แสดงค่าความดันที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่เลขเรย์โนลด์ 3	
	(ข) แสดงลักษณะของสนามความเร็ว (velocity field) ในไมโครเซนแนล	104

4.4	แสดงค่าความดันที่วัดได้จากเครื่องอ่านค่าความดันที่ประดิษฐ์ขึ้น เมื่อขับปั๊มและหยุดปั๊มน้ำด้วยอัตราการไหล $1.00 \mu\text{l/s}$, $0.50 \mu\text{l/s}$, $0.33 \mu\text{l/s}$, $0.25 \mu\text{l/s}$, $0.17 \mu\text{l/s}$ ในไมโครเซนแนล ที่มีพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมตรง	104
4.5	กราฟความดันบรรยากาศในห้องทดลองที่เปลี่ยนแปลงไปในระยะเวลา 13 ชั่วโมง 40 นาที	105
4.6	(ก)แผนภาพการทดลองที่ลดทอนรายละเอียดจากภาพ 3.13 และการกำหนดตัวแปร (ข)แผนภาพวงจรสมมูลที่แปลงมาจากภาพการทดลอง	107
4.7	เปรียบเทียบกราฟระหว่างผลต่างความดันระหว่างปลายทั้งสองด้าน ของไมโครเซนแนลที่ได้จากการทดลอง (เส้นประ) กับที่ได้จากการคำนวณ โดยสมการ(4.10) (เส้นทึบ)	112
4.8	ภาพแม่แบบไมโครโครฟลูอิดิกส์ชิปที่ใช้ทำการทดลอง	112
4.9	เปรียบเทียบกราฟระหว่างผลต่างความดันระหว่างปลายทั้งสองด้าน ของไมโครเซนแนลที่ได้จากการทดลอง (เส้นประ) กับที่ได้จาก การคำนวณสมการ(4.10) (เส้นทึบ)ของไมโครเซนแนลเบอร์ต่างๆ	113
4.10	กราฟระหว่างผลต่างความดันระหว่างปลายทั้งสองของไมโครเซนแนล สี่เหลี่ยม ใ้กับเวลา ของไมโครเซนแนลที่มีอัตราส่วน ระหว่างความยาวรัศมีและเส้นผ่านศูนย์กลางของไหลต่างกัน คือ 39.1, 61.7 และ 132.2 ตามลำดับ	116
4.11	ตัวอย่างค่าความดันที่บันทึกได้ที่เวลาต่างๆจากการทดลองการไหลใน ไมโครเซนแนลสี่เหลี่ยมหักมุม ที่มุมเบี่ยงเบนไปจากแนวตรงค่าคือ 0, 45, 60 และ 90 องศา	119
4.12	กราฟเปรียบเทียบความต้านทานการไหลของไมโครเซนแนลสี่เหลี่ยมหักมุม จากการทดลองและการคำนวณ	120
4.13	ค่าความดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงตึงผิวเทียบกับเวลาที่อัตราขับปั๊ม τ 30 15 และ $10 \mu\text{s/step}$	122

4.14	การสร้างแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อพิจารณาผลของแรงดึงดูดกับความดันในระบบของไหล เพื่อช่วยในการสร้าง อุปกรณ์ในวงจรสมมูล (EC component) ซึ่งเกิดจากผลของแรงดึงดูดที่ปล่อยปลายท่อขนาดเล็กในระบบของไหลสู่อากาศ	123
4.15	(ก) กราฟระหว่างปริมาตรและรัศมีของแบบจำลองที่สร้างขึ้น	124
	(ข) กราฟระหว่างปริมาตรที่เพิ่มขึ้นกับเวลา	125
	(ค) กราฟระหว่างค่าความดันที่เพิ่มขึ้นกับเวลา	125
4.16	วงจรสมมูลที่สร้างขึ้นจากภาพ 3.17 และการประมาณการทดลอง	
	(ก) ประมาณการหยดออกของหยดของไหลเป็น spark gap ในวงจรไฟฟ้า	126
	(ข) ประมาณการหยดออกของหยดของไหลเป็นอุปกรณ์พื้นฐานคือความจุของไหลกับ สวิตช์หรือวาล์ว ของไหล โดยสวิตช์, หรือวาล์วดังกล่าวจะทำงานเมื่อของไหลมีปริมาตรถึงขีดจำกัด	126
4.17	แสดงการวัดระยะทาง Δs จากภาพวิดีโอที่บันทึกได้ และเวลา Δt เพื่อหาความเร็วของ droplet ที่สถานะสมดุล	127
4.18	กราฟระหว่างความเร็วของ droplet ที่วัดได้กับค่าความเร็วเฉลี่ยของของไหล	129