

การขนส่งอนุภาคและเซลล์ในช่องทางไหลจุลภาคด้วยอิเล็กโทรออสโมซิสและอิเล็กโทรโฟเรซิส



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TRANSPORTATION OF PARTICLES AND CELLS IN MICROCHANNELS BY
ELECTROOSMOSIS AND ELECTROPHORESIS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การขนส่งอนุภาคและเซลล์ในช่องทางไหลจุลภาคด้วยอิเล็กโตรออสโมซิสและอิเล็กโตรโฟเรซิส
โดย	นายพิสิฐชัย กำมณี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

พิสิฐชัย กำมณี : การขนส่งอนุภาคและเซลล์ในช่องทางไหลจุลภาคด้วยอิเล็กโทรออสโมซิสและอิเล็กโทรโฟเรซิส. (TRANSPORTATION OF PARTICLES AND CELLS IN MICROCHANNELS BY ELECTROOSMOSIS AND ELECTROPHORESIS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.บุญชัย เตชะอำนาง

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการขนส่งอนุภาคและเซลล์ในช่องทางไหลจุลภาคด้วยอิเล็กโทรออสโมซิสและอิเล็กโทรโฟเรซิส. วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์คือ ศึกษาการขับเคลื่อนของเหลวและการขับเคลื่อนอนุภาคหรือเซลล์ในช่องทางไหลจุลภาคด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า ที่สภาพนำไฟฟ้าของของเหลวที่แตกต่างกัน. การไหลของของเหลวถูกสังเกตด้วยสารเรืองแสงภายใต้สนามไฟฟ้า 0.025 kV/mm. การทดลองขนส่งอนุภาคและเซลล์กระทำภายใต้สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.005-0.04 kV/mm. ในการทดลอง อนุภาคพอลิสไตรีนขนาด 10 μm ถูกแขวนลอยในน้ำปราศจากไอออนที่มีสภาพนำไฟฟ้า 1, 5 และ 25 mS/m. เซลล์เม็ดเลือดแดง (ขนาด 6-8 μm) และเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข (15 μm) ถูกแขวนลอยในสารละลายเดกซ์โทรสที่มีสภาพนำไฟฟ้า 1 และ 12 mS/m ตามลำดับ. ผลการทดลองแสดงว่า ของเหลวไหลด้วยอิเล็กโทรออสโมซิสในทิศทางของสนามไฟฟ้า. กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ อนุภาคเคลื่อนที่ได้ระยะทางประมาณ 50-450 μm ที่สนามไฟฟ้า 0.006-0.032 kV/mm. กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม อนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงเคลื่อนที่ได้ระยะทางประมาณ 200-1400 μm และ 100-1000 μm ตามลำดับ ที่สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.01-0.04 kV/mm. เซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขเคลื่อนที่ได้ระยะทาง 40-500 μm ที่สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.005-0.025 kV/mm. ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์แปรผันตามสนามไฟฟ้าอย่างเป็นเชิงเส้น. กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่สภาพนำไฟฟ้า 1 และ 5 mS/m มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมากกว่าสภาพนำไฟฟ้า 25 mS/m. กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีค่าใกล้เคียงกันทุกสภาพนำไฟฟ้า. การขนส่งเซลล์ในช่องทางไหลจุลภาคด้วยอิเล็กโทรโฟเรซิสทำได้ โดยที่ไม่ทำให้เซลล์เกิดความเสียหายภายใต้สนามไฟฟ้าไม่เกิน 0.04 kV/mm สำหรับเซลล์เม็ดเลือดแดง และ 0.025 kV/mm สำหรับเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170471121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Electroosmosis, Electrophoresis, Particle, Red blood cell, Mast tumor cell

Pisitchai Kammanee : TRANSPORTATION OF PARTICLES AND CELLS IN MICROCHANNELS
BY ELECTROOSMOSIS AND ELECTROPHORESIS. Advisor: Prof. Boonchai Techaumnat,
Ph.D.

This thesis studies the transportation of particles and cells in microchannels by electroosmosis and electrophoresis. The objective of the thesis is to study the movement of fluid, or the movement of particles and cells in a microchannel by electrokinetics for different fluid conductivities. The flow of fluids was observed by using a fluorescent solution under an electric field at 0.025 kV/mm. The particle and cell transportation was done under 0.005-0.04 kV/mm average electric field. In the experiment, 10 μm polystyrene particles were suspended in deionized water of 1, 5 and 25 mS/m conductivity. The red blood cells (6-8 μm) and mast tumor cells (15 μm) were suspended in a dextrose solution, which has 1 and 12 mS/m conductivity, respectively. The results showed that the fluid flowed by electroosmosis in the electric field direction. In the case of sinusoidal voltages, the displacement of particles was approximately 50-450 μm at 0.006-0.032 kV/mm electric field. In the case of square pulse voltages, the displacement of particles and red blood cells was approximately 200-1400 μm and 100-1000 μm at 0.01-0.04 kV/mm electric field, respectively. The displacement of mast tumor cells was 40-500 μm at 0.005-0.025 kV/mm electric field. The displacement of particles and cells increased linearly with the electric field. In the case of sinusoidal voltages, the displacement of particles had similar values in the media of 1 and 5 mS/m conductivity, which were greater than that in 25 mS/m conductivity medium. In the case of square pulse voltages, the displacement of particles was similar in all media conductivity. The transportation of cells in the microchannels was possible by electrophoresis without cells damage under 0.04 kV/mm electric field for red blood cells and 0.025 kV/mm electric field for mast tumor cells.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล และรองศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช ที่ได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์. ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จตุรงค์ พุทธพรทิพย์ และนางสาวอรรุสยา พัฒนวงศ์ ภาควิชาปรสตีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ห่มอบเซลล์เม็ดเลือดแดง. ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ สัตวแพทย์หญิง ดร. อัจฉริยา ไสละสูตและนางสาวสุชญา พันธุ์พัฒนกุล ภาควิชาพยาธิวิทยา คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ห่มอบเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข. สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณครอบครัวและมิตรสหายที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา.

พิสิฐชัย กำมณี



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2. ทบทวนวรรณกรรม.....	2
1.3 วัตถุประสงค์	15
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	15
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 ประจุชั้นคู่ (Double-layer charge).....	16
2.2. อิเล็กโทรออสโมซิส.....	17
2.2.1. อิเล็กโทรออสโมซิสประเภทไฟฟ้ากระแสตรง.....	17
2.2.2. อิเล็กโทรออสโมซิสประเภทไฟฟ้ากระแสสลับ.....	19
2.3. อิเล็กโทรโฟเรซิส.....	20
บทที่ 3 การทดลอง	22
3.1 การสร้างระบบของไหลจุลภาค.....	22
3.1.1 ระบบของไหลจุลภาคสำหรับขับเคลื่อนของเหลว.....	23

3.1.2 ระบบของไหลจุลภาคสำหรับขนส่งอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดง.....	23
3.1.3 ระบบของไหลจุลภาคสำหรับขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข.....	23
3.2 การขับเคลื่อนของเหลว.....	25
3.3 การขนส่งอนุภาคและเซลล์.....	26
3.3.1 การขนส่งอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดง.....	26
3.3.2 การขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข.....	27
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล.....	30
4.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของของเหลว, อนุภาค และเซลล์.....	30
4.1.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของของเหลว.....	30
4.1.2 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์.....	30
4.2 ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์.....	36
4.2.1 ผลของสภาพนำไฟฟ้าของสารแขวนลอย.....	36
4.2.2 ผลของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า.....	38
4.2.3 เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างอนุภาคกับเซลล์.....	39
4.3 ค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาคและเซลล์.....	41
บทที่ 5 สรุป.....	44
บรรณานุกรม.....	46
ภาคผนวก ก.....	48
ภาคผนวก ข.....	52
ภาคผนวก ค.....	54
ภาคผนวก ง.....	58
ภาคผนวก จ.....	61
ประวัติผู้เขียน.....	68

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 รูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์.....	7
ตารางที่ 2 เวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละช่วง กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์.....	35
ตารางที่ 3 เวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละช่วง กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม.....	35
ตารางที่ 4 เวลาการเคลื่อนที่ของเซลล์เม็ดเลือดแดง.....	35
ตารางที่ 5 เวลาการเคลื่อนที่ของเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข.....	36
ตารางที่ 6 ค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาคและเซลล์.....	43



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1 รูปแบบการจัดเรียงอิเล็กโทรดสำหรับการทดลอง [3].	2
รูปที่ 2 แผนภูมิเปรียบเทียบความเร็วของป้อนอิเล็กโทรดอสโมติก ในกรณีที่มีและไม่มี การเคลือบพื้นผิวของช่องทางไหล [3].	3
รูปที่ 3 โครงสร้างของป้อนอิเล็กโทรดอสโมติกประเภทไฟฟ้ากระแสสลับ มีการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบเสาสีเหลี่ยมและแบบแยกช่อง	4
รูปที่ 4 การจัดเรียงอิเล็กโทรด	5
รูปที่ 5 การเคลื่อนที่ของอนุภาคสำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอสมมาตร	5
รูปที่ 6 หมวดการป้อนภายใต้ระนาบความถี่เทียบกับแรงดันไฟฟ้า สำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบสมมาตร วัดที่ความสูง 140 μm [5].	6
รูปที่ 7 โครงสร้างของป้อนอุทกพลศาสตร์ไฟฟ้า [6].	6
รูปที่ 8 โครงสร้างของอิเล็กโทรดที่มีปุ่ม [6].	7
รูปที่ 9 รูปแบบของอิเล็กโทรดแรงสูง	8
รูปที่ 10 แผนภาพเค้าร่างของป้อนอุทกพลศาสตร์ [7].	9
รูปที่ 11 ผลการทดลองของความดันที่สร้างขึ้นและกระแสไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้า ที่ใช้ต่ออิเล็กโทรด 1 คู่ สำหรับอิเล็กโทรดทั้ง 3 รูปแบบ [7].	9
รูปที่ 12 ผลการทดลองการเพิ่มจำนวนคู่อิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง	10
รูปที่ 13 ภาพถ่ายขนาดรูบนแผ่นอิเล็กโทรดแรงดันไฟฟ้าสูง	10
รูปที่ 14 การประกอบอิเล็กโทรดแรงดันไฟฟ้าสูงและอิเล็กโทรดกราวด์วงแหวน	11
รูปที่ 15 มิติของระบบของไหลจุลภาค [9].	13
รูปที่ 16 การจัดเตรียมการทดลองผสมของเหลวในระบบของไหลจุลภาค [9].	13
รูปที่ 17 การผสมของเหลวในระบบของไหลจุลภาค ภายใต้เงื่อนไขความถี่ 0.25-1 Hz และสนามไฟฟ้า 0.003-0.006 kV/mm [9].	14

รูปที่ 18	เปรียบเทียบทิศทางการไหลของอนุภาคเรืองแสงระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลอง .	14
รูปที่ 19	ประจุชั้นคู่และศักย์ซีตาที่บริเวณขอบเขตของชั้นสเตรนกับชั้นกระจาย [2].	16
รูปที่ 20	แผนภาพของประจุชั้นคู่และการไหลของอิเล็กโทรออสโมซิส [1].	17
รูปที่ 21	แผนภาพของระบบจำลองสำหรับอิเล็กโทรออสโมซิส [2].	18
รูปที่ 22	แผนภาพกลไกการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรออสโมซิสประเภทไฟฟ้ากระแสสลับ	19
รูปที่ 23	แผนภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยอิเล็กโทรโฟเรซิส [11].	21
รูปที่ 24	ขั้นตอนการสร้างระบบของไหลจุลภาค	22
รูปที่ 25	ระบบของไหลจุลภาคในการทดลองขับเคลื่อนของเหลว	23
รูปที่ 26	ระบบของไหลจุลภาคสำหรับขนส่งอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดง	24
รูปที่ 27	ระบบของไหลจุลภาคสำหรับขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข	24
รูปที่ 28	การทดลองขับเคลื่อนของเหลวในช่องทางไหลจุลภาค	25
รูปที่ 29	แผนภาพเค้าร่างและภาพถ่ายของการทดลองขนส่งอนุภาคและเซลล์	28
รูปที่ 30	อนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงในช่องทางไหลจุลภาค	28
รูปที่ 31	เซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขในช่องทางไหลจุลภาค	29
รูปที่ 32	ผลการทดลองขับเคลื่อนของเหลว	32
รูปที่ 33	ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์	33
รูปที่ 34	ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์ กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม	33
รูปที่ 35	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางไฟฟ้ากับเวลาที่ส่งผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์ด้วยปรากฏการณ์อิเล็กโทรออสโมซิสและอิเล็กโทรโฟเรซิส	34
รูปที่ 36	เวลาการเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กโทรออสโมซิส (ช่วงที่ 1) ของอนุภาค และเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข ที่ขนาดสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน	34
รูปที่ 37	ระยะที่ขนส่งอนุภาคได้ในสารแขวนลอยสภาพนำไฟฟ้า 1, 5 และ 25 mS/m กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ครึ่งคาบ	37
รูปที่ 38	ระยะที่ขนส่งอนุภาคได้ในสารแขวนลอยสภาพนำไฟฟ้า 1, 5 และ 25 mS/m กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม	37

รูปที่ 39 การเปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคระหว่างแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ครึ่งคาบ และพัลส์สี่เหลี่ยม กรณีสนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.006-0.04 kV/mm คาบเวลา 1 sec 38

รูปที่ 40 การเปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคระหว่างแรงดันไฟฟ้า รูปคลื่นไซน์ครึ่งคาบ และพัลส์สี่เหลี่ยม กรณีสนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.019 และ 0.03 kV/mm สำหรับรูปคลื่นไซน์และพัลส์สี่เหลี่ยมตามลำดับ คาบเวลา 0.25-1 sec 39

รูปที่ 41 การเปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคกับเซลล์. 40

รูปที่ 42 เซลล์เม็ดเลือดที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 60 เท่า..... 41

รูปที่ 43 เซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขแตกตัวขณะป้อนสนามไฟฟ้า 0.03 kV/mm 41

รูปที่ 44 ระยะทางและเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคหรือเซลล์ ด้วยอิเล็กโทรออสโมซิสและอิเล็กโทรโฟรีซิส..... 43



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แล็บบนชิพ (Lab on a chip, LOC) [1] เป็นเทคโนโลยีการย่อส่วนห้องปฏิบัติการและจัดการกับของเหลวในระดับเฟมโตลิตร~ไมโครลิตร. แล็บบนชิพมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับงานวิจัยทางด้านชีวเวชหรือทางการแพทย์ เช่น การสกัดสารพันธุกรรม (DNA isolation), ปฏิกริยาลูกโซ่พอลิเมอไรส (Polymerase chain reaction, PCR) และอิเล็กโทรโฟเรซิส เป็นต้น. ข้อดีของแล็บบนชิพคือมีราคาถูกลง เนื่องจากใช้สารตัวอย่างหรือสารเคมีในปริมาณน้อย. นอกจากนี้ แล็บบนชิพยังให้ผลการทดลองในระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากมีขนาดเล็กจึงวิเคราะห์ผลได้รวดเร็วมายิ่งขึ้น.

การขับเคลื่อนของเหลวในระบบของไหลจุลภาคมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับงานวิจัยทางด้านแล็บบนชิพ. การขับเคลื่อนของเหลวในระบบของไหลจุลภาค มักทำโดยอาศัยปั๊มที่มีการเคลื่อนที่ทางกล เช่น ปั๊มกระบอกฉีดยา (Syringe pump), ปั๊มไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric pump) เป็นต้น. การใช้ปั๊มที่มีการเคลื่อนที่ทางกลแต่ละประเภทมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป อาทิเช่น ปั๊มกระบอกฉีดยาไม่สามารถควบคุมทิศทางและระยะทางการเคลื่อนที่ของของเหลวปริมาณน้อยมากในระบบของไหลจุลภาคได้อย่างแม่นยำ เป็นต้น. ปั๊มอิเล็กโทรออสโมติก (Electroosmotic pump, EOP) เป็นตัวเลือกสำหรับการขับเคลื่อนของเหลวในระบบของไหลจุลภาค โดยมีข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นตรงที่ไม่มีส่วนเคลื่อนที่ทางกล รวมถึงยังสามารถควบคุมทิศทางไหลและระยะทางการเคลื่อนที่ของของเหลวเป็นระยะทางสั้น ๆ ในช่องทางไหลจุลภาคได้. ปั๊มอิเล็กโทรออสโมติกทำงานบนพื้นฐานของปรากฏการณ์อิเล็กโทรออสโมซิส ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทไฟฟ้ากระแสตรง (DC electroosmosis, DCEO) และประเภทไฟฟ้ากระแสสลับ (AC electroosmosis, ACEO) [2]. ปั๊มอิเล็กโทรออสโมติกที่นิยมใช้งานส่วนใหญ่ทำงานภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากโครงสร้างของปั๊มมีความเรียบง่ายไม่ซับซ้อน และมีพลังงานสูงกว่าประเภทกระแสสลับ.

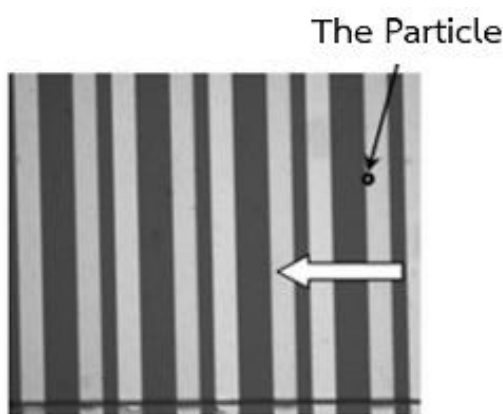
วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการขับเคลื่อนตัวอย่างในระบบของไหลจุลภาคด้วยอิเล็กโทรออสโมซิสและอิเล็กโทรโฟเรซิส. ตัวอย่างที่ใช้ทดลองได้แก่ อนุภาคพอลิสไตรีน (Polybead Polystyrene Microspheres, PS), เซลล์เม็ดเลือดแดงและเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข. อนุภาคที่ใช้มีขนาดใกล้เคียงกับเซลล์ทั่วไป (10-15 μm). เซลล์เม็ดเลือดแดงเป็นตัวอย่างที่สำคัญ

สำหรับการวิเคราะห์ทางชีวเวช. เซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขมีลักษณะที่แตกต่างจากเซลล์เม็ดเลือดแดง คือรูปร่างของเซลล์เป็นทรงกลมมากกว่า ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลการเคลื่อนที่ได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น. ระบบของไหลจุลภาคที่ใช้ในการทดลองสามารถผลิตได้ง่าย เนื่องจากมีช่องทางไหลและการวาง อิเล็กโทรดที่ไม่ซับซ้อน. ทั้งนี้ การดำเนินการภายใต้วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์จะทำให้สามารถ ขับเคลื่อนอนุภาคและเซลล์ในช่องทางไหลจุลภาคได้. นอกจากนี้ ผลการทดลองสามารถนำไปพัฒนา ในการขับเคลื่อนเซลล์ชนิดอื่น ๆ ตามที่ต้องการสำหรับแล็บบนชิพเพื่อการวิเคราะห์ผลทางชีวภาพ หรือทางการแพทย์ได้ต่อไป.

1.2. ทบทวนวรรณกรรม

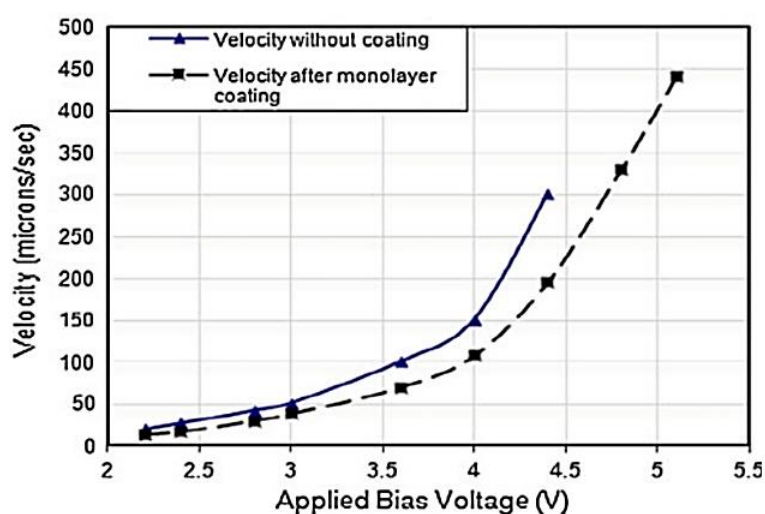
ผู้วิจัยสรุปข้อมูลรายละเอียดต่าง ๆ ของงานวิจัยเกี่ยวกับจลนศาสตร์ของของไหลในระบบ ของไหลจุลภาค รวมถึงปั๊มอิเล็กโทรออสโมติกไว้ดังนี้.

Nazmul Islam และคณะ [3] ได้พัฒนาประสิทธิภาพของปั๊มอิเล็กโทรออสโมติกประเภท กระแสสลับ โดยปรับปรุงความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) ของพื้นผิวช่องทางไหล. พื้นผิวของ ช่องทางไหลถูกเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลิกอน (Silicon nanoparticles, Si-NP) เพื่อลดแรงเสียดทานบนพื้นผิว. ของเหลวที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือน้ำปราศจากไอออนที่มีสภาพนำไฟฟ้า $5.5 \mu\text{S}/\text{m}$. รูปที่ 1 แสดงการจัดเรียงอิเล็กโทรดบนพื้นผิวซิลิกอน. อิเล็กโทรดสร้างจากการซ้อนกันของทองและ โครเมียม หนา 90 nm และ 10 nm ตามลำดับ. อิเล็กโทรดกว้าง $20 \mu\text{m}$ และ $80 \mu\text{m}$ ยาว 20 mm หนา $0.1 \mu\text{m}$ มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด $40 \mu\text{m}$. ผนังด้านที่เหลือของช่องทางไหลคือ Polydimethylsiloxane (PDMS). ช่องทางไหลมีความลึก $100 \mu\text{m}$. ในการทดลองจะใช้ความถี่ ระหว่าง 100 Hz ถึง 1 kHz สังเกตการไหลด้วยอนุภาคเรืองแสงขนาด 200 nm และอนุภาคพอลิสไตรีนขนาด $1 \mu\text{m}$.



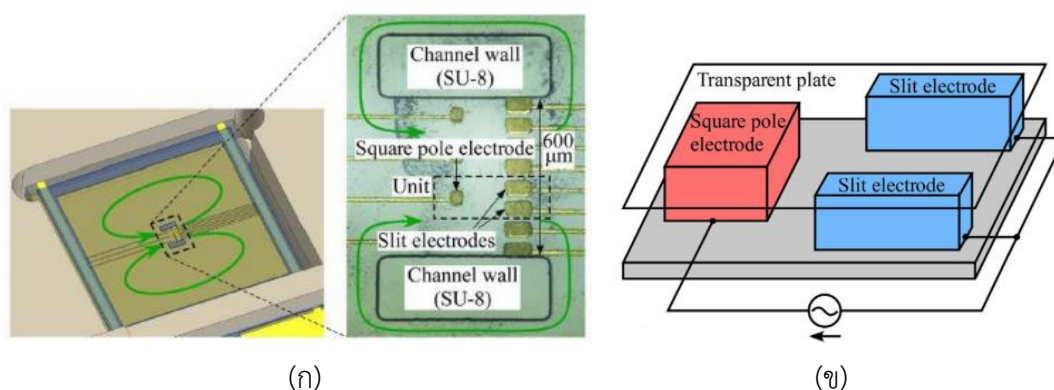
รูปที่ 1 รูปแบบการจัดเรียงอิเล็กโทรดสำหรับการทดลอง [3].

รูปที่ 2 แสดงความเร็วของบีเอ็มอีเล็กโทรออสโมติกที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีและไม่มีเคลือบพื้นผิวของช่องทางไหล. ผลการทดลองพบว่า การเคลือบพื้นผิวช่องทางไหลทำให้ความเร็วของบีเอ็มอีเล็กโทรออสโมติกลดลง แต่ทำให้ป้อนสนามไฟฟ้าได้สูงขึ้น. ช่องทางไหลที่ไม่ได้เคลือบพื้นผิวป้อนสนามไฟฟ้าได้สูงสุดประมาณ 0.11 kV/mm (แรงดันไฟฟ้า 4.4 V) มีความเร็วของบีเอ็มอีเล็กโทรออสโมติกสูงสุด 300 $\mu\text{m/s}$. การเคลือบพื้นผิวของช่องทางไหลทำให้สามารถเพิ่มสนามไฟฟ้าได้สูงขึ้นได้ถึงประมาณ 0.13 kV/mm (แรงดันไฟฟ้า 5.2 V) มีความเร็วของบีเอ็มอีเล็กโทรออสโมติกเพิ่มขึ้นเป็น 450 $\mu\text{m/s}$.



รูปที่ 2 แผนภูมิเปรียบเทียบความเร็วของบีเอ็มอีเล็กโทรออสโมติกในกรณีที่มีและไม่มีเคลือบพื้นผิวของช่องทางไหล [3].

K. Yoshida และคณะ [4] ได้นำเสนอการใช้บีเอ็มอีเล็กโทรออสโมติกประเภทไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อขับเคลื่อนน้ำปราศจากไอออน. รูปแบบการจัดเรียงอิเล็กโทรดสร้างด้วยกระบวนการ MEMS ประกอบด้วยอิเล็กโทรดแบบเสาสี่เหลี่ยมและแบบแยกช่อง (Square pole-slit electrodes). รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างของบีเอ็มอีเล็กโทรออสโมติกประเภทไฟฟ้ากระแสสลับที่มีอิเล็กโทรดแบบเสาสี่เหลี่ยมและอิเล็กโทรดแบบแยกช่อง. อิเล็กโทรดแบบเสาสี่เหลี่ยมกว้าง 50 μm ยาว 50 μm และสูง 50 μm . อิเล็กโทรดแบบแยกช่องประกอบด้วยอิเล็กโทรด 1 คู่ อิเล็กโทรดแต่ละชิ้นกว้าง 50 μm ยาว 100 μm มีช่องว่างระหว่างคู่อิเล็กโทรด 25 μm และมีช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดแบบเสาสี่เหลี่ยมกับอิเล็กโทรดแบบแยกช่อง 50 μm . ช่องทางไหลจุลภาคมีความกว้าง 6.8 mm ยาว 8.4 mm และสูง 1 mm. สังกะสีเคลือบที่ด้วยอนุภาคเรืองแสงขนาด 1 μm .



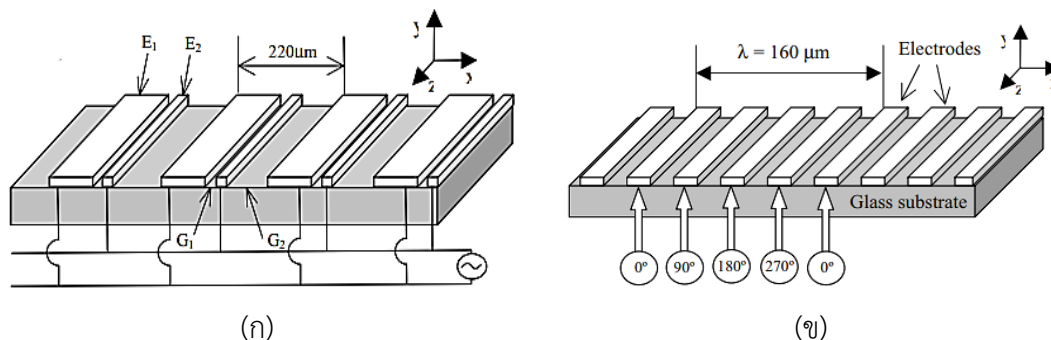
รูปที่ 3 โครงสร้างของปั๊มอิเล็กโทรออสโมติกประเภทไฟฟ้ากระแสสลับ

มีการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบเสาสี่เหลี่ยมและแบบแยกช่อง

(ก) โครงสร้างทั้งหมดของปั๊ม, (ข) โครงสร้างการจัดเรียงอิเล็กโทรด 1 ชุด [4].

จากการทดลอง คณะผู้วิจัยได้มีการปรับเปลี่ยนขนาดของอิเล็กโทรดเพื่อให้ได้ปั๊มอิเล็กโทรออสโมติก ประเภทไฟฟ้ากระแสสลับที่มีประสิทธิภาพสูงสุด. อิเล็กโทรดแบบเสาสี่เหลี่ยมที่ใช้กว้าง $57 \mu\text{m}$ ยาว $56 \mu\text{m}$. อิเล็กโทรดแบบแยกช่องแต่ละชั้นกว้าง $83 \mu\text{m}$ ยาว $56 \mu\text{m}$ มีช่องว่างระหว่างคู่อิเล็กโทรด $17 \mu\text{m}$ และมีช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดแบบเสาสี่เหลี่ยมกับอิเล็กโทรดแบบแยกช่อง $43 \mu\text{m}$. ผลการทดลองพบว่า ปั๊มมีความเร็วการไหลสูงสุด 1.6 mm/s ที่แรงดันไฟฟ้า 26 V_{pp} . ผลการทดลองยืนยันว่าปั๊มมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาก่อนหน้านี้ [3].

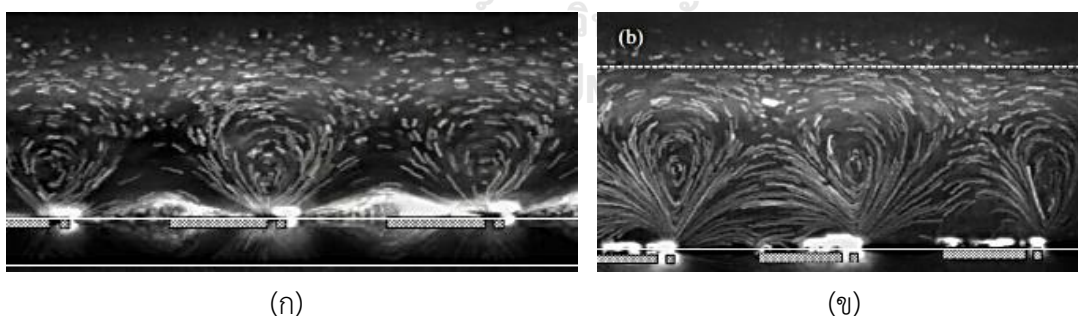
P. Garcia-Sanchez และคณะ [5] ได้ศึกษาการขับเคลื่อนของเหลวด้วยปั๊มจลนศาสตร์ไฟฟ้ากระแสสลับ. ของเหลวที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีสภาพนำไฟฟ้า 1.3 mS/m . อิเล็กโทรดที่ใช้สร้างจากการซ้อนกันของ ไทเทเนียม/ทอง/ไทเทเนียม (Ti/Au/Ti) ความหนา $10/100/10 \text{ nm}$ แล้ววางบนแผ่นแก้ว. การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบ่งเป็น 2 รูปแบบคือ อสมมาตรและสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4. รูปที่ 4 (ก) แสดงการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอสมมาตรประกอบด้วยอิเล็กโทรด E_1 และ E_2 จำนวน 10 คู่ ความกว้าง 100 และ $10 \mu\text{m}$ คั่นด้วยช่องว่าง (G_1) $10 \mu\text{m}$. ระยะห่างระหว่างคู่ของอิเล็กโทรด (G_2) คือ $100 \mu\text{m}$. รูปที่ 4 (ข) แสดงการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบสมมาตรประกอบด้วยอิเล็กโทรด 20 ชั้น แต่ละชั้นมีความกว้าง $20 \mu\text{m}$ คั่นด้วยช่องว่าง $20 \mu\text{m}$. แรงดันไฟฟ้าบนอิเล็กโทรดที่วางติดกันจะมีมุมเฟสต่างกัน 90° . สังเกตการเคลื่อนที่ด้วยอนุภาคเรืองแสงขนาด 500 nm .



รูปที่ 4 การจัดเรียงอิเล็กโทรด

(ก) แบบอสมมาตร และ (ข) แบบสมมาตร [5].

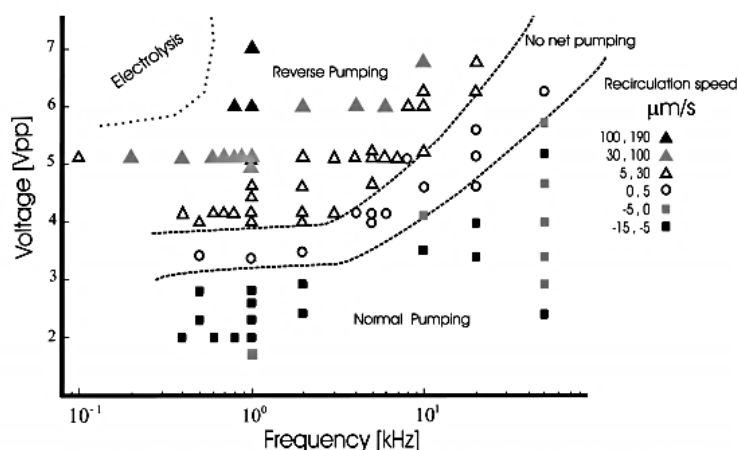
ผลการทดลองสำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอสมมาตรพบว่า ที่ความสูง 210 μm เหนืออิเล็กโทรด แรงดันไฟฟ้า 20 V_{pp} ความถี่ 10 kHz ความเร็วสูงสุดของอนุภาคมีค่าประมาณ 12 $\mu\text{m/s}$. รูปที่ 5 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในการบีบปกติและการบีบย้อนกลับ โดยการบีบย้อนกลับเริ่มเกิดเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าประมาณ 15 V_{pp} . ผลการทดลองสำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบสมมาตรพบว่า ที่ความสูง 140 μm เหนืออิเล็กโทรด แรงดันไฟฟ้า 7 V_{pp} ความถี่ 1 kHz และแรงดันไฟฟ้า 5 V_{pp} ความถี่ 500 Hz ความเร็วสูงสุดของอนุภาคมีค่าประมาณ 200 $\mu\text{m/s}$ และ 80 $\mu\text{m/s}$ ตามลำดับ. รูปที่ 6 แสดงหมวดการไหลของของเหลวที่แรงดันไฟฟ้าแตกต่างกันสามารถแบ่งการเคลื่อนที่ออกเป็น 4 บริเวณ ได้แก่ การบีบปกติ, การบีบย้อนกลับ, ไม่มีกรบีบและอิเล็กโทรไลซิส.



รูปที่ 5 การเคลื่อนที่ของอนุภาคสำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอสมมาตร

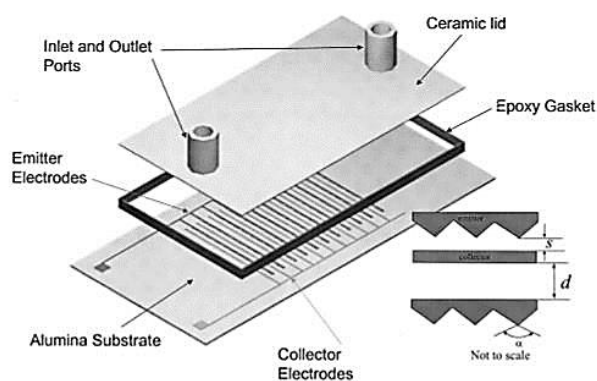
(ก) เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า 8 V_{pp} และความถี่ 10 kHz,

(ข) เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า 18 V_{pp} และความถี่ 10 kHz [5].



รูปที่ 6 หมวดการปั๊มภายใต้ระนาบความถี่เทียบกับแรงดันไฟฟ้า สำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบสมมาตร วัดที่ความสูง 140 μm [5].

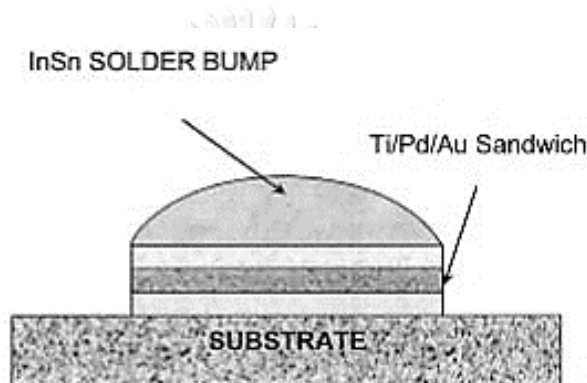
J. Darabi และคณะ [6] ได้ศึกษาการออกแบบ, การสร้างและการทดสอบปั๊มอุทกพลศาสตร์ไฟฟ้า (Electrohydrodynamic pump, EHD pump) เพื่อให้ได้ปั๊มอุทกพลศาสตร์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น. ของเหลวที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือของเหลวถ่ายเทความร้อน HFE-7100 (3M). คณะผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างปั๊มอุทกพลศาสตร์ไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 7. อิเล็กโทรดถูกออกแบบให้แตกต่างกัน 4 รูปแบบ โดยมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดปล่อยประจุและอิเล็กโทรดรับประจุ s รวมทั้งระยะห่างระหว่างคู่อิเล็กโทรด d แตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 1. อิเล็กโทรดปล่อยประจุถูกออกแบบให้มีรูปทรงฟันเลื่อยเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าให้สูงขึ้นบริเวณปลายแหลม ทำให้เกิดการฉีดประจุที่มากขึ้น. นอกจากนี้ มีการออกแบบโครงสร้างปั๊มบนอิเล็กโทรดปล่อยประจุ เนื่องจากการฉีดประจุที่บริเวณห่างจากผนังจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการปั๊ม. อิเล็กโทรดวางอยู่บนพื้นผิวอะลูมินาที่ด้านล่างของปั๊ม ซึ่งสร้างจากการซ้อนกันของ ไทเทเนียม/แพลเลเดียม/ทอง (Ti/Pd/Au) หนา 35/400/50 μm และโครงสร้างปั๊มจะอยู่ติดกับไทเทเนียม ดังแสดงในรูปที่ 8.



รูปที่ 7 โครงสร้างของปั๊มอุทกพลศาสตร์ไฟฟ้า [6].

ตารางที่ 1 รูปแบบของอิเล็กโทรด

รูปแบบ	เรขาคณิต	s (μm)	d (μm)	มุมเอียงของอิเล็กโทรด ปล่อยประจุ (α -Degrees)	จำนวนคู่ อิเล็กโทรด
A1	ระนาบ	50	100	N/A	95
A2	พื้นเอียง	50	100	60	80
B1	พื้นเอียง	100	200	60	50
B2	พื้นเอียงแบบมีปุ่ม	100	200	60	50

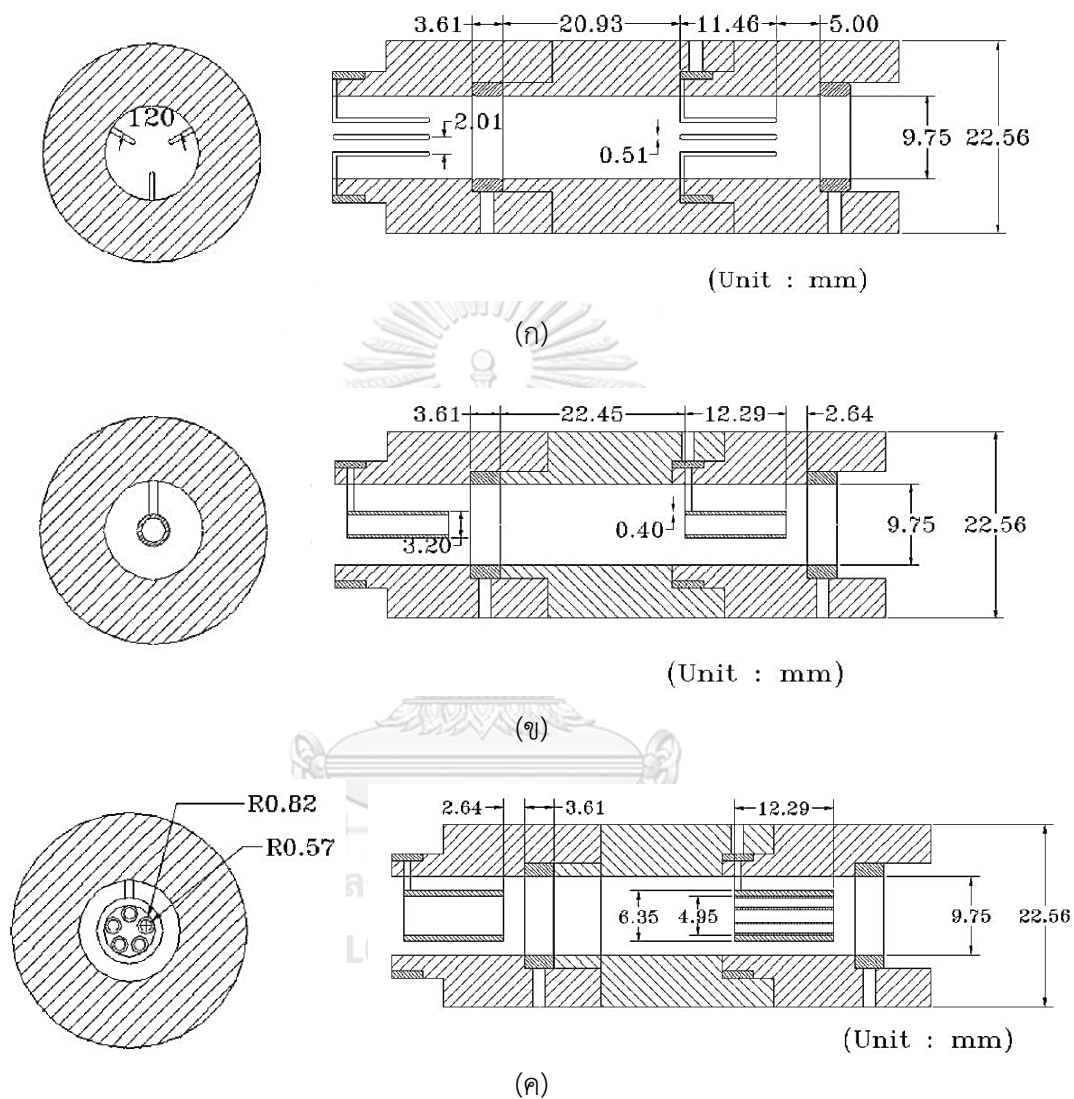


รูปที่ 8 โครงสร้างของอิเล็กโทรดที่มีปุ่ม [6].

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของรูปแบบอิเล็กโทรดพบว่า อิเล็กโทรดรูปแบบระนาบใช้แรงดันไฟฟ้า 900 V แต่อิเล็กโทรดรูปแบบพื้นเอียงใช้แรงดันไฟฟ้าเพียง 200 V สำหรับการปั๊มของเหลวให้มีความดันด้านบน 600 Pa. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของโครงสร้างปุ่มพบว่า อิเล็กโทรดรูปแบบพื้นเอียงที่ไม่มีปุ่มใช้แรงดันไฟฟ้า 1 kV แต่อิเล็กโทรดรูปแบบพื้นเอียงที่มีปุ่มใช้แรงดันไฟฟ้าเพียง 500 V สำหรับการปั๊มของเหลวให้มีความดันด้านบน 500 Pa. ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพของปั๊มเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อใช้อิเล็กโทรดรูปแบบพื้นเอียงและเพิ่มขึ้นอีกเมื่อมีโครงสร้างปุ่ม.

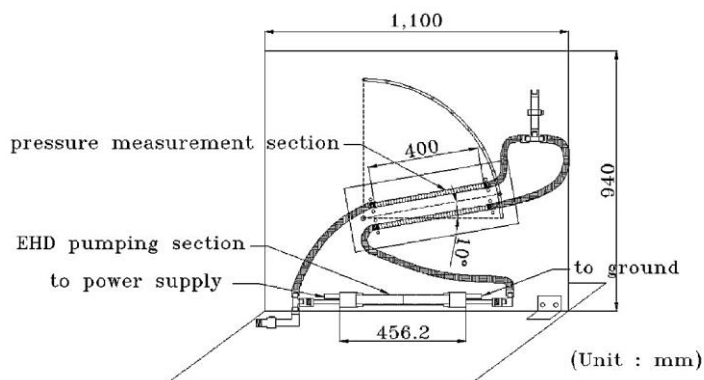
S. Jeong และคณะ [7] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของปั๊มอุทกพลศาสตร์ไฟฟ้าด้วยการออกแบบอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงให้แตกต่างกัน 3 รูปแบบได้แก่ แบบ 3 เข็ม, แบบรูกลวงและแบบหลายรู ดังแสดงในรูปที่ 9. อิเล็กโทรดกราวด์ที่ใช้ถูกออกแบบให้เป็นวงแหวน เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนการไหลที่เกิดจากอิเล็กโทรดแรงดันไฟฟ้าสูง. วัสดุที่ใช้ในการสร้างอิเล็กโทรดได้แก่ อิเล็กโทรดแบบ 3 เข็มสร้างจากเหล็ก, อิเล็กโทรดแบบรูกลวงสร้างจากทองเหลือง, อิเล็กโทรดแบบหลายรูสร้างจากทองแดงและ

อิเล็กทรอนิกส์สร้างจากสแตนเลส. รูปที่ 10 แสดงแผนภาพเค้าร่างของปั๊มอุทกพลศาสตร์ไฟฟ้า. ของเหลวที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือสารทำความเย็น R-123. ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 11-20 kv.



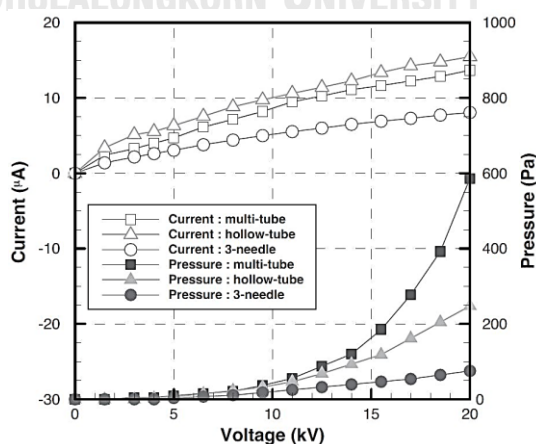
รูปที่ 9 รูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์แรงสูง

(ก) แบบ 3 เข็ม, (ข) แบบรูกกลาง และ (ค) แบบหลายรู [7].

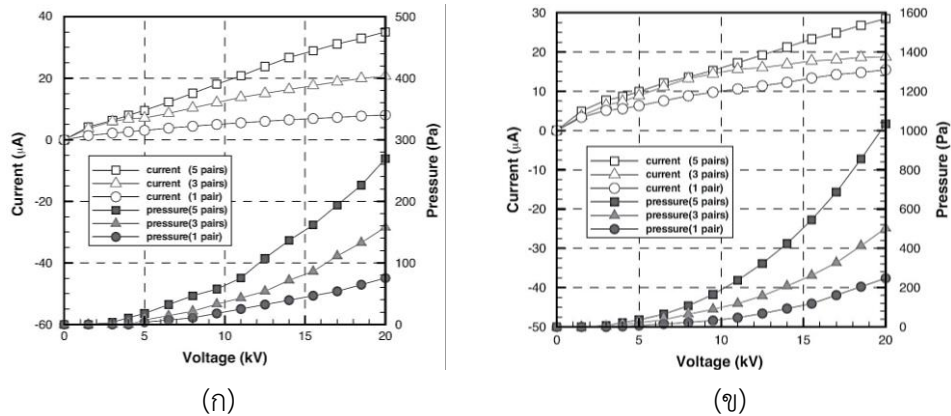


รูปที่ 10 แผนภาพเค้าร่างของปั๊มอุทกพลศาสตร์ [7].

ผลการทดลองพบว่าการปั๊มของเหลวด้วยปั๊มอุทกพลศาสตร์ไฟฟ้าของเหลวจะไหลจากอิเล็กโทรดกราวด์ไปที่อิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง (ตรงข้ามกับปั๊มแบบลากไอออน). รูปที่ 11 แสดงความดันที่สร้างขึ้นและกระแสไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ต่ออิเล็กโทรด 1 คู่ สำหรับอิเล็กโทรดทั้ง 3 รูปแบบ. ผลการทดลองพบว่าอิเล็กโทรดแบบหลายรูมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบ 3 เข็มและแบบรูกลวง. การทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 20 kV สร้างความดันด้านบนของเหลวได้ 586, 248 และ 75 Pa สำหรับอิเล็กโทรดรูปแบบหลายรู, รูกลวงและ 3 เข็ม ตามลำดับ. รูปที่ 12 แสดงผลการทดลองเพิ่มจำนวนคู่อิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงของรูปแบบ 3 เข็มและรูกลวง. เมื่อทำการทดลองด้วยอิเล็กโทรด 5 คู่ ที่แรงดันไฟฟ้า 20 kV สร้างความดันด้านบนของเหลวได้ 269 และ 1034 Pa ใช้พลังงาน 0.70 และ 0.57 W สำหรับอิเล็กโทรดรูปแบบ 3 เข็มและรูกลวง ตามลำดับ. ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปั๊มอุทกพลศาสตร์ไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโทรดรูปแบบหลายรูมีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าอิเล็กโทรดแบบ 3 เข็มและแบบรูกลวงและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ด้วยการเพิ่มจำนวนคู่อิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง.



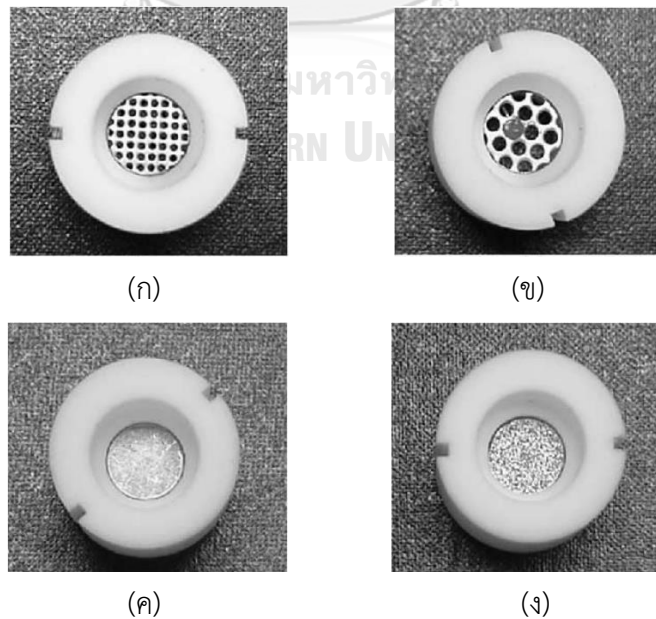
รูปที่ 11 ผลการทดลองของความดันที่สร้างขึ้นและกระแสไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ต่ออิเล็กโทรด 1 คู่ สำหรับอิเล็กโทรดทั้ง 3 รูปแบบ [7].



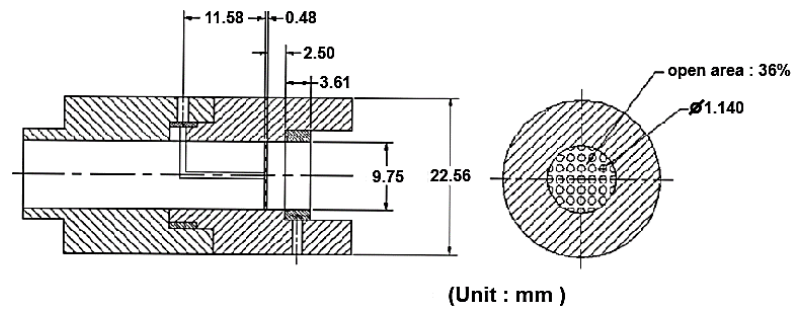
รูปที่ 12 ผลการทดลองการเพิ่มจำนวนคู่อิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง

(ก) แบบ 3 เข็ม และ (ข) แบบรูกลวง [7].

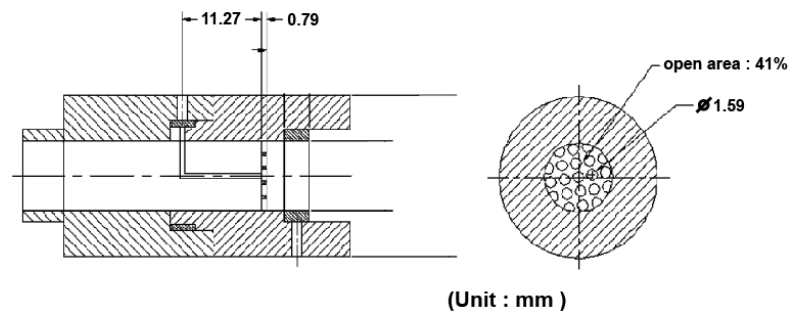
S. Jeong และคณะ [8] ได้ทดลองเพิ่มประสิทธิภาพของปั๊มอุทกพลศาสตร์ไฟฟ้าด้วยการพัฒนารูปแบบอิเล็กโทรด เพื่อยืนยันว่าอิเล็กโทรดรูปแบบหลายรูมีประสิทธิภาพดีกว่าอิเล็กโทรดแบบ 3 เข็มและแบบรูกลวง [7]. ของเหลวที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือสารทำความเย็น R-123 สภาพนำไฟฟ้า $27 \mu\text{S}/\text{m}$. คณะผู้วิจัยใช้แผ่นอิเล็กโทรดที่มีขนาดเท่ากัน โดยออกแบบขนาดของรูบนแผ่นอิเล็กโทรดแตกต่างกัน 4 รูปแบบ ได้แก่ 1.14 mm , 1.59 mm , $0.2 \mu\text{m}$ และ $40 \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 13. วัสดุที่ใช้ในการสร้างอิเล็กโทรดแรงดันไฟฟ้าสูงและอิเล็กโทรดกราวด์คือสแตนเลส. รูปที่ 14 แสดงการประกอบอิเล็กโทรดแรงดันสูงกับอิเล็กโทรดกราวด์.



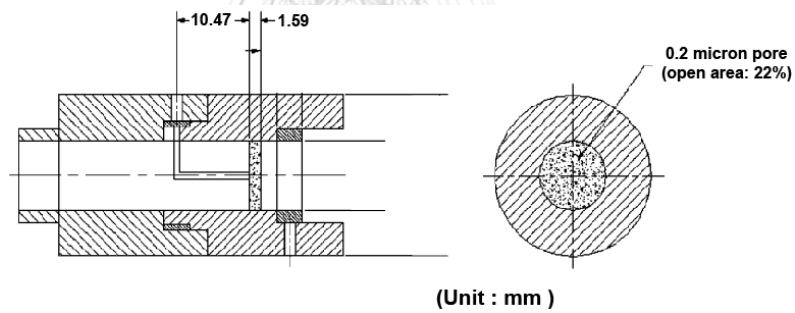
รูปที่ 13 ภาพถ่ายขนาดรูบนแผ่นอิเล็กโทรดแรงดันไฟฟ้าสูง
(ก) 1.14 mm , (ข) 1.59 mm , (ค) $0.2 \mu\text{m}$, (ง) $40 \mu\text{m}$ [8].



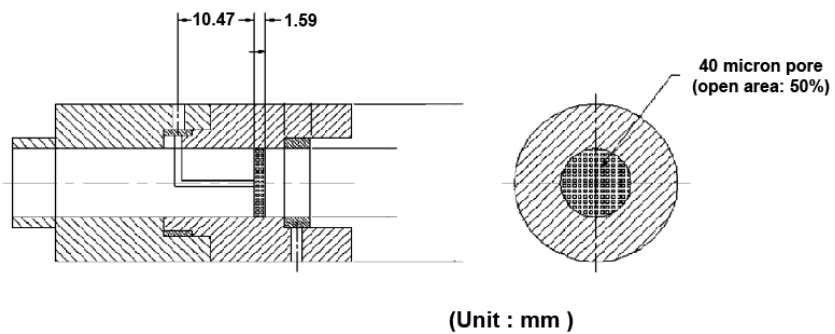
(ก)



(ข)



(ค)



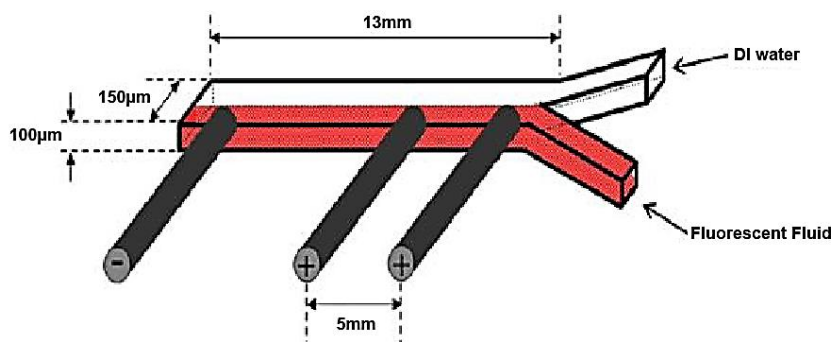
(ง)

รูปที่ 14 การประกอบอิเล็กโทรดแรงดันไฟฟ้าสูงและอิเล็กโทรดกรวดวงแหวน

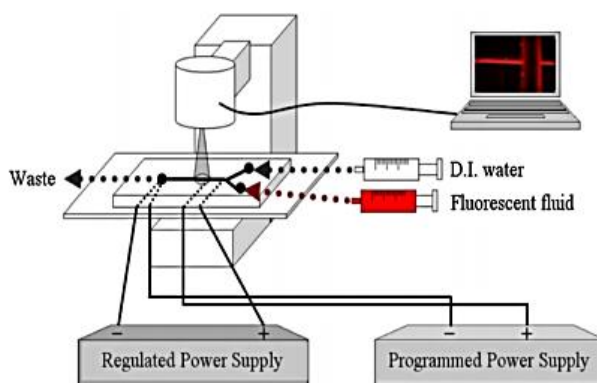
(ก) 1.14 mm, (ข) 1.59 mm, (ค) 0.2 μm , (ง) 40 μm [8].

ผลการทดลองสำหรับอิเล็กโทรดแรงดันไฟฟ้าสูงรูพรุนขนาด $0.2 \mu\text{m}$ ที่แรงดันไฟฟ้า 18.5 kV ใช้พลังงานไฟฟ้า 0.23 W สร้างความดันด้านบนของเหลวได้สูงสุด 1371 Pa แต่เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 20 kV ขึ้นไปจะเกิดประกายไฟ (Spark). ในกรณีเดียวกัน อิเล็กโทรดแรงดันไฟฟ้าสูงรูพรุนขนาด 1.14 mm, 1.59 mm และ $40 \mu\text{m}$ ที่แรงดันไฟฟ้า 20 kV ใช้พลังงานไฟฟ้า 0.19, 0.14 และ 0.11 W สร้างความดันด้านบนของเหลวได้สูงสุด 537, 575 และ 715 Pa ตามลำดับ. ระดับความดันด้านบนของเหลวสามารถเพิ่มขึ้นได้อีกด้วยการเพิ่มจำนวนคู่อิเล็กโทรด. เมื่อเปรียบเทียบกับกรอกแบบอิเล็กโทรดแรงดันไฟฟ้าสูงก่อนหน้าทั้งแบบ 3 เข็ม, รุกหลวงและหลายรู พบว่าที่แรงดันไฟฟ้า 20 kV สร้างความดันด้านบนของเหลวได้สูงสุด 75, 248 และ 586 Pa ตามลำดับ [7]. ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า บีมอุทกพลศาสตร์ไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโทรดรูปแบบหลายรูมีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าอิเล็กโทรดแบบ 3 เข็มและแบบรูกหลวง.

S. Jeong และคณะ [9] ได้ศึกษาการผสมของเหลวในระบบของไหลจุลภาคโดยติดตั้งอิเล็กโทรดเพิ่มเติมระหว่างอิเล็กโทรดหลักทั้งสองตัว เพื่อสร้างศักย์ไฟฟ้าทุติยภูมิเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลในช่องทางไหลจุลภาค. ของเหลวที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือน้ำปราศจากไอออนและสารละลายเรืองแสง. อิเล็กโทรดที่ใช้สร้างจากแพลทินัมขนาด $350 \mu\text{m}$ ถูกวางอยู่ที่ด้านล่างของช่องทางไหลจุลภาค. ระบบของไหลจุลภาคถูกหล่อขึ้นรูปด้วย PDMS มีช่องทางไหลกว้าง $150 \mu\text{m}$ ยาว 13 mm และลึก $100 \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 15. รูปที่ 16 แสดงการจัดเตรียมการทดลองผสมของเหลวในระบบของไหลจุลภาค โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าเชื่อมต่อกับแอโนดหลักและแคโทดหลักสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบคงที่ เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลด้วยอิเล็กโทรดอสโมซิส. ในทางกลับกัน แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ตั้งโปรแกรมไว้เชื่อมต่อกับแอโนดรองและแคโทดหลัก เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นช่วง ๆ. ในการทดลองจะป้อนน้ำปราศจากไอออนและสารละลายเรืองแสงเข้าสู่ช่องทางไหลจุลภาคโดยไม่มีการผสมรวมกัน. หลังจากนั้น บีมจะถูกปลดออกจากช่องทางไหลจุลภาคแล้วเริ่มจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปที่อิเล็กโทรด.

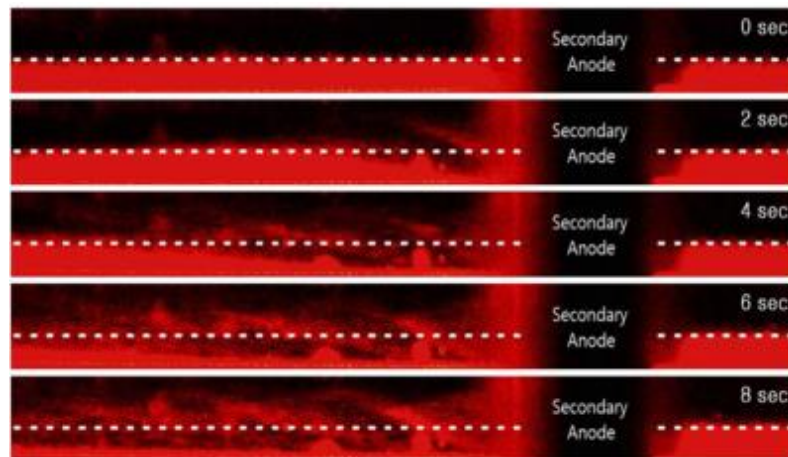


รูปที่ 15 มิติของระบบของไหลจุลภาค [9].

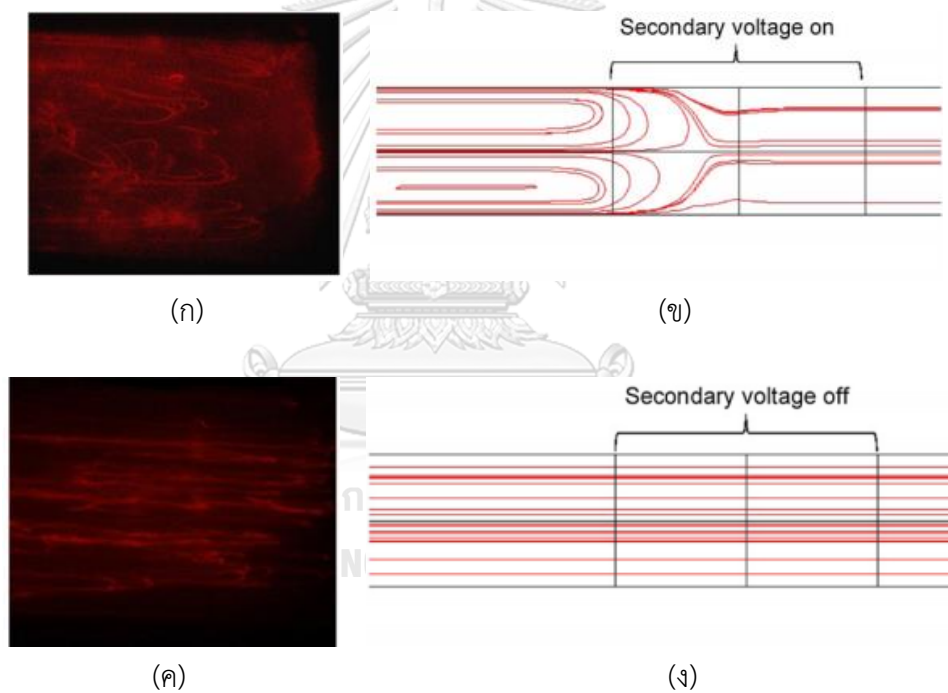


รูปที่ 16 การจัดเตรียมการทดลองผสมของเหลวในระบบของไหลจุลภาค [9].

รูปที่ 17 แสดงผลการผสมน้ำปราศจากไอออนและสารละลายเรืองแสงในช่องทางไหลจุลภาค. ในช่วงเริ่มต้นของการป้อนน้ำปราศจากไอออนและสารละลายเรืองแสงเข้าสู่ช่องทางไหลพบว่า น้ำปราศจากไอออนและสารละลายเรืองแสงแยกจากกันอย่างชัดเจน เส้นประสีขาวในรูปคือบริเวณรอยต่อระหว่างน้ำปราศจากไอออนและสารละลายเรืองแสง. การทดลองอยู่ภายใต้เงื่อนไขความถี่ 0.25-1 Hz และสนามไฟฟ้า 0.003-0.006 kV/mm. ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการผสมรวมเพิ่มขึ้นมากกว่า 70% ภายใน 8 วินาที เมื่อแรงดันไฟฟ้าหุติยภูมิ 50 V ที่ความถี่ 0.5 Hz. รูปที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเรืองแสงระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลอง. ผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าหุติยภูมิ อนุภาคเรืองแสงเกิดการสั่นและไหลอย่างไม่เสถียร ดังแสดงในรูปที่ 18 (ก) และผลการจำลองพบว่า เส้นทางด้านซ้ายของแอนโนดหุติยภูมิมีการบิดเบี้ยว ส่วนเส้นทางด้านขวาคือการไหลในสภาวะคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 18 (ข). ในกรณีที่ไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าหุติยภูมิ อนุภาคเรืองแสงมีการไหลที่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 18 (ค) และผลการจำลองพบว่า เส้นทางไหลมีความคงที่และสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 18 (ง). การเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นถึงกลไกการผสมของเหลวในระบบของไหลจุลภาคได้อย่างชัดเจน.



รูปที่ 17 การผสมของเหลวในระบบของไหลจุลภาค ภายใต้เงื่อนไขความถี่ 0.25-1 Hz และสนามไฟฟ้า 0.003-0.006 kV/mm [9].



รูปที่ 18 เปรียบเทียบทิศทางการไหลของอนุภาคเรืองแสงระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลอง (ก) อนุภาคเรืองแสงเกิดการสั่นและไม่เสถียร, (ข) เส้นทางการไหล เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิ, (ค) อนุภาคเรืองแสงไหลอย่างสม่ำเสมอ, (ง) เส้นทางการไหล เมื่อไม่มีการป้อนแรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิ [9].

1.3 วัตถุประสงค์

ศึกษาการขับเคลื่อนของเหลวและอนุภาคหรือเซลล์ในระบบของไหลจุลภาคด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า โดยพิจารณาเงื่อนไขสภาพนำไฟฟ้าของของไหลที่แตกต่างกัน.

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

พิจารณาของไหลที่เป็นสารละลายที่มีสภาพนำไฟฟ้าระหว่าง 1-25 mS/m. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในช่วง 100-750 V (สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.005-0.04 kV/mm) มีคาบเวลาอยู่ในช่วง 0.25-2 sec. กลไกการขับเคลื่อนอนุภาคและเซลล์จำกัดที่อิเล็กโทรออสโมซิสและอิเล็กโทรโฟเรซิส.

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เข้าใจถึงความสามารถและขีดจำกัดในการขับเคลื่อนของเหลวและอนุภาคหรือเซลล์ภายในช่องทางไหลจุลภาคด้วยวิธีการทางจลนศาสตร์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเพื่อขนส่งเซลล์ชนิดอื่น ๆ ตามที่ต้องการได้.

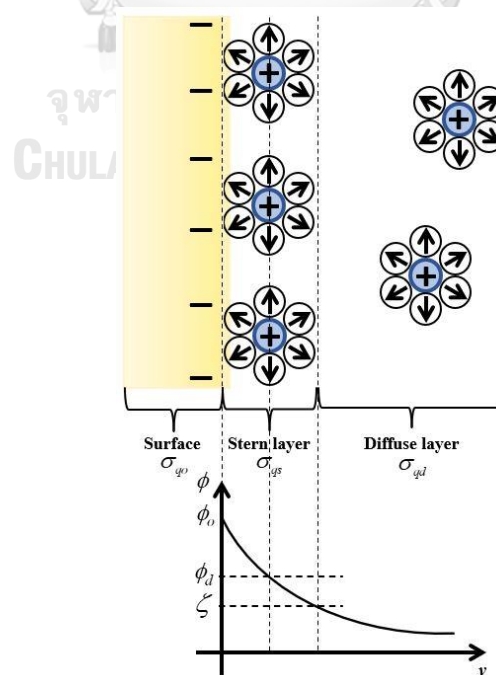


บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประจุชั้นคู่ (Double-layer charge)

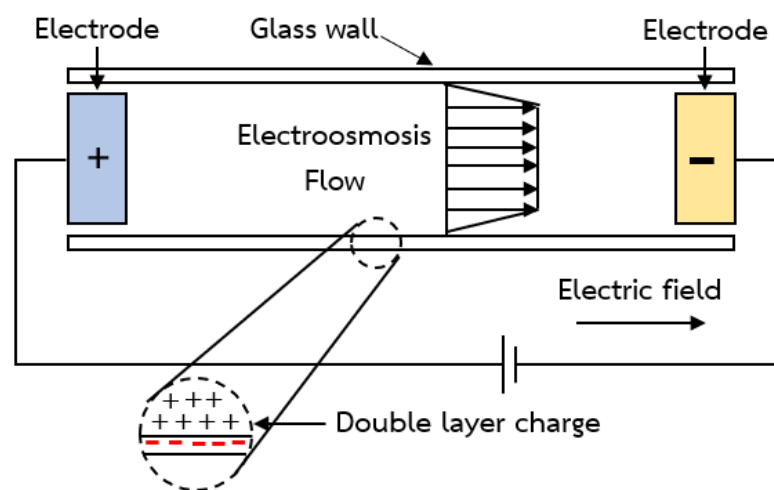
เมื่อวัสดุของแข็งสัมผัสกับของเหลวจะเกิดการถ่ายเทประจุระหว่างของแข็งกับของเหลว ทำให้เกิดประจุลัพท์ขึ้นที่พื้นผิวของของแข็ง. ประจุบนพื้นผิวของแข็งจะดึงดูดประจุขั้วตรงข้ามในของเหลว ทำให้เกิดประจุชั้นคู่. ประจุชั้นคู่แบ่งออกเป็น 2 บริเวณได้แก่ บริเวณด้านในติดกับพื้นผิวของแข็งจะเรียกว่า ชั้นสเตอร์น (Stern layer) และบริเวณถัดมาจากชั้นสเตอร์นเรียกว่า ชั้นกระจาย (Diffuse layer) ดังแสดงในรูปที่ 19. ศักย์ซีตา (Zeta potential, ζ) คือศักย์ไฟฟ้าบริเวณระยะห่างการเลื่อนไถลระหว่างชั้นสเตอร์นกับชั้นกระจาย. ศักย์ซีตาจะขึ้นอยู่กับชนิดของของแข็งและของเหลวที่สัมผัสกัน. วัสดุชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้สร้างระบบของไหลจุลภาค คือ PDMS. ข้อดีของ PDMS เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ๆ คือ สามารถขึ้นรูปได้ง่าย, มีความโปร่งแสง และมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ. ระบบของไหลจุลภาคที่ใช้ในงานนี้ประกอบด้วย แผ่นแก้วที่เป็นพื้นด้านล่างของช่องทางไหล และ PDMS ที่เป็นผนังด้านที่เหลื่อของช่องทางไหล. ศักย์ซีตาที่เกิดขึ้นบนผิวของแก้วและ PDMS จึงมีผลต่อการไหลเนื่องจากอิเล็คโทรออสโมซิส. ค่าศักย์ซีตาของแก้วและ PDMS ที่สัมผัสกับสารละลายมีค่าอยู่ในช่วง -66 ถึง -88 และ -68 ถึง -110 mV ตามลำดับ [10].



รูปที่ 19 ประจุชั้นคู่และศักย์ซีตาที่บริเวณขอบเขตของชั้นสเตอร์นกับชั้นกระจาย [2].

2.2. อิเล็กโทรออสโมซิส

เมื่อวัสดุของแข็งสัมผัสกับของเหลวจะทำให้เกิดประจุชั้นคู่. หากมีการป้อนสนามไฟฟ้าให้กับบริเวณประจุชั้นคู่ สนามไฟฟ้าจะทำให้ประจุเคลื่อนที่ในทิศทางขนานกับทิศทางของสนามไฟฟ้า. การเคลื่อนที่ของประจุจะลากของเหลวให้เคลื่อนที่ที่เป็นผลให้เกิดการไหล เรียกว่า การไหลด้วยอิเล็กโทรออสโมซิส. รูปที่ 20 แสดงแผนภาพเค้าร่างของการไหลด้วยอิเล็กโทรออสโมซิส กรณีของผนังแก้วกับของเหลวซึ่งเกิดประจุลบบนพื้นผิวของแก้ว. อิเล็กโทรออสโมซิสสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทไฟฟ้ากระแสตรงและประเภทไฟฟ้ากระแสสลับ [2].



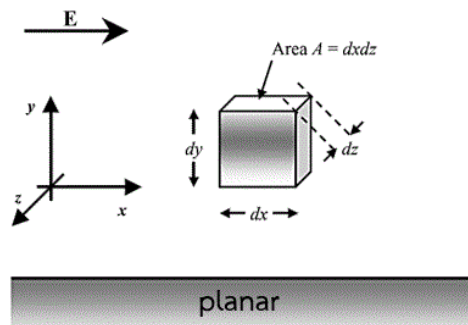
รูปที่ 20 แผนภาพของประจุชั้นคู่และการไหลของอิเล็กโทรออสโมซิส [1].

2.2.1. อิเล็กโทรออสโมซิสประเภทไฟฟ้ากระแสตรง

เราสามารถคำนวณความเร็วอิเล็กโทรออสโมติก 2 มิติ ของเหลวในช่องทางไหลที่ระนาบมีความกว้างอย่างไม่จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 21. การคำนวณจะพิจารณาจากสมดุลของแรงที่กระทำบนส่วนประกอบของของเหลวที่มีปริมาตร $A dy$ (โดยที่แกน y คือแกนตั้งฉากกับพื้นผิว). แรงทางไฟฟ้าที่กระทำต่อของเหลวสามารถอธิบายได้ด้วยกฎคูลอมบ์ (Coulomb's law). แรงทางไฟฟ้าจะถูกต้านเนื่องจากความหนืดของของเหลว. เราเขียนความสัมพันธ์ของแรงได้ดังนี้ [2]

$$F_x = E_x \rho A dy = \eta A \left[\left(\frac{du_x}{dy} \right)_y - \left(\frac{du_x}{dy} \right)_{y+dy} \right] \quad (1)$$

โดยที่ F_x คือ แรงทางไฟฟ้า, E_x คือ สนามไฟฟ้า, ρ คือ ความหนาแน่นของประจุ, A คือ พื้นที่, u_x คือ ความเร็วของของเหลวและ η คือ ความหนืดของของเหลว. ดัชนี x บ่งชี้ว่าทิศทางของสนามไฟฟ้าจะขนานตามแนวแกน x .



รูปที่ 21 แผนภาพของระบบจำลองสำหรับอิเล็กโทรออสโมซิส [2].

เมื่อ $\vec{u} = (u_x, 0)$ คือความเร็วของของเหลวใน 2 มิติ. เราสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$E_x \rho dy = -\eta \left(\frac{d^2 u_x}{dy^2} \right) dy \quad (2)$$

เมื่อเราใช้สมการปัวซองแทนความหนาแน่นของประจุ. เราสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$E_x \varepsilon \left(\frac{d^2 \phi}{dy^2} \right) dy = \eta \left(\frac{d^2 u_x}{dy^2} \right) dy \quad (3)$$

โดยที่ ε คือ สภาพยอมของสารละลาย และ ϕ คือศักย์ไฟฟ้า. อินทิเกรตสมการที่ (3) จาก $y = \infty$ ถึงระนาบการลื่นไถล โดยที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศักย์ซีตาและความเร็วของของเหลวมีค่าเท่ากับศูนย์.

เราสามารถเขียนสมการความเร็วของอิเล็กโทรออสโมติก ได้ดังนี้

$$u_x = -E_x \frac{\varepsilon \zeta}{\eta} \quad (4)$$

เราสามารถเขียนสมการสภาพเคลื่อนที่อิเล็กโทรออสโมติก (Electroosmotic mobility, μ_x) ได้ดังนี้

$$\mu_x = \frac{u_x}{E_x} = -\frac{\varepsilon \zeta}{\eta} \quad (5)$$

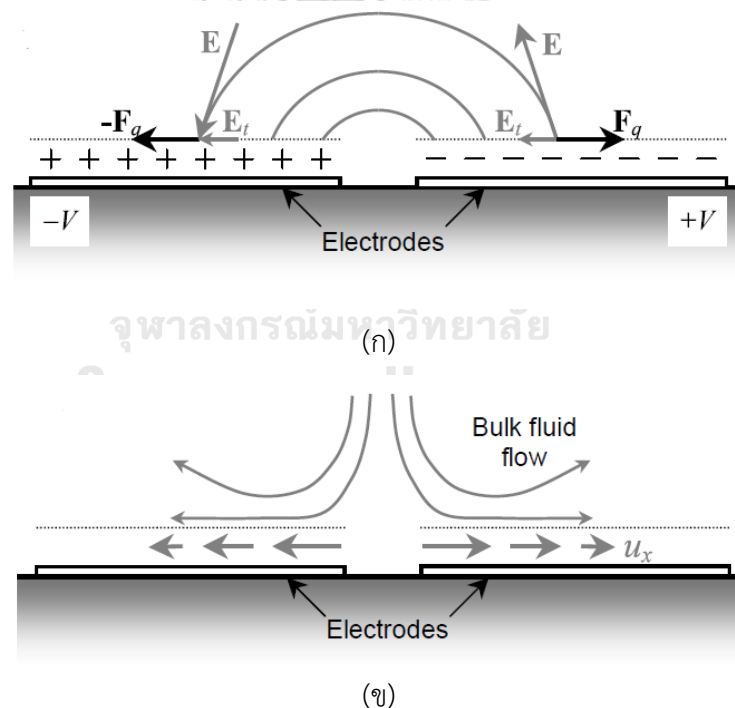
ความเร็วของของเหลวจะแปรผันตรงกับสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในชั้นคู่อ (ศักย์ซีตา). สมการที่ (4) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$u_x = \frac{E_x \sigma_q}{\kappa \eta} \quad (6)$$

โดยที่ σ_q คือ ความหนาแน่นของประจุที่พื้นผิว และ κ คือ ความยาว Debye.

2.2.2. อิเล็กโทรออสโมซิสประเภทไฟฟ้ากระแสสลับ

การทดลองด้วยอิเล็กโทรดขนาดจุลภาคแสดงให้เห็นว่า สนามไฟฟ้ากระแสสลับสามารถสร้างการเคลื่อนที่ของของเหลวเฉพาะพื้นที่ได้ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับประจุชั้นคู่. ในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ การไหลของของเหลวเฉลี่ยต่อเวลาจะไม่เป็นศูนย์และทำให้เกิดไดอิเล็กโทรโฟรีซิส (Dielectrophoresis) แต่ปรากฏการณ์นี้จะไม่เกิดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ. รูปที่ 22 แสดงกลไกการเคลื่อนที่ของของเหลวในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ. อิเล็กโทรดทั้งสองจะมีแรงดันไฟฟ้า $\pm V$ ซึ่งก่อให้เกิดสนามไฟฟ้า E มีส่วนประกอบ E_t อยู่ด้านนอกของประจุชั้นคู่ที่ถูกเหนี่ยวนำบนอิเล็กโทรด. ประจุเหนี่ยวนำจะได้รับแรง F_q เนื่องจากสนามไฟฟ้า ทำให้ของเหลวเกิดการเคลื่อนที่. รูปที่ 22 (ก) แสดงกลไกการเคลื่อนที่ที่อิเล็กโทรออสโมซิสของศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งรูปคลื่นครึ่ง. ในทางกลับกัน อีกครึ่งรูปคลื่นของศักย์ไฟฟ้า สนามไฟฟ้าและประจุเหนี่ยวนำจะมีทิศทางตรงกันข้าม ทำให้ทิศทางของแรงยังคงเหมือนเดิม. แรงเฉลี่ยต่อเวลาจะไม่เท่ากับศูนย์และเกิดการไหลในสถานะคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 22 (ข).



รูปที่ 22 แผนภาพกลไกการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรออสโมซิสประเภทไฟฟ้ากระแสสลับ

(ก) แผนภาพกลไกของอิเล็กโทรออสโมซิสประเภทไฟฟ้ากระแสสลับ (ข) แผนภาพปฏิบัติการของ

สนามไฟฟ้าที่พื้นผิวกับประจุชั้นคู่ทำให้ของเหลวที่พื้นผิวไหลด้วยความเร็ว u_x

และส่งผลให้ของเหลวทั้งหมดเกิดการไหล [2].

2.3. อิเล็กโทรโฟเรซิส

อนุภาคทรงกลมที่มีรัศมี a และมีประจุไฟฟ้า Q_s ถูกแขวนลอยอยู่ในของเหลว. เมื่ออนุภาคและของเหลวอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายนอก E_∞ อนุภาคจะเกิดการเคลื่อนที่ภายใต้แรงทางไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาค เรียกว่า การเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กโทรโฟเรซิส. รูปที่ 23 แสดงการเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กโทรโฟเรซิสของอนุภาคที่มีประจุลบ. เราสามารถเขียนสมการแรงทางไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคได้ดังนี้

$$F_E = Q_s E_\infty \quad (7)$$

โดยที่ F_E คือ แรงทางไฟฟ้า. เมื่ออนุภาคเริ่มเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของแรงทางไฟฟ้า จะทำให้เกิดแรงลากของเหลวในทิศตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค. สำหรับอนุภาคทรงกลม เราสามารถเขียนสมการแรงลากของเหลวได้ดังนี้

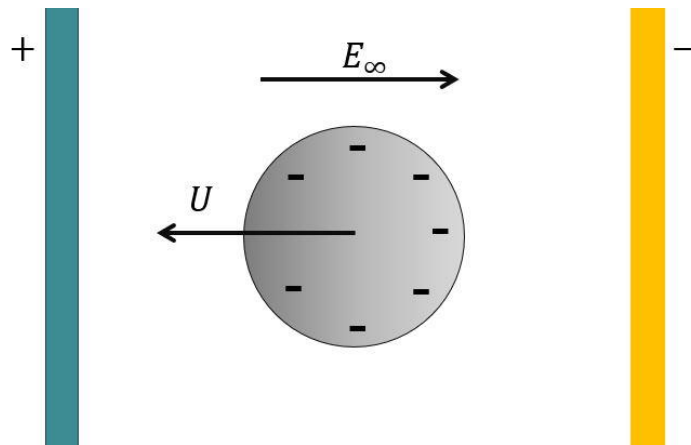
$$F_H = 6\pi\eta a U \quad (8)$$

โดยที่ F_H คือ แรงลากของเหลว และ U คือ ความเร็วของอนุภาค. เมื่ออยู่ในสภาวะคงตัว แรงทางไฟฟ้าเท่ากับแรงลากของเหลว. เราสามารถเขียนสมการความเร็วของอนุภาคได้ดังนี้

$$U = \frac{Q_s E_\infty}{6\pi\eta a} \quad (9)$$

ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับประจุในอนุภาค. สภาพเคลื่อนที่อิเล็กโทรโฟเรติกของอนุภาค (Electrophoretic mobility of the particle, μ_{EP}) กำหนดให้เป็นความเร็วต่อหน่วยสนามไฟฟ้าที่ป้อน. เราสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\mu_{EP} = \frac{U}{E_\infty} = \frac{Q_s}{6\pi\eta a} \quad (10)$$



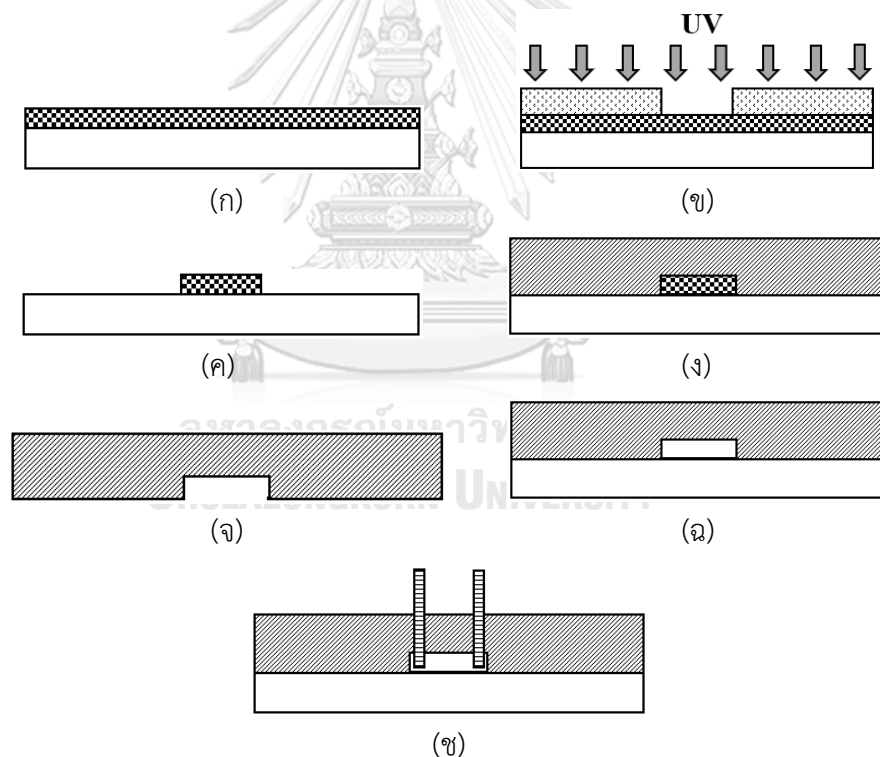
รูปที่ 23 แผนภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยอิเล็กโทรโฟรีซิส [11].



บทที่ 3 การทดลอง

3.1 การสร้างระบบของไหลจุลภาค

ผู้วิจัยสร้างระบบของไหลจุลภาคโดยใช้กระบวนการซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft lithography). แม่พิมพ์ของช่องทางไหลถูกสร้างขึ้นจากฟิล์มไวแสงแบบลบ (HM-4075, Hitachi Chemical). ช่องทางไหลถูกหล่อขึ้นรูปด้วย PDMS (KE-106, Shin-Etsu). ช่องทางไหลยึดติดอยู่บนกระจกสไลด์ด้วยโครนาดีสซาร์จ (BD-20AC, Electro-Technic Products) เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติด. อิเล็กโทรดถูกติดตั้งบริเวณทางเข้าและทางออกของช่องทางไหลจุลภาค. รูปที่ 24 แสดงขั้นตอนการสร้างระบบของไหลจุลภาค. ขั้นตอนการสร้างระบบของไหลจุลภาคโดยละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.



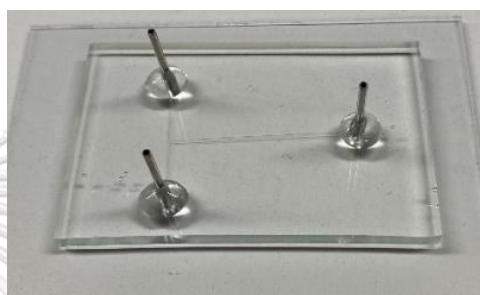
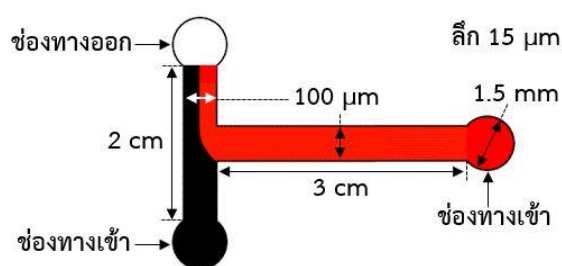
□ กระจกสไลด์ ■ ฟิล์มไวแสงแบบลบ ■ แผ่นกระจกต้นแบบ ■ PDMS ■ อิเล็กโทรด

รูปที่ 24 ขั้นตอนการสร้างระบบของไหลจุลภาค

(ก) ติดฟิล์มไวแสงแบบลบบนกระจกสไลด์, (ข) ฉายแสง UV ด้านบนฟิล์มไวแสงแบบลบ, (ค) แม่พิมพ์ของช่องทางไหลจุลภาค, (ง) หล่อช่องทางไหลจุลภาคด้วย PDMS, (จ) ช่องทางไหลจุลภาคจาก PDMS, (ฉ) วาง PDMS บนกระจกสไลด์ และ (ช) ติดตั้งอิเล็กโทรดที่ทางเข้าและทางออก.

3.1.1 ระบบของไหลจุลภาคสำหรับขับเคลื่อนของเหลว

ระบบของไหลจุลภาคสำหรับการทดลองขับเคลื่อนของเหลวมีช่องทางไหลกว้าง $100\ \mu\text{m}$ ยาว $2\ \text{cm}$ และ $3\ \text{cm}$ ลึก $15\ \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 25 (ก). ระบบของไหลจุลภาคมีทางเข้า 2 ช่องทางและทางออก 1 ช่องทาง. อิเล็กโทรดของระบบของไหลจุลภาคคือสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $1.2\ \text{mm}$ ยาว $1\ \text{cm}$. อิเล็กโทรดถูกติดตั้งที่ทางเข้าและทางออกของช่องทางไหลจุลภาค ดังแสดงในรูป 25 (ข).



(ก)

(ข)

รูปที่ 25 ระบบของไหลจุลภาคในการทดลองขับเคลื่อนของเหลว

(ก) มิติ และ (ข) ภาพถ่ายของชิพ.

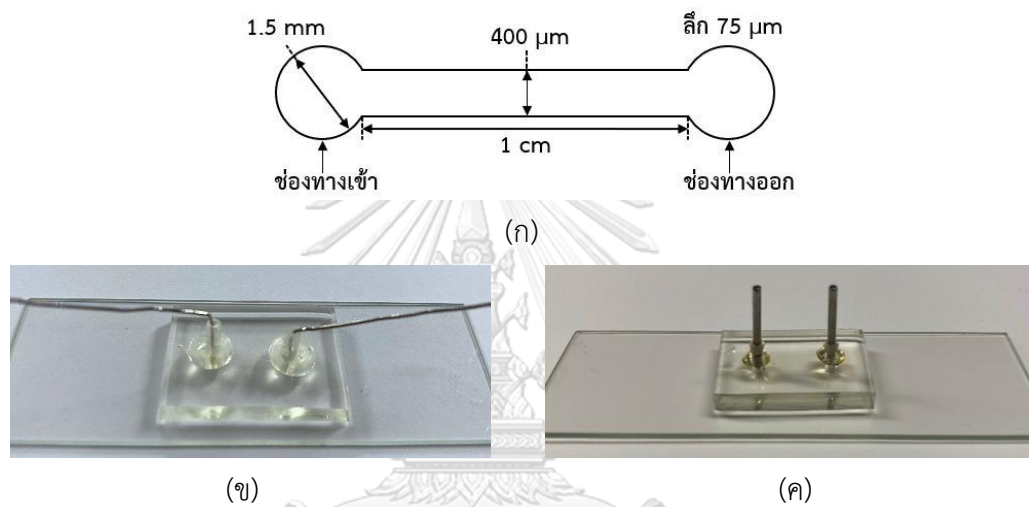
3.1.2 ระบบของไหลจุลภาคสำหรับขนส่งอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดง

ระบบของไหลจุลภาคสำหรับขนส่งอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงมีช่องทางไหลกว้าง $400\ \mu\text{m}$ ยาว $1\ \text{cm}$ ลึก $75\ \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 26 (ก). ระบบของไหลจุลภาคมีทางเข้าและทางออก อย่างละ 1 ช่องทาง. อิเล็กโทรดของระบบของไหลจุลภาคมี 2 ชนิดคือแพลทินัมและสแตนเลส. ข้อดีของอิเล็กโทรดแพลทินัมคือมีการกัดฉีกประจุจากอิเล็กโทรดของเหลวน้อย ส่วนอิเล็กโทรดสแตนเลสซึ่งสร้างจากปลายเข็มฉีดยาขนาดเกจ 18G มีข้อดีคือทำให้สามารถฉีดยาละลายเข้าสู่ช่องทางไหลได้ง่าย เนื่องจากอิเล็กโทรดมีลักษณะเป็นท่อกวาง. อิเล็กโทรดแพลทินัมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $0.5\ \text{mm}$ ยาว $5\ \text{cm}$ ดังแสดงในรูปที่ 26 (ข). อิเล็กโทรดสแตนเลสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $1.2\ \text{mm}$ ยาว $1\ \text{cm}$ ดังแสดงในรูปที่ 26 (ค). อิเล็กโทรดถูกติดตั้งอยู่บริเวณทางเข้าและทางออกของช่องทางไหลจุลภาคมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด $1\ \text{cm}$.

3.1.3 ระบบของไหลจุลภาคสำหรับขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข

ระบบของไหลจุลภาคสำหรับขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขมีช่องทางไหลกว้าง $400\ \mu\text{m}$ ยาว $3\ \text{cm}$ ลึก $75\ \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 27 (ก). ระบบของไหลจุลภาคมีทางเข้าและช่องทางออกอย่างละ

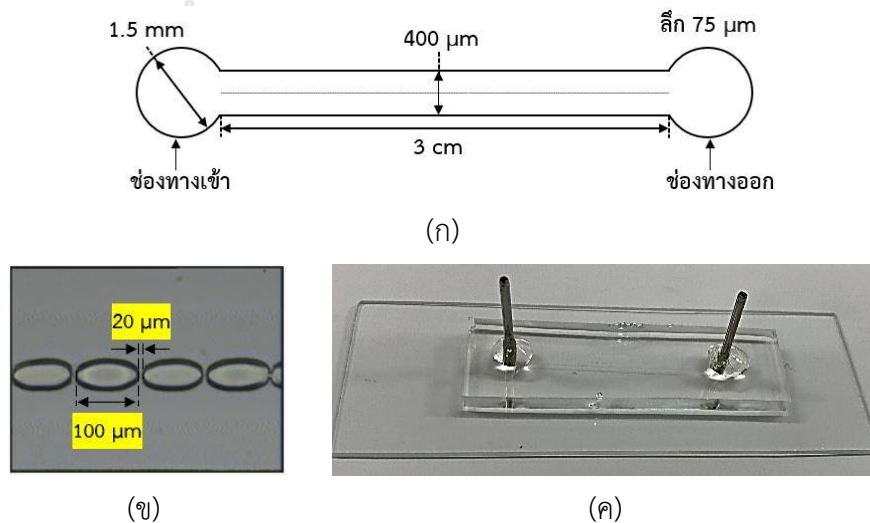
1 ช่องทาง. เนื่องจาก การทดลองขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขต้องสังเกตการเคลื่อนที่ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 10 เท่า ผู้วิจัยจึงต้องใช้ช่องทางไหลจุลภาคที่มีความยาว 3 cm เพื่อให้หลีกเลี่ยงไม่ให้อิเล็กโทรดสัมผัสกับเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์. ภายในช่องทางไหลจุลภาคมีเครื่องหมายระบุตำแหน่ง เพื่อใช้ในการวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข ดังแสดงในรูปที่ 27 (ข). อิเล็กโทรดของระบบของไหลจุลภาคคือสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 mm ยาว 1 cm. อิเล็กโทรดถูกติดตั้งบริเวณทางเข้าและทางออกของช่องทางไหลจุลภาคมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 3 cm ดังแสดงในรูปที่ 27 (ค).



รูปที่ 26 ระบบของไหลจุลภาคสำหรับขนส่งอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดง

(ก) มิติ, (ข) อิเล็กโทรดแพลทินัม และ (ค) อิเล็กโทรดสแตนเลส.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

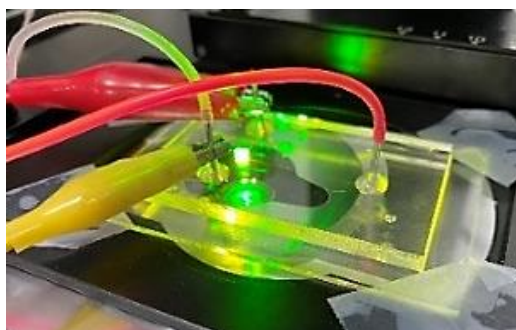
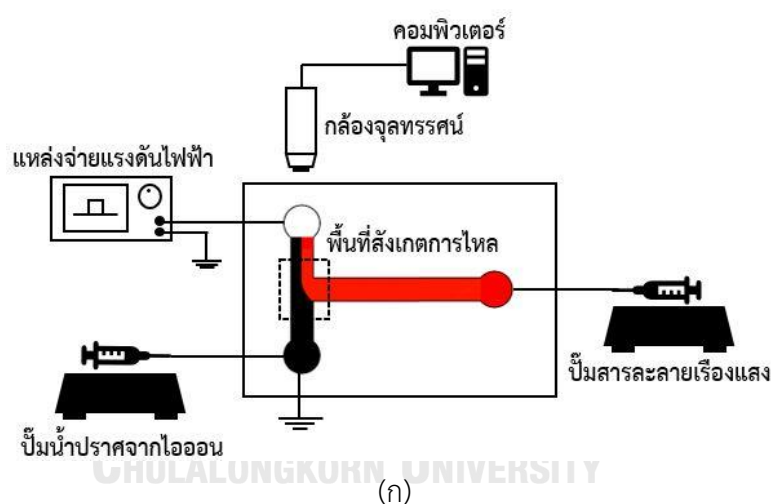


รูปที่ 27 ระบบของไหลจุลภาคสำหรับขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข

(ก) มิติ (ข) เครื่องหมายระบุตำแหน่งในช่องทางไหล และ (ค) ภาพถ่ายของชิพ.

3.2 การขับเคลื่อนของเหลว

การทดลองขับเคลื่อนของเหลวมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาทิศทางการไหลของของเหลวในช่องทางไหลจุลภาค. ของเหลวที่ใช้ในการทดลองคือน้ำปราศจากไอออนและสารละลายเรืองแสง (Rhodamine B dye) ที่มีสภาพนำไฟฟ้า 1 mS/m. รูปที่ 28 แสดงแผนภาพเค้าร่างและภาพถ่ายของการทดลองขับเคลื่อนของเหลว. การทดลองเริ่มจากฉีดน้ำปราศจากไอออนและสารละลายเรืองแสงเข้าสู่ช่องทางไหลด้วยปั๊มกระบอกฉีดยาอัตราการไหล 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ จนเต็มช่องทางไหล จากนั้นปิดปั๊มทั้งหมด. ปล่อยให้สารละลายผสมรวมกันจนอยู่ในสภาวะคงตัว. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (AU-20R110, Matsusada) ถูกเชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดของระบบของไหลจุลภาค. จากนั้นเริ่มป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 500 V (สนามไฟฟ้า 0.025 kV/mm). สังเกตและบันทึกการไหลของของเหลวจากการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (IXplore Standard, Olympus) โดยใช้กำลังขยาย 10 เท่า. ขั้นตอนการทดลองขับเคลื่อนของเหลวโดยละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.



รูปที่ 28 การทดลองขับเคลื่อนของเหลวในช่องทางไหลจุลภาค

(ก) แผนภาพเค้าร่าง และ (ข) ภาพถ่ายของชิพ.

3.3 การขนส่งอนุภาคและเซลล์

3.3.1 การขนส่งอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดง

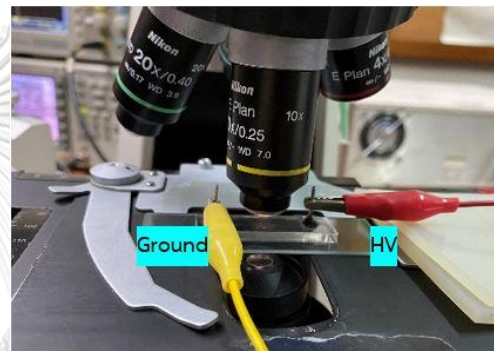
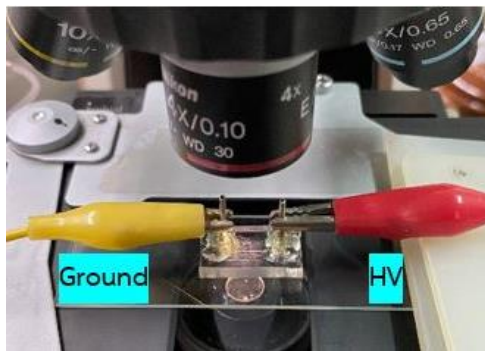
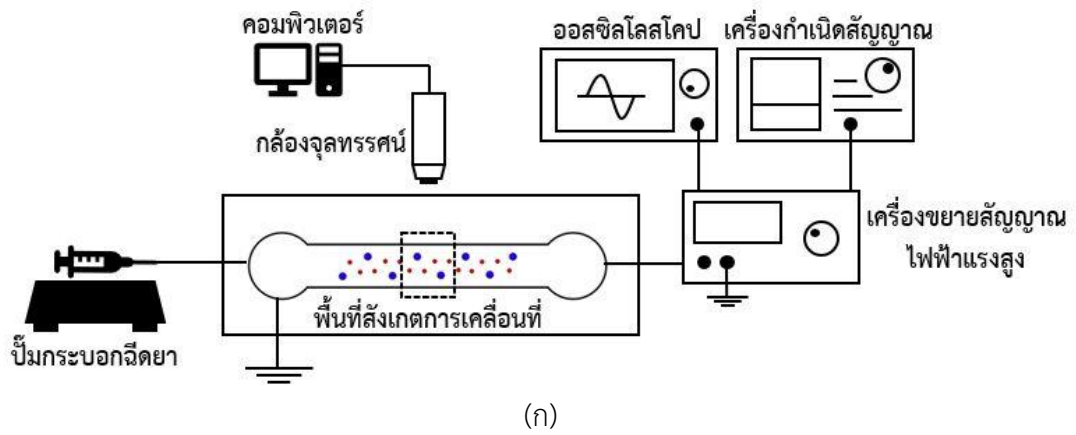
ผู้วิจัยทดลองขนส่งอนุภาคพอลิสไตรีนขนาด $10\ \mu\text{m}$ และเซลล์เม็ดเลือดแดงขนาดประมาณ $6-8\ \mu\text{m}$ ในช่องทางไหลจุลภาค. รูปที่ 29 (ก-ข) แสดงแผนภาพเค้าร่างและภาพถ่ายของการทดลองขนส่งอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดง. การทดลองขนส่งอนุภาค ผู้วิจัยได้ปรับสภาพนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยด้วย Phosphate Buffered Saline (PBS) ให้มีค่าแตกต่างกัน 5 ค่า ได้แก่ 1, 5, 25, 75 และ $125\ \text{mS/m}$ โดยปรับให้มีค่า pH เท่ากับ 7. การทดลองขนส่งเซลล์เม็ดเลือดแดง ผู้วิจัยผสมเซลล์เม็ดเลือดแดงในสารละลายเดกซ์โทรสความเข้มข้น $0.26\ \text{M}$ ซึ่งเป็นสารละลายไอโซโทนิกโดยประมาณสำหรับเซลล์เม็ดเลือดแดง โดยมีสภาพนำไฟฟ้า $1\ \text{mS/m}$. การทดลองเริ่มจากฉีดสารแขวนลอยที่มีอนุภาคหรือเซลล์เม็ดเลือดแดงเข้าสู่ช่องทางไหลจุลภาคด้วยปั๊มกระบอกฉีดยาอัตราการไหล $10\ \mu\text{L/min}$ จากนั้นปลดปั๊มออกจากระบบของไหลจุลภาค. รูปที่ 30 แสดงอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงที่อยู่ในช่องทางไหลจุลภาค.

เครื่องขยายสัญญาณไฟฟ้าแรงสูง (610E, Trek) เชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดบริเวณทางออกของช่องทางไหลจุลภาค. เครื่องกำเนิดสัญญาณ (AFG3021B, Tektronix) และออสซิลอสโคป (DS1022C, Rigol) ถูกเชื่อมต่อกับเครื่องขยายสัญญาณไฟฟ้าแรงสูงเพื่อใช้กำหนดและสังเกตขนาดของแรงดันไฟฟ้าตามลำดับ. การทดลองขนส่งอนุภาค ผู้วิจัยทำการทดลองโดยใช้แรงดันไฟฟารูปคลื่นไซน์และพัลส์สี่เหลี่ยม. ขนาดของแรงดันไฟฟารูปคลื่นไซน์คือแรงดันไฟฟ้ายอดถึงยอด (Peak-peak voltage, V_{pp}) และรูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยมคือแรงดันไฟฟ้ายอด (Peak voltage, V_p). การทดลองมี 2 รูปแบบ คือ ทดลองโดยกำหนดคาบเวลาคงที่ $1\ \text{sec}$ ปรับสนามไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่าง $0.005-0.04\ \text{kV/mm}$ (แรงดันไฟฟ้า $100-500\ \text{V}$) และทดลองโดยกำหนดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.019 และ $0.03\ \text{kV/mm}$ สำหรับแรงดันไฟฟารูปคลื่นไซน์และพัลส์สี่เหลี่ยม ตามลำดับ (แรงดันไฟฟ้าคงที่ $300\ \text{V}$) ปรับคาบเวลาระหว่าง $0.25-2\ \text{sec}$. การทดลองขนส่งเซลล์เม็ดเลือดแดง แรงดันไฟฟ้าที่ใช้เป็นรูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม ทดลองโดยกำหนดคาบเวลาคงที่ $1\ \text{sec}$ ปรับสนามไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่าง $0.01-0.04\ \text{kV/mm}$ (แรงดันไฟฟ้า $100-400\ \text{V}$). สังเกตและบันทึกการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Eclipse E200, Nikon) กำลังขยาย 4 เท่า. ระยะเวลาเคลื่อนที่เฉลี่ยของอนุภาคได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 20 อนุภาค และระยะเวลาเคลื่อนที่เฉลี่ยของเซลล์เม็ดเลือดแดงได้จากการเคลื่อนที่ของเซลล์ 10 เซลล์. ขั้นตอนการทดลองโดยละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.

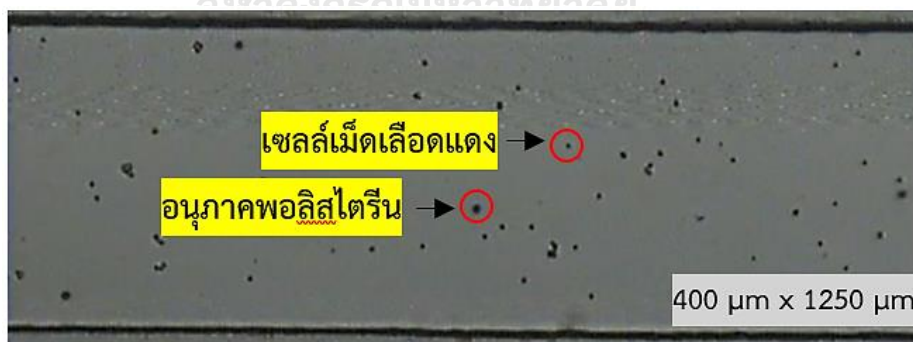
3.3.2 การขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข

ผู้วิจัยทดลองขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขซึ่งมีขนาดประมาณ 15 μm ในช่องทางไหลจุลภาค. ผู้วิจัยทดลองขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข เนื่องจากรูปร่างของเซลล์เป็นทรงกลมมากกว่าเซลล์เม็ดเลือดแดง ทำให้สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของเซลล์ได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น. ผู้วิจัยผสมเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขกับสารละลายเดกซ์โทรสความเข้มข้น 0.3 M ซึ่งเป็นสารละลายไอโซโทนิกโดยประมาณสำหรับเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข โดยมีสภาพนำไฟฟ้า 12 mS/m. การทดลองเริ่มจากฉีดสารแขวนลอยเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขเข้าสู่ช่องทางไหลจุลภาคด้วยปั๊มกระบอกฉีดยาอัตราการไหล 2 $\mu\text{L}/\text{min}$ จากนั้นปลดปั๊มออกจากระบบของไหลจุลภาค. ผู้วิจัยได้ปรับอัตราการไหลของปั๊มกระบอกฉีดยาให้แตกต่างจากการทดลองขนส่งอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดอากาศในช่องทางไหล ซึ่งการปรับอัตราการไหลจะไม่มีผลต่อทิศทางและระยะทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์. รูปที่ 31 แสดงเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขในช่องทางไหลจุลภาค.

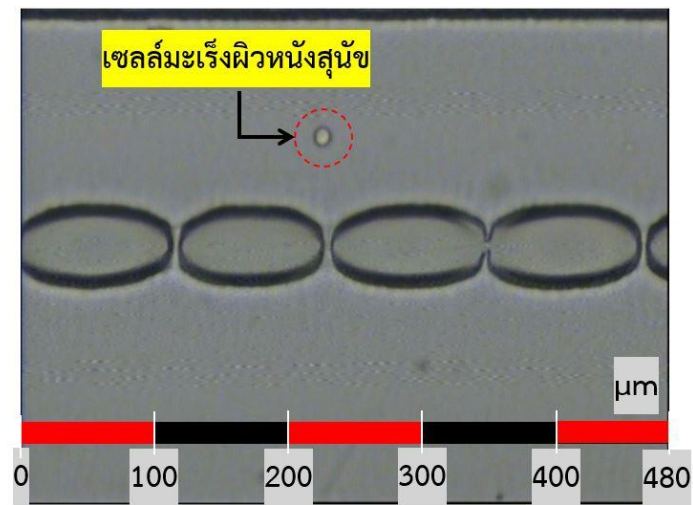
แผนภาพเค้าร่างของการทดลองขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขเหมือนกับการทดลองขนส่งอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดง ดังแสดงในรูปที่ 29 (ก). ภาพถ่ายของชิฟจากการทดลองขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข ดังแสดงในรูปที่ 29 (ค). การทดลองใช้แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม. ทำการทดลองใน 2 รูปแบบ คือ ทดลองโดยกำหนดคาบเวลาคงที่ 1 sec ปรับสนามไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่าง 0.005-0.025 kV/mm (แรงดันไฟฟ้า 150-750 V) และทดลองโดยกำหนดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.01 kV/mm (แรงดันไฟฟ้าคงที่ 300 V) ปรับคาบเวลาระหว่าง 0.25-2 sec. สังเกตและบันทึกการเคลื่อนที่ของเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Eclipse E200, Nikon) ที่กำลังขยาย 10 เท่า. ระยะการเคลื่อนที่เฉลี่ยของเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขได้จากการเคลื่อนที่ของเซลล์ 10 เซลล์. ขั้นตอนการทดลองโดยละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.



รูปที่ 29 แผนภาพเค้าร่างและภาพถ่ายของการทดลองขนส่งอนุภาคและเซลล์
 (ก) แผนภาพเค้าร่าง, (ข) ภาพถ่ายชิพของการทดลองขนส่งอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดง
 และ (ค) ภาพถ่ายชิพของการทดลองขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข.



รูปที่ 30 อนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงในช่องทางไหลจุลภาค.



รูปที่ 31 เซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขในช่องทางไหลจุลภาค.



บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของของเหลว, อนุภาค และเซลล์

4.1.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของของเหลว

รูปที่ 32 แสดงผลการทดลองขับเคลื่อนของเหลวในช่องทางไหลจุลภาค. จากการทดลอง ผู้วิจัยพบว่า เมื่อเริ่มฉีดน้ำปราศจากไอออนและสารละลายเรืองแสงเข้าสู่ช่องทางไหลจุลภาค น้ำปราศจากไอออนและสารละลายเรืองแสงจะไหลแยกจากกันอย่างชัดเจนด้วยการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) ดังแสดงในรูปที่ 32 (ก). หลังจากที่ผู้วิจัยปิดปั๊มกระบอกฉีดยาทั้งหมดเป็นเวลา 5 นาที ของเหลวทั้งสองผสมรวมกัน ดังแสดงในรูปที่ 32 (ข) และผสมรวมกันจนอยู่ในสภาวะคงตัว หลังจากปิดปั๊ม 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 32 (ค). เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า สารละลายเรืองแสงจะไหลในทิศทางเดียวกับทิศทางของสนามไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 32 (ง) และไหลทั่วช่องทางไหลจุลภาค หลังจากป้อนแรงดันไฟฟ้าต่อเนื่อง 2.5 นาที ดังแสดงในรูปที่ 32 (จ). หลังจากป้อนแรงดันไฟฟ้าต่อเนื่อง 5 นาที ของเหลวทั้งสองผสมรวมกันจนทำให้สีเรืองแสงจางลง ดังแสดงในรูปที่ 32 (ฉ). เมื่อตัดแรงดันไฟฟ้า ของเหลวทั้งสองจะผสมรวมกันจนทำให้ไม่เห็นสีเรืองแสง ดังแสดงในรูปที่ 32 (ซ-ช). จากผลการทดลอง ผู้วิจัยพบว่า เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ของเหลวในช่องทางไหลจุลภาคจะไหลในทิศทางเดียวกับทิศทางของสนามไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีอิเล็กโทรออสโมซิส.

4.1.2 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์

ในกรณีของอนุภาค ผู้วิจัยพบว่า เมื่อเริ่มป้อนแรงดันไฟฟ้าอนุภาคจะเริ่มเคลื่อนที่ในทิศทางของสนามไฟฟ้า จากนั้นอนุภาคจะกลับทิศทางการเคลื่อนที่. กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 33 (ข). กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 34 (ข). ผู้วิจัยคาดว่า เมื่อเริ่มป้อนแรงดันไฟฟ้าปรากฏการณ์อิเล็กโทรออสโมซิสจะเด่นกว่าปรากฏการณ์อิเล็กโทรโฟเรซิส จึงทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กโทรออสโมซิสในทิศทางของสนามไฟฟ้า. จากนั้น เมื่ออิเล็กโทรโฟเรซิสเด่นกว่าอิเล็กโทรออสโมซิส อนุภาคจะเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กโทรโฟเรซิส ดังนั้นทิศทางการเคลื่อนที่จึงเป็นในทิศตรงข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้า. แรงทางไฟฟ้าของอิเล็กโทรออสโมซิสและอิเล็กโทรโฟเรซิสส่งผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังแสดงแนวคิดในรูปที่ 35 (ก). เวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละช่วงตามรูปที่ 33 และรูปที่ 34 แสดงดังตารางที่ 2

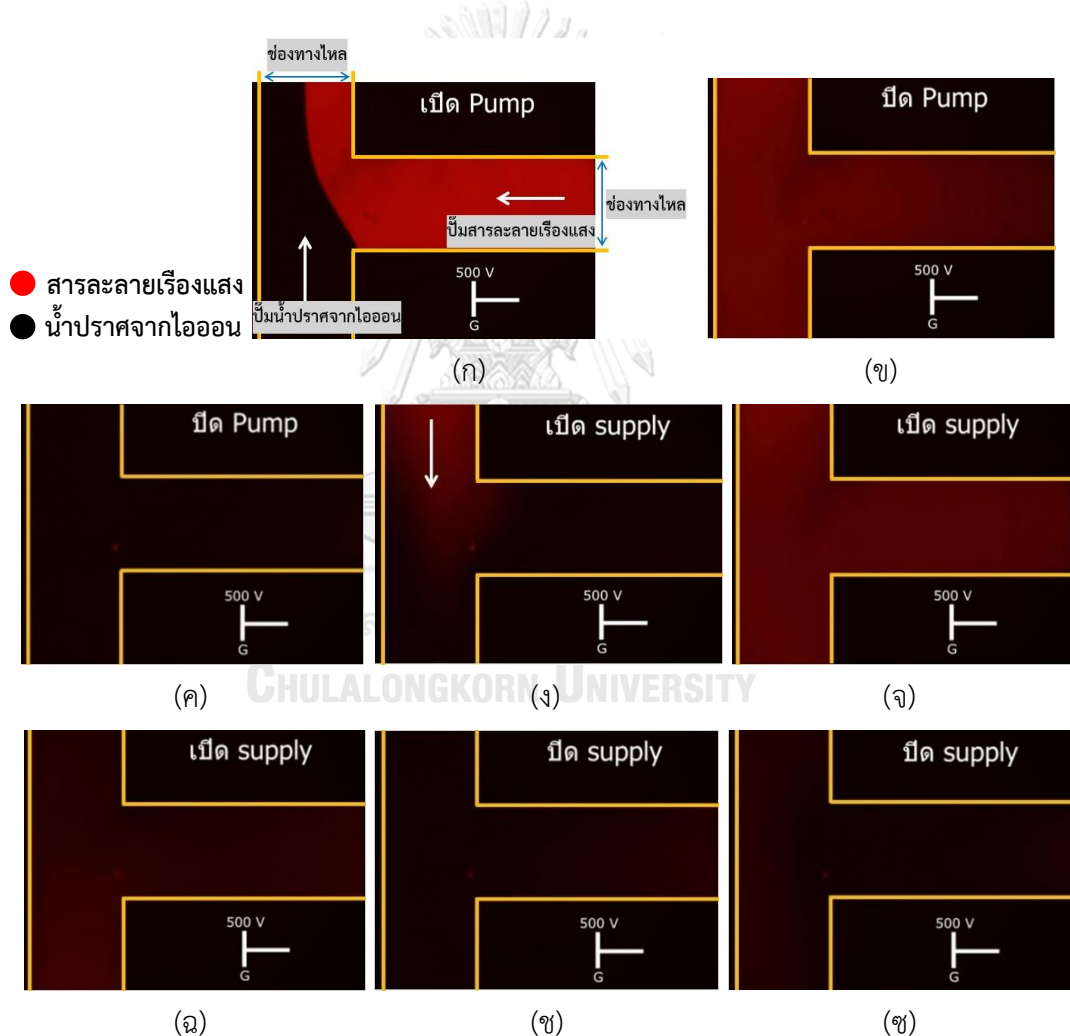
และตารางที่ 3 ตามลำดับ. กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ ผู้วิจัยพบว่า เวลาการเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กทรอนิกส์ (ช่วงที่ 1) ของอนุภาคมีค่าใกล้เคียงกันทุกขนาดสนามไฟฟ้า. กรณีรูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม ผู้วิจัยพบว่า เวลาการเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กทรอนิกส์ (ช่วงที่ 1) ของอนุภาคแปรผกผันกับสนามไฟฟ้า อย่างเป็นเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 36. เมื่อเปรียบเทียบเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาค (ผลรวมของช่วงที่ 1-3) กับเวลาที่ป้อนแรงดันไฟฟ้า ผู้วิจัยพบว่า เวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีค่ามากกว่าเวลาที่ป้อนแรงดันไฟฟ้า. ผู้วิจัยคาดว่าเป็นผลมาจากการปรับสมดุลของของเหลว ดังแสดงการตรวจสอบในภาคผนวก ง.

ในกรณีของเซลล์เม็ดเลือดแดง ผู้วิจัยทดลองขับเคลื่อนเซลล์เม็ดเลือดแดงด้วยแรงดันไฟฟ้า รูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม. ผู้วิจัยพบว่า เมื่อเริ่มป้อนแรงดันไฟฟ้าเซลล์เม็ดเลือดแดงจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 34 (ค) ซึ่งแตกต่างจากอนุภาคที่เริ่มเคลื่อนที่ในทิศทางของสนามไฟฟ้า จากนั้นจะกลับทิศทางเคลื่อนที่. ผู้วิจัยคาดว่า เมื่อเริ่มป้อนแรงดันไฟฟ้า ปรากฏการณ์อิเล็กทรอนิกส์โพเรซิสจะเด่นกว่าปรากฏการณ์อิเล็กทรอนิกส์ จึงทำให้เซลล์เม็ดเลือดแดงเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กทรอนิกส์ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้า. แรงทางไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์และอิเล็กทรอนิกส์ที่ส่งผลต่อทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังแสดงแนวคิดในรูปที่ 35 (ข). เวลาการเคลื่อนที่ของเซลล์เม็ดเลือดแดงแสดงดังตารางที่ 4. ผู้วิจัยพบว่า เวลาการเคลื่อนที่ของเซลล์เม็ดเลือดแดงมีค่ามากกว่าเวลาที่ป้อนแรงดันไฟฟ้า ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการปรับสมดุลของของเหลวเช่นเดียวกับกรณีของอนุภาค.

ในกรณีของเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข ผู้วิจัยทดลองขับเคลื่อนเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม. ผู้วิจัยพบว่า เมื่อเริ่มป้อนแรงดันไฟฟ้าเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขจะเริ่มเคลื่อนที่ในทิศทางของสนามไฟฟ้า จากนั้นจะกลับทิศทางเคลื่อนที่เป็นทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 34 (ข) ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค. แรงทางไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์และอิเล็กทรอนิกส์ที่ส่งผลต่อทิศทางเคลื่อนที่ของเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขเหมือนกับกรณีของอนุภาค ดังแสดงแนวคิดในรูปที่ 35 (ก). เวลาการเคลื่อนที่ของเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขในแต่ละช่วงแสดงดังตารางที่ 5. ผู้วิจัยพบว่า เวลาการเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กทรอนิกส์ (ช่วงที่ 1) ของอนุภาคและเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขแปรผกผันกันสนามไฟฟ้า อย่างเป็นเชิงเส้น. เวลาการเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กทรอนิกส์ (ช่วงที่ 1) ของเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขมีค่าน้อยกว่าอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 36. ผู้วิจัยคาดว่านอกจากขนาดและค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาคและเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขที่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ยังอาจเป็นผลจากความแตกต่างของสภาพนำไฟฟ้าของสาร

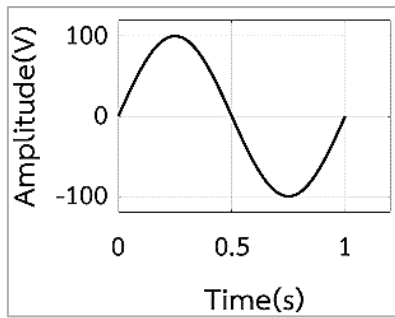
แขวนลอย. สภาพนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคและเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขมีค่า 1 mS/m และ 12 mS/m ตามลำดับ. สภาพนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นของตัวกลางส่งผลต่อกำบัง (Shielding) ประจุ ทำให้ผลทางอิเล็กทรอนิกส์ลดลงได้.

จากรูปที่ 36 ผู้วิจัยพบว่า เมื่อสนามไฟฟ้าสูงขึ้น เวลาการเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กทรอนิกส์ของอนุภาคและเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขจะลดลง. สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นส่งผลต่อแรงทางไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์และอิเล็กทรอนิกส์. ผู้วิจัยคาดว่า เมื่อสนามไฟฟ้าสูงขึ้น แรงทางไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นมากกว่าแรงทางไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ จึงส่งผลให้อิเล็กทรอนิกส์โดดเด่นเร็วมากขึ้น เป็นผลให้เวลาการเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กทรอนิกส์ (ช่วงที่ 1) ลดลง.

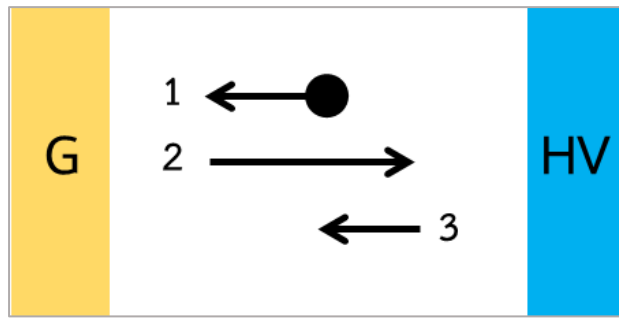


รูปที่ 32 ผลการทดลองขับเคลื่อนของเหลว

(ก) ระหว่างการฉีดสารละลายเข้าช่องทางไหลจุลภาค, (ข) หลังปิดปั๊ม 5 นาที, (ค) หลังปิดปั๊ม 10 นาที, (ง) ขณะเริ่มจ่ายแรงดันไฟฟ้า, (จ) หลังจ่ายแรงดันไฟฟ้า 2.5 นาที, (ฉ) หลังจ่ายแรงดันไฟฟ้า 5 นาที, (ช) ขณะปิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า และ (ซ) หลังปิดแหล่งจ่าย 3 นาที.



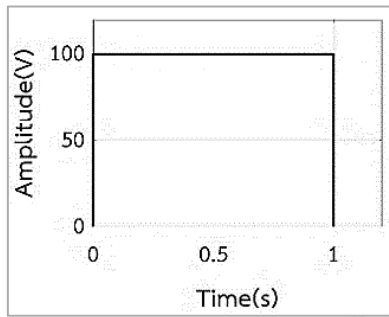
(ก)



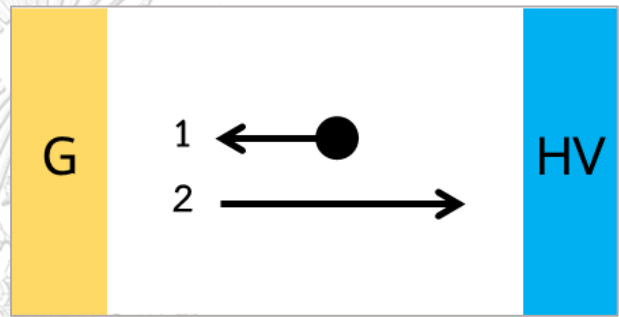
(ข)

รูปที่ 33 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์

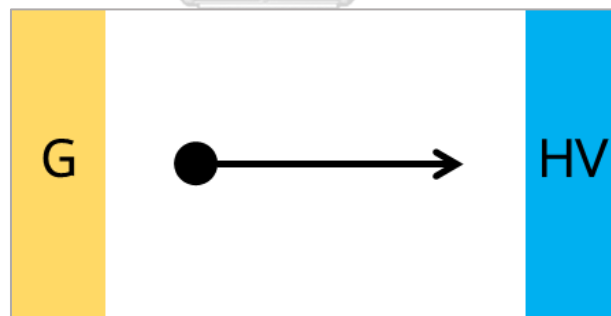
(ก) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า และ (ข) ทิศทางการเคลื่อนที่.



(ก)



(ข)

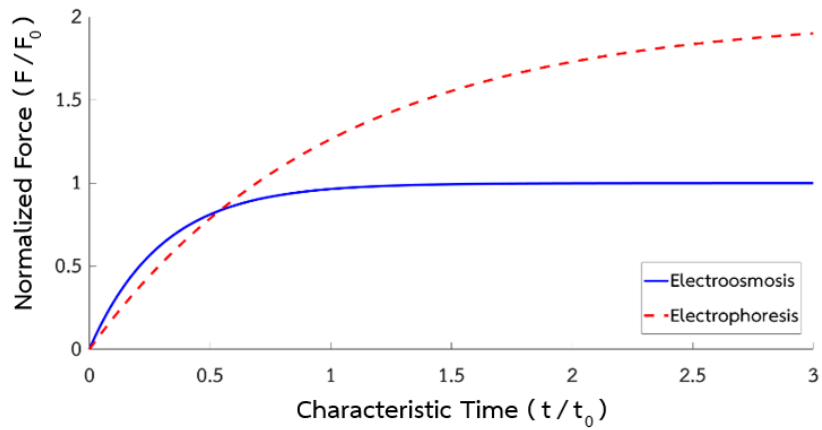


(ค)

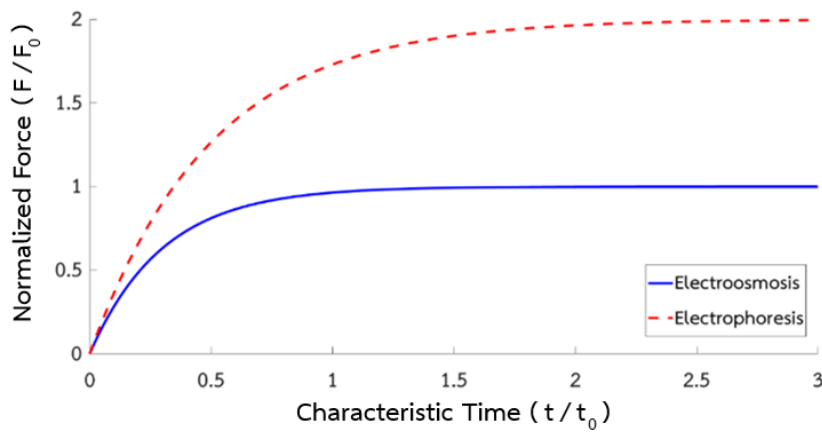
รูปที่ 34 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์ กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม

(ก) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า, (ข) ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข

และ (ค) ทิศทางการเคลื่อนที่ของเซลล์เม็ดเลือดแดง.

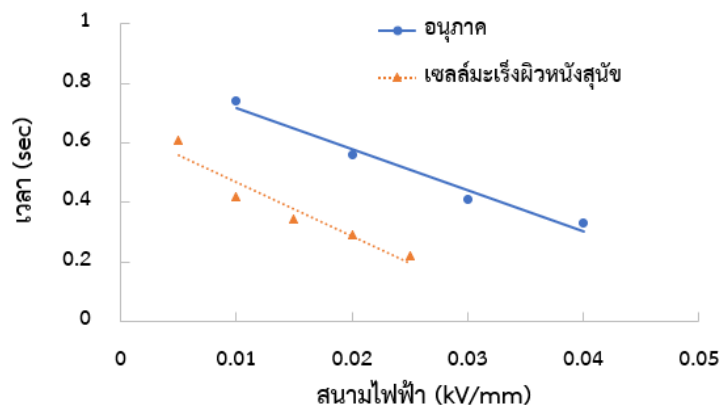


(ก)



(ข)

รูปที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางไฟฟ้ากับเวลาที่ส่งผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์ด้วยปรากฏการณ์อิเล็กโทรออสโมซิสและอิเล็กโทรโฟเรซิส
 (ก) อนุภาคและเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข และ (ข) เซลล์เม็ดเลือดแดง.



รูปที่ 36 เวลาการเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กโทรออสโมซิส (ช่วงที่ 1) ของอนุภาคและเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขที่ขนาดสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน.

ตารางที่ 2 เวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละช่วง กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์

สนามไฟฟ้า เฉลี่ย (kV/mm)	เวลาการเคลื่อนที่ (sec)		
	ช่วงที่ 1 (อิเล็กโทรออสโมซิส)	ช่วงที่ 2 (อิเล็กโทรโฟเรซิส)	ช่วงที่ 3 (อิเล็กโทรโฟเรซิสและการ ปรับสมดุลของของเหลว)
0.006	0.387	0.467	0.347
0.013	0.293	0.507	0.867
0.019	0.267	0.493	0.893
0.025	0.213	0.507	1.640
0.032	0.227	0.520	1.093

ตารางที่ 3 เวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละช่วง กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม

สนามไฟฟ้า เฉลี่ย (kV/mm)	เวลาการเคลื่อนที่ (sec)	
	ช่วงที่ 1 (อิเล็กโทรออสโมซิส)	ช่วงที่ 2 (อิเล็กโทรโฟเรซิสและการปรับสมดุลของของเหลว)
0.01	0.74	1.32
0.02	0.56	1.83
0.03	0.41	2.07
0.04	0.33	2.23

ตารางที่ 4 เวลาการเคลื่อนที่ของเซลล์เม็ดเลือดแดง

สนามไฟฟ้าเฉลี่ย (kV/mm)	เวลาการเคลื่อนที่ (sec) (อิเล็กโทรโฟเรซิสและการปรับสมดุลของของเหลว)
0.01	1.227
0.02	1.467
0.03	1.647
0.04	1.687

ตารางที่ 5 เวลาการเคลื่อนที่ของเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข

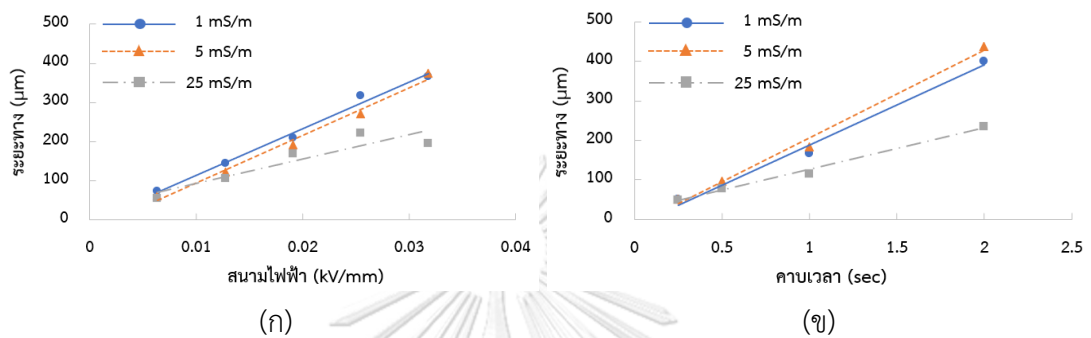
สนามไฟฟ้า เฉลี่ย (kV/mm)	เวลาการเคลื่อนที่ (sec)	
	ช่วงที่ 1 (อิเล็กโทรออสโมซิส)	ช่วงที่ 2 (อิเล็กโทรโฟเรซิสและการปรับสมดุลของของเหลว)
0.005	0.608	2.020
0.010	0.420	2.772
0.015	0.344	3.396
0.020	0.292	3.996
0.025	0.216	4.496

4.2 ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์

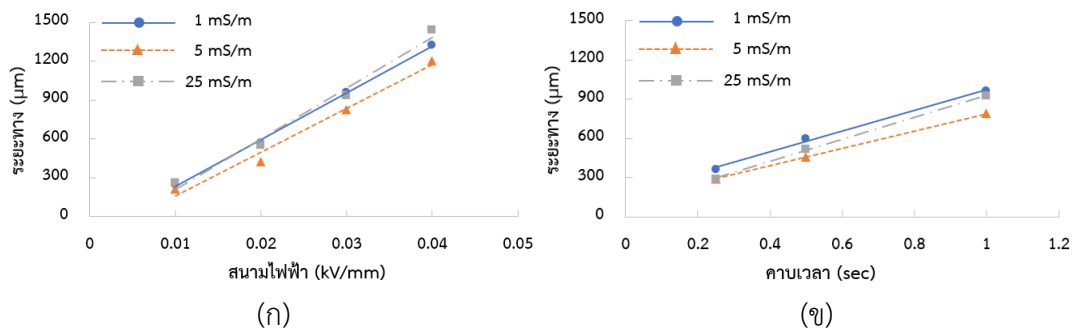
4.2.1 ผลของสภาพนำไฟฟ้าของสารแขวนลอย

ผู้วิจัยทดลองขนส่งอนุภาคในสารแขวนลอยสภาพนำไฟฟ้า 1, 5, 25, 75 และ 125 mS/m ด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์และพัลส์สี่เหลี่ยม สนามไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่าง 0.006-0.04 kV/mm (แรงดันไฟฟ้า 100-500 V และคาบเวลา 0.25-2 sec). จากการทดลองผู้วิจัยพบว่า กรณีสภาพนำไฟฟ้า 75 และ 125 mS/m อนุภาคมีทิศทางการเคลื่อนที่แตกต่างออกไปจากกรณีสภาพนำไฟฟ้า 1, 5 และ 25 mS/m ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการก้ำกั้ประจุ. ดังนั้น ผู้วิจัยจึงไม่ได้นำผลการทดลองกรณีดังกล่าวมาวิเคราะห์รวมกับกรณีสภาพนำไฟฟ้า 1, 5 และ 25 mS/m. รูปที่ 37 แสดงระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสารแขวนลอยสภาพนำไฟฟ้า 1, 5 และ 25 mS/m ด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ครึ่งคาบ. เนื่องจากการทดลองผู้วิจัยมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง จึงวัดระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม. ผู้วิจัยพบว่า อนุภาคเคลื่อนที่ได้ระยะทางประมาณ 50-400 μm , 50-440 μm และ 50-240 μm สำหรับสารแขวนลอยสภาพนำไฟฟ้า 1, 5 และ 25 mS/m ตามลำดับ. รูปที่ 38 แสดงระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสารแขวนลอยสภาพนำไฟฟ้า 1, 5 และ 25 mS/m ด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม. ผู้วิจัยพบว่า อนุภาคเคลื่อนที่ได้ระยะทางประมาณ 250-1330 μm , 210-1200 μm และ 260-1440 μm สำหรับสารแขวนลอยสภาพนำไฟฟ้า 1, 5 และ 25 mS/m ตามลำดับ. ผลการทดลองระยะทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยละเอียดแสดงในภาคผนวก จ. ผู้วิจัยพบว่า ระยะทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแปรผันตามสนามไฟฟ้าและคาบเวลาอย่างเป็นเชิงเส้น. กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม ความชันเส้นกราฟสนามไฟฟ้ากับระยะทางการเคลื่อนที่และความชันเส้นกราฟคาบเวลากับระยะทางการเคลื่อนที่ มีค่าใกล้เคียงกัน

ทุกสภาพนำไฟฟ้า. กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ ความชันเส้นกราฟสนามไฟฟ้ากับระยะทางการเคลื่อนที่และความชันเส้นกราฟคาบเวลากับระยะทางการเคลื่อนที่ของสารแขวนลอยสภาพนำไฟฟ้า 1 และ 5 mS/m มีค่าใกล้เคียงกัน. กรณีสภาพนำไฟฟ้า 25 mS/m มีค่าความชันเส้นกราฟน้อยกว่า. ผู้วิจัยคาดว่า อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ซีตาที่แปรผันตามสภาพนำไฟฟ้าของของเหลว, การอัดฉีดประจุจากอิเล็กโทรดคู่ของเหลวหรือการกำบังอิเล็กโทรดเนื่องจากประจุในของเหลว.



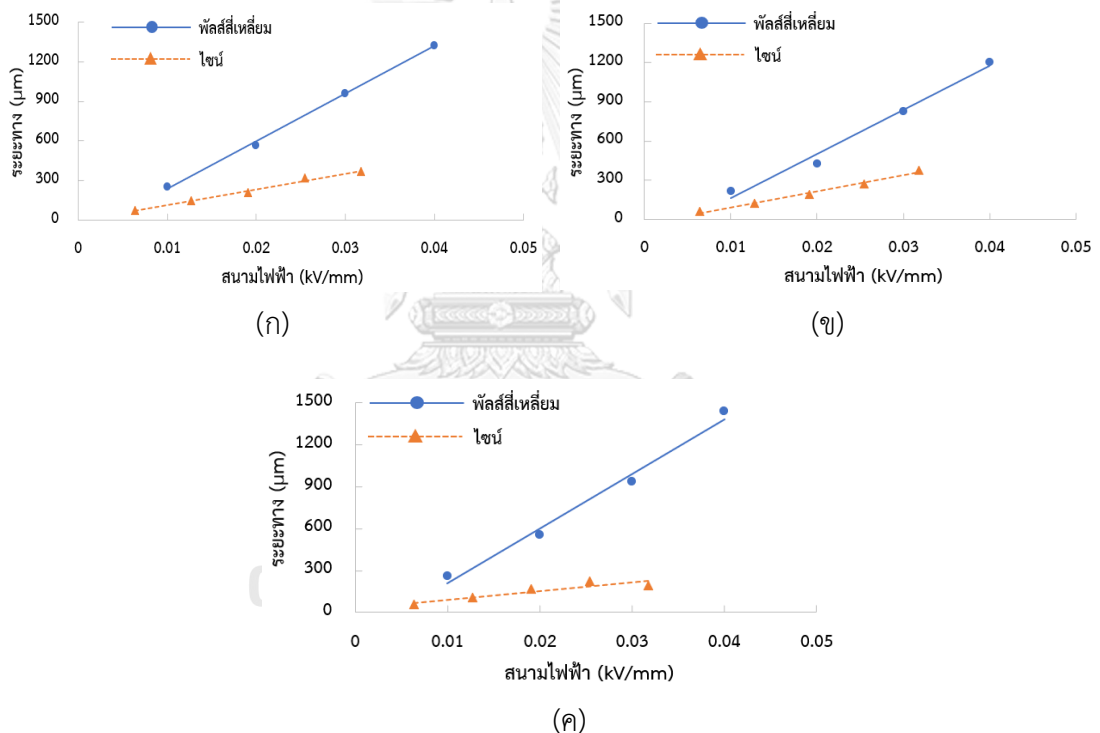
รูปที่ 37 ระยะที่ขนส่งอนุภาคได้ในสารแขวนลอยสภาพนำไฟฟ้า 1, 5 และ 25 mS/m กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ครึ่งคาบ
(ก) สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.006-0.032 kV/mm คาบเวลา 1 sec และ
(ข) สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.019 kV/mm คาบเวลา 0.25-2 sec.



รูปที่ 38 ระยะที่ขนส่งอนุภาคได้ในสารแขวนลอยสภาพนำไฟฟ้า 1, 5 และ 25 mS/m กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม
(ก) สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.01-0.04 kV/mm คาบเวลา 1 sec และ
(ข) สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.03 kV/mm คาบเวลา 0.25-2 sec.

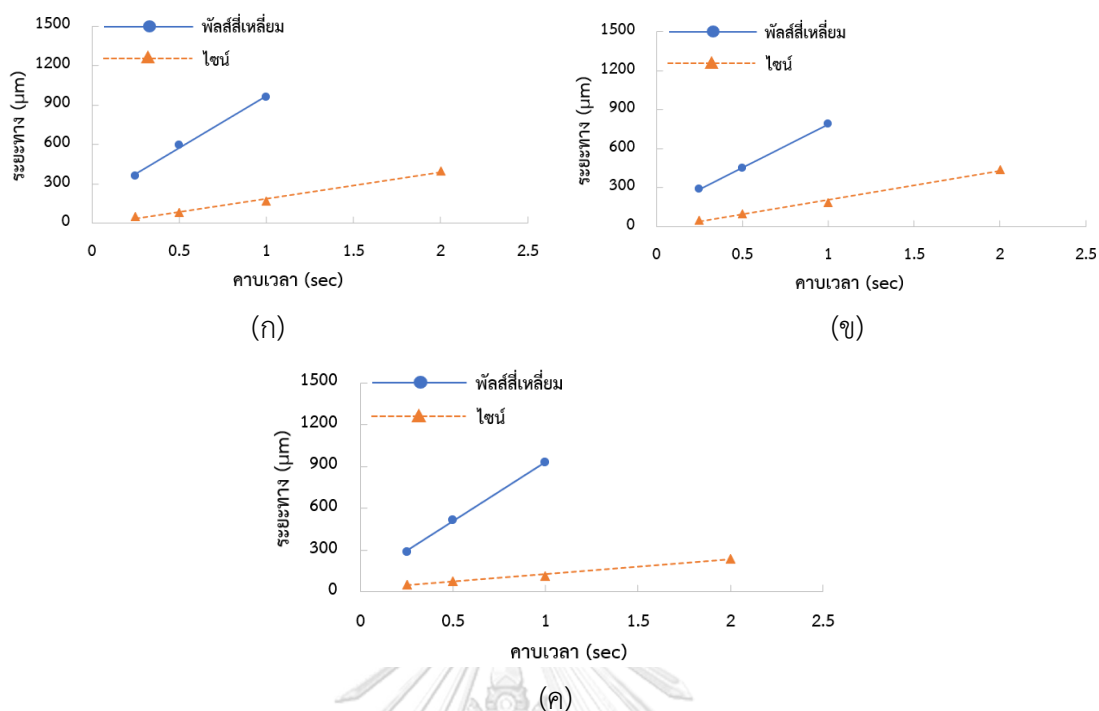
4.2.2 ผลของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า

รูปที่ 39 และรูปที่ 40 แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ครึ่งคาบและพัลส์สี่เหลี่ยม. ผู้วิจัยพบว่า แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยมสามารถขนส่งอนุภาคได้ระยะทางมากกว่าแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์อย่างชัดเจน ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยที่สูงกว่าของรูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม และอาจมีผลเพิ่มเติมมาจากการปรับสมดุลของของเหลว หลังจากที่ผลของอิเล็กโทรออสโมซิสหมดไป. ทั้งนี้เพราะว่า แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยมที่ใช้มีเฉพาค่าบวก ในขณะที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าของเหลวจะเคลื่อนที่ในทิศทางของสนามไฟฟ้าเท่านั้น เมื่อตัดแรงดันไฟฟ้าจะทำให้เกิดการปรับสมดุลของของเหลวมากกว่าในกรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ ซึ่งมีทั้งค่าบวกและค่าลบ.



รูปที่ 39 การเปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคระหว่างแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ครึ่งคาบ และพัลส์สี่เหลี่ยม กรณีสนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.006-0.04 kV/mm คาบเวลา 1 sec

(ก) 1 mS/m, (ข) 5 mS/m และ (ค) 25 mS/m.



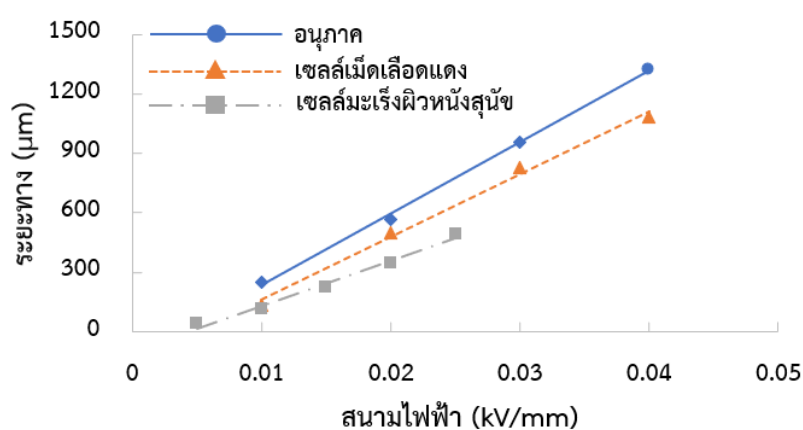
รูปที่ 40 การเปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคระหว่างแรงดันไฟฟ้า รูปคลื่นไชน์ครึ่งคาบและพัลส์สี่เหลี่ยม กรณีสนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.019 และ 0.03 kV/mm สำหรับรูปคลื่นไชน์และพัลส์สี่เหลี่ยมตามลำดับ คาบเวลา 0.25-1 sec
(ก) 1 mS/m, (ข) 5 mS/m และ (ค) 25 mS/m.

4.2.3 เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างอนุภาคกับเซลล์

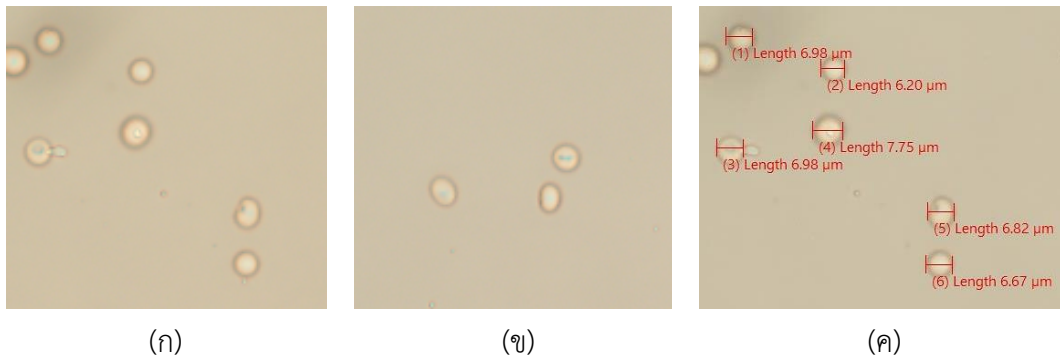
ในกรณีเซลล์เม็ดเลือดแดง ผู้วิจัยเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการขนส่งอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.01-0.04 kV/mm โดยสารแขวนลอยอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงมีสภาพนำไฟฟ้า 1 mS/m. รูปที่ 41 แสดงผลการเปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดง. ผู้วิจัยพบว่า อนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงเคลื่อนที่ได้ระยะทางประมาณ 200-1400 μm และ 100-1000 μm ตามลำดับ. ระยะเวลาเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงแปรผันตามสนามไฟฟ้าอย่างเป็นเชิงเส้น. ความชันเส้นกราฟสนามไฟฟ้ากับระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้คาดว่าเป็นผลมาจากผลต่างของแรงทางไฟฟ้า (7) และแรงลากของเหลว (8) ที่กระทำต่ออนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงมีค่าใกล้เคียงกัน. แรงทางไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคและแรงลากของเหลวในทิศตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคแปรผันตามค่าประจุไฟฟ้า (ดังจะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 4.3) และขนาดของอนุภาคหรือเซลล์เม็ดเลือดแดง. นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบรูปร่างและขนาดของเซลล์

เม็ดเลือดแดงก่อนและหลังป้อนสนามไฟฟ้า โดยส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 60 เท่า. ผู้วิจัยไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ขนาดของเซลล์เม็ดเลือดแดงก่อนและหลังป้อนสนามไฟฟ้า มีขนาดเฉลี่ย 6.70 μm และ 6.84 μm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 42. ดังนั้น ผู้วิจัยสามารถขนส่งเซลล์เม็ดเลือดแดงในช่องทางไหลจุลภาคได้ โดยที่เซลล์ไม่เกิดความเสียหาย.

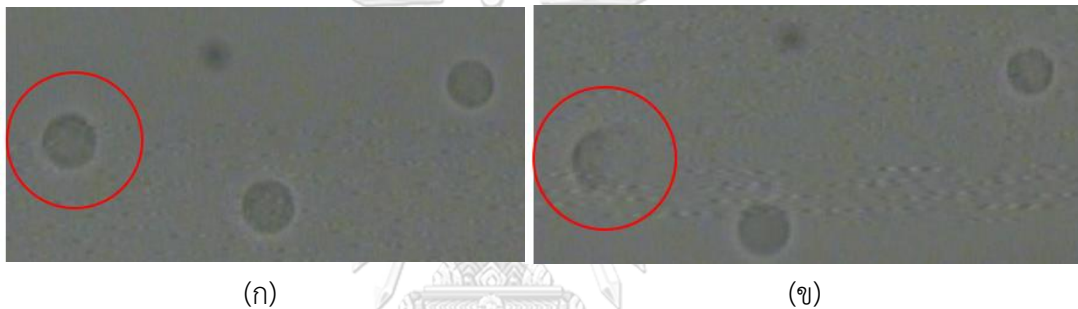
ในกรณีเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข การทดลองใช้แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยมมีสนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.005-0.025 kV/mm และสารแขวนลอยเซลล์มะเร็งผิวหนังมีสภาพนำไฟฟ้า 12 mS/m. รูปที่ 41 แสดงผลการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาค, เซลล์เม็ดเลือดแดงและเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข. ผู้วิจัยพบว่า อนุภาค, เซลล์เม็ดเลือดแดงและเซลล์มะเร็งผิวหนังเคลื่อนที่ได้ระยะทางประมาณ 200-1400 μm , 100-1000 μm และ 40-500 μm ตามลำดับ. ระยะที่เซลล์มะเร็งผิวหนังเคลื่อนที่แปรผันตามสนามไฟฟ้าอย่างเป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกัน. ผู้วิจัยสังเกตว่าที่สนามไฟฟ้าเท่ากัน ระยะทางการเคลื่อนที่และความชันเส้นกราฟสนามไฟฟ้ากับระยะทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงมีค่ามากกว่าเซลล์มะเร็งผิวหนัง. ผู้วิจัยคาดว่าเป็นผลมาจากขนาดและค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาค, เซลล์เม็ดเลือดแดงและเซลล์มะเร็งผิวหนังแตกต่างกัน (ดังจะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 4.3) และอาจมีผลมาจากค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยเซลล์มะเร็งผิวหนังมีค่ามากกว่า ซึ่งอาจจะทำให้ผลทางอิเล็กทรอนิกส์ลดลง. ทั้งนี้ การทดลองขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังทำภายใต้สนามไฟฟ้าสูงสุด 0.025 kV/mm เนื่องจากที่สนามไฟฟ้าสูงกว่านี้จะทำให้เซลล์มะเร็งผิวหนังแตก ดังแสดงในรูปที่ 43.



รูปที่ 41 การเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคกับเซลล์.



รูปที่ 42 เซลล์เม็ดเลือดที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 60 เท่า
 (ก) เซลล์ก่อนป้อนสนามไฟฟ้า, (ข) เซลล์หลังป้อนสนามไฟฟ้า 0.04 kV/mm
 และ (ค) การวัดขนาดเซลล์.



รูปที่ 43 เซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขแตกตัวขณะป้อนสนามไฟฟ้า 0.03 kV/mm
 (ก) เซลล์ก่อนป้อนสนามไฟฟ้า และ (ข) เซลล์ขณะเริ่มป้อนสนามไฟฟ้า 0.03 kV/mm.

4.3 ค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาคและเซลล์

จากผลการทดลองขนส่งอนุภาคและเซลล์ในช่องทางไหลจุลภาคด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม. ผู้วิจัยพบว่า อนุภาคและเซลล์จะเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กโทรออสโมซิสและอิเล็กโทรโฟเรซิส. ในการคำนวณค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาคและเซลล์จะใช้ค่าระยะทางและเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคหรือเซลล์ในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าเท่านั้นเท่านั้น ซึ่งสมการที่ใช้คำนวณค่าประจุไฟฟ้าจะอ้างอิงจากบทที่ 2 หัวข้อ 2.3. กรณีของอนุภาคและเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขจะใช้ระยะทางการเคลื่อนที่ในช่วง s_2 และเวลาการเคลื่อนที่ในช่วง $t_1 - t_2$ ดังแสดงในรูปที่ 44 (ก). กรณีของเซลล์เม็ดเลือดแดงจะใช้ระยะการเคลื่อนที่ s และเวลาการเคลื่อนที่ $t_0 - t_1$ ดังแสดงในรูปที่ 44 (ข). ทั้งนี้ระยะทางและเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์ที่ได้จากการทดลองแสดงในภาคผนวก ฉ.

ขั้นแรกผู้วิจัยคำนวณความเร็วของอนุภาคหรือเซลล์ U จาก

$$U = s/t$$

โดยที่ s คือ ระยะทาง และ t คือ เวลาที่พิจารณา. ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ย E ที่ใช้ในการทดลองคำนวณได้จากอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยต่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งเท่ากับ 1 cm สำหรับการทดลองขนส่งอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงและ 3 cm สำหรับการทดลองขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข.

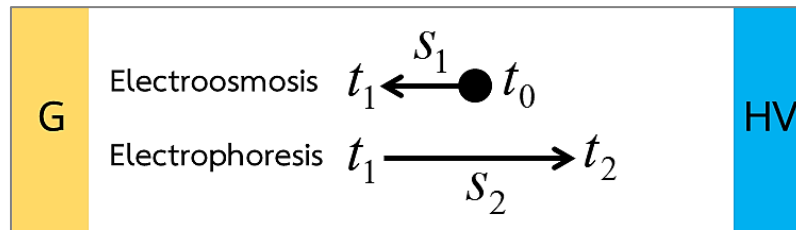
$$E = V/d$$

ค่าประจุไฟฟ้า Q ของอนุภาคและเซลล์สามารถคำนวณได้จาก

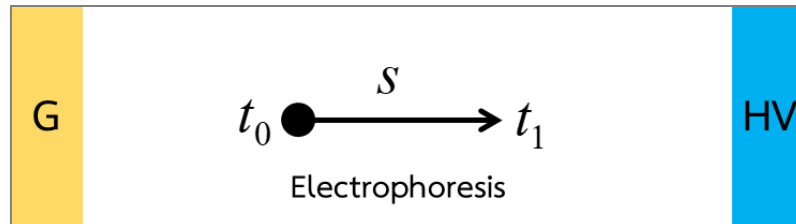
$$Q = \frac{6\pi\eta aU}{E}$$

โดยที่ η คือ ความหนืดของสารแขวนลอย ซึ่งมีค่า 1 และ 1.13 mPa·s ในกรณีของอนุภาคและเซลล์ตามลำดับ. a คือ รัศมีของอนุภาคหรือเซลล์ ซึ่งมีค่า 5, 3.375 และ 5.6 μm สำหรับอนุภาค, เซลล์เม็ดเลือดแดงและเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข ตามลำดับ.

ตารางที่ 6 แสดงผลการคำนวณค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาคและเซลล์. ผู้วิจัยพบว่า ผลการคำนวณที่สนามไฟฟ้าแตกต่างกัน ค่าประจุไฟฟ้าจะมีค่าแตกต่างกัน. ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณอาจเกิดจากการนำค่าเฉลี่ยของระยะทางและเวลาการเคลื่อนที่เฉลี่ยมาคำนวณ. ผลการคำนวณได้ว่า ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยของอนุภาค, เซลล์เม็ดเลือดแดงและเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขมีค่าประมาณ 0.99 fC, 1.09 fC และ 0.48 fC ตามลำดับ.



(ก)



(ข)

รูปที่ 44 ระยะทางและเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคหรือเซลล์

ด้วยอิเล็กโทรออสโมซิสและอิเล็กโทรโฟเรซิส

(ก) อนุภาคและเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข และ (ข) เซลล์เม็ดเลือดแดง.

ตารางที่ 6 ค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาคและเซลล์

สนามไฟฟ้า (kV/mm)	ค่าประจุไฟฟ้า (fC)		
	อนุภาค	เซลล์เม็ดเลือดแดง	เซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข
0.005	-	-	0.42
0.010	0.74	0.78	0.46
0.015	-	-	0.51
0.020	1.01	1.23	0.51
0.025	-	-	0.51
0.030	1.10	1.20	-
0.040	1.09	1.16	-
ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ย	0.99	1.09	0.48

บทที่ 5

สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการขับเคลื่อนของเหลวและอนุภาคหรือเซลล์ในช่องทางไหลจุลภาคด้วยอิเล็กโทรออสโมซิสและอิเล็กโทรโฟเรซิส. การทดลองขับเคลื่อนของเหลวมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาทิศทางการไหลของของเหลวเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า. การทดลองขนส่งอนุภาคหรือเซลล์มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระยะและทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคหรือเซลล์เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า.

การทดลองขับเคลื่อนของเหลวในช่องทางไหลจุลภาคกระทำภายใต้สนามไฟฟ้า 0.025 kV/mm. ผู้วิจัยสังเกตการไหลของของเหลวจากสารละลายเรืองแสงด้วยการส่องฟลูออเรสเซนซ์. จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ของเหลวในช่องทางไหลจุลภาคจะไหลด้วยแรงทางไฟฟ้าจากปรากฏการณ์อิเล็กโทรออสโมซิสในทิศทางของสนามไฟฟ้า.

การทดลองขนส่งอนุภาคในช่องทางไหลจุลภาคกระทำภายใต้สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.006-0.04 kV/mm. อนุภาคถูกแขวนลอยในสารละลายสภาพนำไฟฟ้า 1, 5 และ 25 mS/m. จากผลการทดลองด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ครึ่งคาบพบว่า อนุภาคเคลื่อนที่ได้ระยะทางประมาณ 50-400 μm , 50-440 μm และ 50-240 μm สำหรับสารแขวนลอยสภาพนำไฟฟ้า 1, 5 และ 25 mS/m ตามลำดับ. การทดลองด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยมพบว่า อนุภาคเคลื่อนที่ได้ระยะทางประมาณ 250-1330 μm , 210-1200 μm และ 260-1440 μm สำหรับสารแขวนลอยสภาพนำไฟฟ้า 1, 5 และ 25 mS/m ตามลำดับ. ระยะทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแปรผันตามสนามไฟฟ้าอย่างเป็นเชิงเส้น. กรณิแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ ความชันเส้นกราฟสนามไฟฟ้ากับระยะการเคลื่อนที่ ของสารแขวนลอยสภาพนำไฟฟ้า 1 และ 5 mS/m มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมากกว่ากรณีสภาพนำไฟฟ้า 25 mS/m. กรณีแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม ความชันเส้นกราฟสนามไฟฟ้ากับระยะการเคลื่อนที่ มีค่าใกล้เคียงกันทุกสภาพนำไฟฟ้า. เมื่ออนุภาคอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า อนุภาคจะเริ่มเคลื่อนที่ด้วยปรากฏการณ์อิเล็กโทรออสโมซิส จากนั้นเมื่อปรากฏการณ์อิเล็กโทรโฟเรซิสเด่นกว่า ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กโทรโฟเรซิส อนุภาคจึงกลับทิศทางการเคลื่อนที่. ค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาคมีค่าประมาณ 0.99 fC.

การทดลองขนส่งเซลล์ใช้เซลล์ตัวอย่าง 2 ชนิด คือ เซลล์เม็ดเลือดแดงและเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข. ผลการทดลองขับเคลื่อนเซลล์เม็ดเลือดแดงด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.01-0.04 kV/mm. ผู้วิจัยพบว่า เซลล์เม็ดเลือดแดงจะเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กโทรโฟเรซิสเท่านั้น และเคลื่อนที่ได้ระยะทางประมาณ 100-1000 μm . ผลการทดลองขับเคลื่อนเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข

ด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.005-0.025 kV/mm. ผู้วิจัยพบว่า เซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขจะเริ่มเคลื่อนที่ด้วยปรากฏการณ์อิเล็กโทรออสโมซิส จากนั้นเมื่อปรากฏการณ์อิเล็กโทรโฟเรซิสเด่นกว่า จะทำให้เซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กโทรโฟเรซิส เซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขจึงกลับทิศทางการเคลื่อนที่และเคลื่อนที่ได้ระยะทางประมาณ 40-500 μm . ค่าประจุไฟฟ้าของเซลล์เม็ดเลือดแดงและเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขมีค่าประมาณ 1.09 fC และ 0.48 fC ตามลำดับ.

ผลการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้แสดงให้เห็นว่าสามารถขับเคลื่อนของเหลวและอนุภาคหรือเซลล์ในช่องทางไหลจุลภาคด้วยอิเล็กโทรออสโมซิสและอิเล็กโทรโฟเรซิสได้ โดยที่ไม่ทำให้เซลล์เกิดความเสียหาย. จากผลการทดลองสามารถนำไปพัฒนาเพื่อขนส่งเซลล์ชนิดอื่น ๆ ที่สนใจ สำหรับงานวิจัยทางด้านแล็บบนชิปเพื่อวิเคราะห์ผลทางด้านชีวเวชหรือทางการแพทย์ได้ต่อไป.



บรรณานุกรม

1. Wang, X., et al., Electroosmotic Pumps and Their Applications in Microfluidic Systems. *Microfluid Nanofluidics*, 2009. **6**(2): p. 145.
2. Green, H.M.a.N.G., AC Electrokinetics: Colloids and Nanoparticles. Research Studies Pr Ltd; 1st edition, 2002. **6**: p. 81-163.
3. Islam, N. and D. Askari, Performance Improvement of an AC Electroosmotic Micropump by Hydrophobic Surface Modification. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2012. **14**(3-4): p. 627-635.
4. Yoshida, K., et al., A Study on an AC Electroosmotic Micropump Using a Square Pole – Slit Electrode Array. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017. **265**: p. 152-160.
5. Garcia-Sanchez, P., et al., Experiments on AC Electrokinetic Pumping of Liquids Using Arrays of Microelectrodes. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2006. **13**(3): p. 670-677.
6. Darabi, J., et al., Design, Fabrication, and Testing of an Electrohydrodynamic Ion- Drag Micropump. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002. **11**(6): p. 684-690.
7. Jeong, S.-i. and J. Seyed-Yagoobi, Experimental Study of Electrohydrodynamic Pumping Through Conduction Phenomenon. *Journal of Electrostatics*, 2002. **56**(2): p. 123-133.
8. Jeong, S.I. and J. Seyed-Yagoobi, Innovative Electrode Designs for Electrohydrodynamic Conduction Pumping. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004. **40**(3): p. 900-904.
9. Jeong, S., et al., Microfluidic Mixing Using Periodically Induced Secondary Potential in Electroosmotic Flow. *Journal of Electrostatics*, 2011. **69**(5): p. 429-434.
10. Sze, A., et al., Zeta-Potential Measurement Using the Smoluchowski Equation and The Slope of The Current–Time Relationship in Electroosmotic Flow. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003. **261**(2): p. 402-410.

11. Bhattacharjee, J.H.M.a.S., Electrokinetic and Colloid Transport Phenomena. John Wiley & Sons, Inc., 2005. 9: p. 295-426.

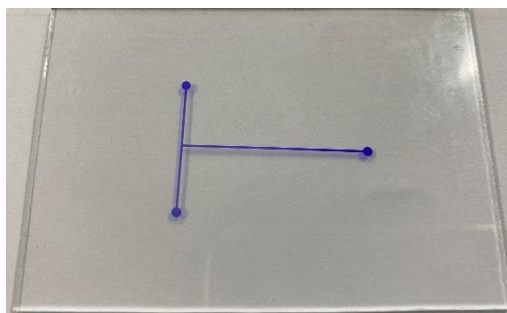


ภาคผนวก ก

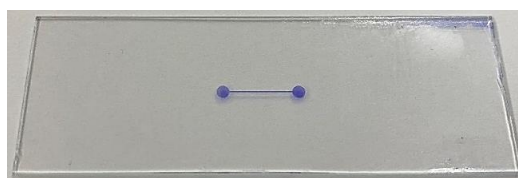
การสร้างระบบของไหลจุลภาค

การสร้างระบบของไหลจุลภาคใช้กระบวนการซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี. แม่พิมพ์ของช่องทางไหลจุลภาคสร้างขึ้นจากฟิล์มไวแสงแบบลบ. ช่องทางไหลจุลภาคหล่อขึ้นรูปด้วย PDMS. จากนั้น PDMS ถูกนำไปยึดติดบนกระจกสไลด์ด้วยโครนาดีสซาร์จเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติด. อิเล็กโทรดของระบบของไหลจุลภาคถูกติดตั้งบริเวณทางเข้าและทางออกของช่องทางไหลจุลภาค. ขั้นตอนการสร้างระบบของไหลจุลภาคมีรายละเอียดดังนี้.

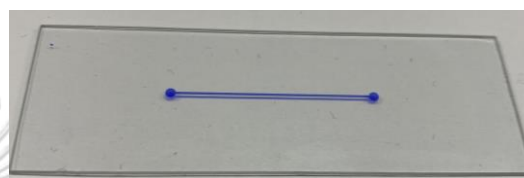
- ทำความสะอาดกระจกสไลด์ (กระจกสไลด์กว้าง 25.4 mm ยาว 76.2 mm และกว้าง 52 mm ยาว 76 mm) ด้วยไอโซโพรพานอลแอลกอฮอล์ในเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที.
- นำกระจกสไลด์มาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI water) แล้วเป่าให้แห้ง. วางกระจกสไลด์บนแผ่นความร้อน 100 °C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อไล่ความชื้นออกให้หมด.
- ติดฟิล์มไวแสงแบบลบความหนา 75 µm (การขับเคลื่อนของเหลวใช้ความหนา 15 µm) ลงบนกระจกสไลด์ด้วยเครื่องรีดลูกกลิ้งความร้อนที่อุณหภูมิ 110 °C. จากนั้น นำกระจกสไลด์ที่ติดฟิล์มไวแสงแบบลบไปวางบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที.
- นำกระจกสไลด์ที่ติดฟิล์มไวแสงแบบลบไปฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านแผ่นกระจกต้นแบบ (Photomask) ที่มีรูปร่างของช่องทางไหลจุลภาคเป็นเวลา 8 วินาที. จากนั้น นำกระจกสไลด์ดังกล่าวไปอบบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที.
- ผสม Developer โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) กับน้ำปราศจากไอออน โดยอัตราส่วนการผสมคือ โซเดียมคาร์บอเนต 1 g ต่อน้ำ DI 100 ml.
- นำกระจกสไลด์ที่ติดฟิล์มไวแสงแบบลบมาล้างด้วย Developer เพื่อให้ฟิล์มบริเวณที่ไม่โดนแสงอัลตราไวโอเล็ตหลุดออก. จากนั้น นำกระจกสไลด์ดังกล่าวไปอบบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ฟิล์มติดแน่นกับกระจกสไลด์. รูปที่ ก.1 แสดงแม่พิมพ์ของช่องทางไหลจุลภาคที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้.



(ก)



(ข)

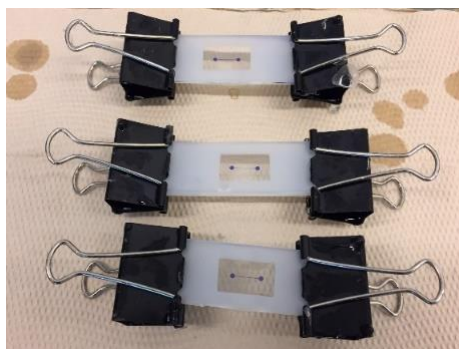


(ค)

รูปที่ ก.1 แม่พิมพ์ของช่องทางไหลจุลภาคที่ใช้ในการทดลอง

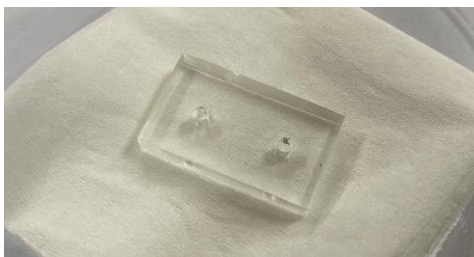
(ก) ขั้วเคลื่อนของเหลว, (ข) ขนส่งอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดง และ (ค) ขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข.

- เตรียม PDMS โดยผสม PDMS กับ CAT-RG ในอัตราส่วน 10:1. กวนสารให้รวมเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำไปใส่ฟองอากาศออกด้วยเครื่องสุญญากาศ.
- ใช้ยางซิลิโคนความหนา 3 mm เป็นแบบหล่อ PDMS โดยตัดยางซิลิโคนให้มีขนาดเท่ากับกระจกสไลด์และตัดบริเวณที่ซ้อนทับกับแม่พิมพ์ออก. ทำความสะอาดยางซิลิโคนด้วยไอโซโพรพานอลแอลกอฮอล์และน้ำปราศจากไอออน แล้วเป่าให้แห้ง. วางซิลิโคนบนกระจกสไลด์แล้วเท PDMS ลงบนแม่พิมพ์ แล้วปิดทับด้านบนด้วยกระจกสไลด์ที่เคลือบสารกันติด แล้วคีบด้วยคลิปหนีบกระดาษ ดังแสดงในรูปที่ ก.2. นำชิ้นงานเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C อยู่น้อย 4 ชั่วโมง.



รูปที่ ก.2 การหล่อชิ้นรูป PDMS.

- นำชิ้นงานออกจากตู้อบและตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้มีขนาดใหญ่กว่าช่องทางไหลจุลภาคเล็กน้อย. เจาะรูขนาด 1.5 mm เพื่อเป็นช่องทางเข้าและช่องทางออกของระบบของไหลจุลภาค. จากนั้น ใช้เครื่องอัลตราโซนิกล้าง PDMS ด้วยโทลูอีน 10 นาที แล้วล้างด้วยไอโซโพรพานอลแอลกอฮอล์อีก 10 นาที. ตัวอย่างช่องทางไหลจุลภาคที่สร้างด้วย PDMS แสดงดังรูปที่ ก.3.



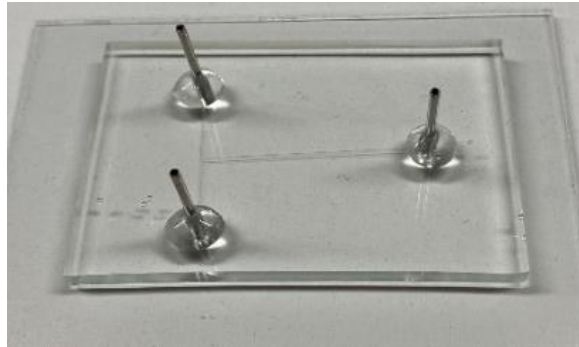
รูปที่ ก.3 ช่องทางไหลจากการหล่อ PDMS.

- นำ PDMS ที่ทำความสะอาดแล้วไปอบบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 85 °C อย่างน้อย 2 ชั่วโมง เพื่อให้ไอโซโพรพานอลแอลกอฮอล์ออกจนหมด.
- นำกระจกสไลด์ที่ทำความสะอาดแล้วและ PDMS ที่มีช่องทางไหลจุลภาค มาปรับสภาพพื้นผิวด้วยโครนาติสซาร์จให้ทั่วพื้นผิวด้านที่เป็นช่องทางไหลเป็นเวลา 2 นาที จำนวน 2 รอบ. จากนั้น ประกอบ PDMS กับกระจกสไลด์เข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้ช่องทางไหลจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ ก.4.

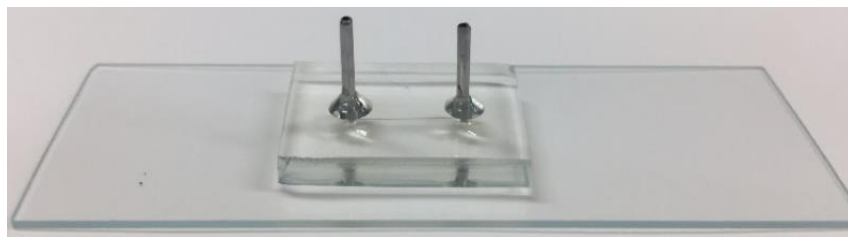


รูปที่ ก.4 ประกอบ PDMS กับกระจกสไลด์.

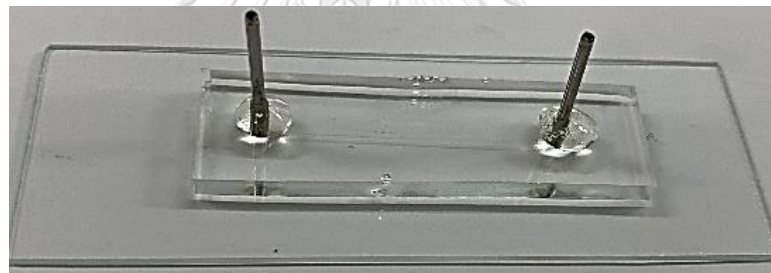
- นำช่องทางไหลจุลภาคที่ได้ไปอบบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 20 นาที เพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติดของ PDMS กับกระจกสไลด์.
- ติดตั้งอิเล็กโทรดแพลทินัมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm ยาว 5 cm และอิเล็กโทรดสเตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 mm ยาว 1 cm ที่บริเวณทางเข้าและทางออกของช่องทางไหลจุลภาค โดยใช้กาวเชื่อมติดระหว่างอิเล็กโทรดสเตนเลสและ PDMS. รูปที่ ก.5 แสดงระบบของไหลจุลภาค.



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ ก.5 ระบบของไหลจุลภาค

(ก) ขั้วเคลื่อนของเหลว, (ข) ขนส่งอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดง
และ (ค) ขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข.

ภาคผนวก ข การขับเคลื่อนของเหลว

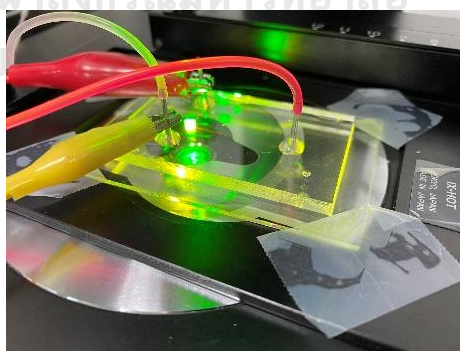
ขั้นตอนการทดลองขับเคลื่อนของเหลว มีรายละเอียดดังนี้

- ผสมสารเรืองแสง (Rhodamine B) 0.0476 g กับน้ำ DI 1000 μl จะได้สารละลายเรืองแสงความเข้มข้น 0.1 mM. รูปที่ ข.1 แสดงสารละลายเรืองแสงที่ใช้ในการทดลอง.



รูปที่ ข.1 สารละลายเรืองแสง.

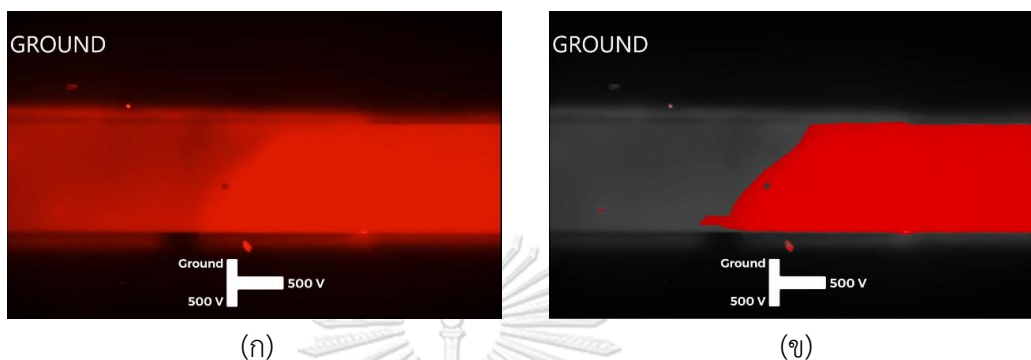
- ฉีดสารละลายเรืองแสงและน้ำ DI เข้าสู่ช่องทางไหลจุลภาคพร้อมกันด้วยปั๊มกระบอกฉีดยา อัตราการไหล 10 $\mu\text{l}/\text{min}$ ดังแสดงในรูปที่ ข.2. เมื่อสารละลายทั้งสองเข้าสู่ช่องทางไหลจุลภาค ปิดปั๊มกระบอกฉีดยาทั้งหมด. จากนั้น ปล่อยให้สารละลายทั้งสองไหลผสมรวมกันจนอยู่ในสภาวะคงตัว.



รูปที่ ข.2 ฉีดสารละลายเรืองแสงและน้ำ DI เข้าสู่ช่องทางไหลจุลภาคด้วยปั๊มกระบอกฉีดยา.

- แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (AU-20R110, Matsusada) ถูกเชื่อมต่อกับอิเล็กทรอนิกส์ของระบบของไหลจุลภาค จากนั้นเริ่มป้อนแรงดันไฟฟ้า 500 V (สนามไฟฟ้า 0.025 kV/mm).

- สังเกตและบันทึกการไหลของสารละลายจากการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (IXplore Standard, Olympus) โดยใช้กำลังขยาย 10 เท่า.
- ปรับสีของวิดีโอด้วยโปรแกรม Adobe Premiere Pro เพื่อให้สังเกตการไหลของสารเรืองแสงง่ายขึ้น ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ข.3.



รูปที่ ข.3 สีของสารเรืองแสงกับน้ำ DI

(ก) ภาพจากวิดีโอการทดลอง และ (ข) ภาพจากวิดีโอที่ปรับด้วยโปรแกรม Adobe Premiere Pro.

ภาคผนวก ค

การขนส่งอนุภาคและเซลล์

1. การเตรียมอนุภาคและเซลล์

1.1. การเตรียมอนุภาค

การทดลองใช้อนุภาคพอลิस्टาไทรินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 μm อยู่ในสารแขวนลอยที่มีสภาพนำไฟฟ้าแตกต่างกัน 5 ค่า ได้แก่ 1, 5, 25, 75 และ 125 mS/m. ปรับสภาพนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยด้วยสารละลาย PBS ที่มีสภาพนำไฟฟ้า 1180 mS/m. อัตราส่วนการผสมสารละลาย PBS กับน้ำปราศจากไอออน เพื่อให้ได้สารแขวนลอยที่มีสภาพนำไฟฟ้าแตกต่างกันแสดงดังตารางที่ ค.1. จากนั้น ผสมอนุภาคกับสารแขวนลอยในอัตราส่วนอนุภาค: สารแขวนลอย คือ 1: 100.

ตารางที่ ค.1 ปรับสภาพนำไฟฟ้าของสารแขวนลอย

สภาพนำไฟฟ้าของสารแขวนลอย (mS/m)	สารละลาย PBS ในน้ำ DI 1000 μl (μl)
1	-
5	1.85
25	9
75	41
125	73

1.2. การเตรียมเซลล์

การทดลองใช้เซลล์ตัวอย่าง 2 ชนิด ได้แก่ เซลล์เม็ดเลือดแดงซึ่งมีขนาดประมาณ 6-8 μm และเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขซึ่งมีขนาดประมาณ 15 μm . ผู้วิจัยใช้เซลล์เม็ดเลือดแดง เนื่องจากเป็นเซลล์ตัวอย่างที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ทางชีวเวช. สำหรับเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขมีข้อได้เปรียบมากกว่าเซลล์เม็ดเลือดแดงตรงที่มีทรงกลมมากกว่า ทำให้สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของเซลล์ได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น. รายละเอียดการเตรียมเซลล์มีดังนี้

1.2.1 เซลล์เม็ดเลือดแดง

- ผสมเดกซ์โทรส (Dextrose) 4 g กับน้ำ DI 100 ml แล้วกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนสาร เพื่อให้ได้สารละลายความเข้มข้น 0.26 M ซึ่งเป็นสารละลายไอโซโทนิกโดยประมาณสำหรับเซลล์เม็ดเลือดแดง.

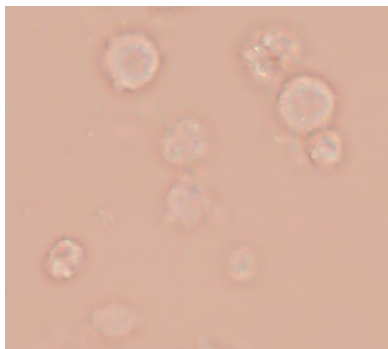
- นำตัวอย่างเลือดที่ได้จากอาสาสมัคร 1000 μl ปั่นด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็ว 1500 rpm เป็นเวลา 5 min เพื่อให้เซลล์เม็ดเลือดแดงเกิดการแยกชั้น.
- หลังจากการหมุนเหวี่ยง ใช้ปิเปตต์ดูดเฉพาะเซลล์เม็ดเลือดแดงส่วนล่างที่ตกตะกอน 10 μl ผสมกับสารละลาย 1000 μl แล้วใช้ปิเปตต์กวนสารแขวนลอย.
- นำเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ผสมกับสารละลายปั่นด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็ว 1500 rpm เป็นเวลา 5 min เพื่อให้เซลล์เม็ดเลือดแดงเกิดการแยกชั้น.
- หลังจากการหมุนเหวี่ยง ใช้ปิเปตต์ดูดเฉพาะเซลล์เม็ดเลือดแดงส่วนล่างที่ตกตะกอน 2 μl ผสมกับสารละลาย 1000 μl แล้วใช้ปิเปตต์กวนสารละลาย. ความเข้มข้นของเซลล์เม็ดเลือดแดงเท่ากับ 2000 cell/ μl . วัดสภาพนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยเซลล์เม็ดเลือดแดงได้ 1 mS/m. รูปที่ ค.1 (ก) แสดงเซลล์เม็ดเลือดแดงหลังจากผสมกับสารละลายเดกซ์โทรส โดยส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 60 เท่า.



รูปที่ ค.1 เซลล์เม็ดเลือดแดง ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 60 เท่า.

1.2.2 เซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข

- ผสมเดกซ์โทรส (Dextrose) 5.36 g กับน้ำ DI 100 ml แล้วกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนสารเพื่อให้ได้สารละลายความเข้มข้น 0.3 M ซึ่งเป็นสารละลายไอโซโทนิกโดยประมาณสำหรับเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข.
- นำตัวอย่างเลือด 1000 μl ปั่นด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็ว 1500 rpm เป็นเวลา 5 min เพื่อให้เซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขเกิดการแยกชั้น.
- หลังจากการหมุนเหวี่ยง ใช้ปิเปตต์ดูดเฉพาะเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขส่วนล่างที่ตกตะกอน 20 μl ผสมกับสารละลาย 1000 μl แล้วใช้ปิเปตต์กวนสารละลาย. วัดสภาพนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขได้ 12.2 mS/m. รูปที่ ค.2 (ข) แสดงเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขหลังจากผสมกับสารละลายเดกซ์โทรส โดยส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 60 เท่า.



รูปที่ ค.2 เซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 60 เท่า.

2. การทดลองขนส่งอนุภาคและเซลล์

ขั้นตอนการทดลองขนส่งอนุภาคและเซลล์ทำในลักษณะเดียวกัน แตกต่างกันเพียงขนาดของสนามไฟฟ้าที่ป้อน. ขั้นตอนการทดลองมีรายละเอียดดังนี้.

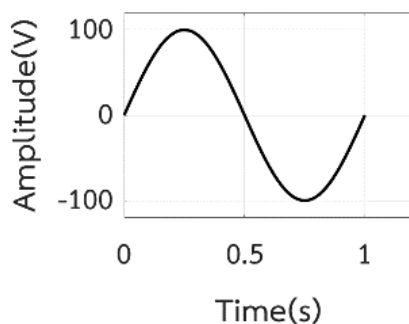
- ทำความสะอาดช่องทางไหลด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ปั๊มกระบอกฉีดยาอัตราการไหล 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ ป้อนทิ้งไว้ 30 min.
- เมื่อทำความสะอาดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ครบ 30 min ล้างช่องทางไหลด้วยน้ำ DI. ผสม Bovine Serum Albumin (BSA) กับน้ำ DI ในอัตราส่วน BSA: DI คือ 2: 100. จากนั้น ป้อน BSA ให้เต็มช่องทางไหล แล้วทิ้งไว้ 60 min. หลังจากครบ 60 min ป้อนน้ำ DI เข้าไปในช่องทางไหล เพื่อไล่ BSA ออกจนหมด แล้วทิ้งไว้ 20 min.
- ป้อนอนุภาคและเซลล์ที่เตรียมไว้ในข้อ 2.1 เข้าสู่ช่องทางไหลจุลภาคด้วยปั๊มกระบอกฉีดยา. อนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงใช้อัตราการไหล 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ ในส่วนของเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขใช้อัตราการไหล 2 $\mu\text{L}/\text{min}$ เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดอากาศในช่องทางไหล. เมื่ออนุภาคและเซลล์เข้าสู่ช่องทางไหล ปลดปั๊มกระบอกฉีดยาออกจากวงจร.
- ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับระบบของไหลจุลภาค โดยต่อแรงดันไฟฟ้าสูงที่ช่องทางออกและต่อกราวด์ที่ช่องทางเข้า ดังแสดงในรูปที่ ค.3. แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์และพัลส์สี่เหลี่ยมถูกกำหนดรูปคลื่น, ขนาดและคาบเวลาด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ. สังเกตรูปคลื่นและขนาดแรงดันไฟฟ้าด้วยออสซิลอสโคป. รูปที่ ค.4 แสดงลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง.
 - การทดลองขนส่งอนุภาคใช้แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์และพัลส์สี่เหลี่ยม ทำการทดลองใน 2 รูปแบบคือ 1. กำหนดคาบเวลาคงที่ 1 sec ปรับแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 100-500 V

(สนามไฟฟ้า 0.006-0.04 kV/mm) 2.กำหนดแรงดันไฟฟ้าคงที่ 300 V ปรับคาบเวลา ระหว่าง 0.25-2 sec (สนามไฟฟ้า 0.03 kV/mm).

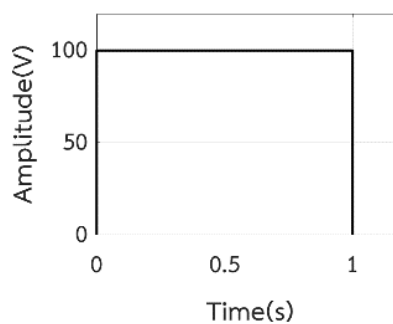
- การทดลองขนส่งเซลล์เม็ดเลือดแดงใช้แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม กำหนดคาบเวลาคงที่ 1 sec ปรับแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 100-400 V (สนามไฟฟ้า 0.01-0.04 kV/mm).
- การทดลองขนส่งเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขใช้แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม ทำการทดลองใน 2 รูปแบบคือ 1.กำหนดคาบเวลาคงที่ 1 sec ปรับแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 150-750 V (สนามไฟฟ้า 0.005-0.025 kV/mm) 2.กำหนดแรงดันไฟฟ้าคงที่ 300 V ปรับคาบเวลาระหว่าง 0.25-2 sec (สนามไฟฟ้า 0.01 kV/mm).
- สังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์เม็ดเลือดแดงด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Eclipse E200, Nikon) กำลังขยาย 4 เท่า และสังเกตการณ์เคลื่อนที่ของเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 10 เท่า. วัตถุประสงค์การเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยโปรแกรม Adobe Illustrator.



รูปที่ ค.3 การต่อวงจรไฟฟ้ากับระบบของไหลจุลภาค.



(ก)



(ข)

รูปที่ ค.3 ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

(ก) รูปคลื่นไซน์ และ (ข) รูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม.

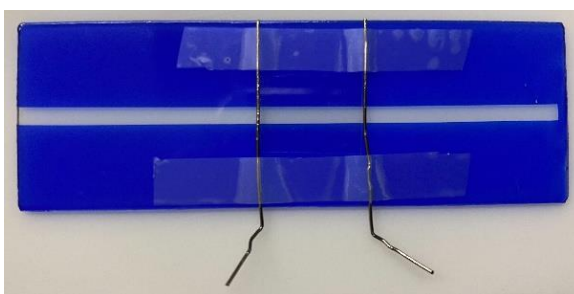
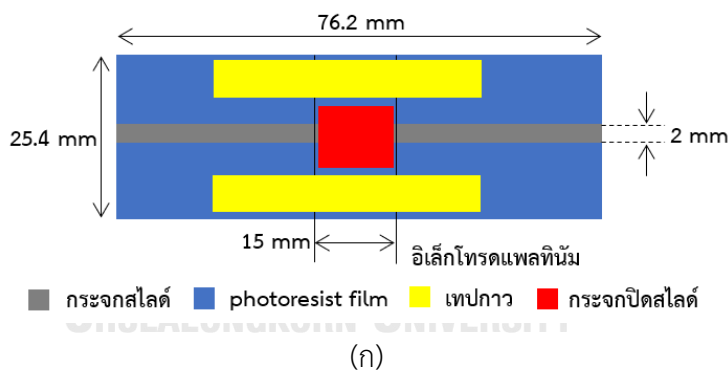
ภาคผนวก ง

การตรวจสอบการปรับสมดุลของของเหลว

จากการทดลองขนส่งอนุภาคและเซลล์ ผู้วิจัยพบว่า เวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์มีค่ามากกว่าเวลาที่บ่อนแรงดันไฟฟ้า. ผู้วิจัยคาดว่าอาจเป็นผลมาจากการปรับสมดุลของของเหลว. ผู้วิจัยจึงตรวจสอบโดยทำการทดลองขนส่งอนุภาคในช่องทางไหลจุลภาคแบบปลายเปิด เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการปรับสมดุลของของเหลวหลังจากตัดแรงดันไฟฟ้า. รายละเอียดและผลการทดลองมีดังนี้.

1. ขั้นตอนการทดลอง

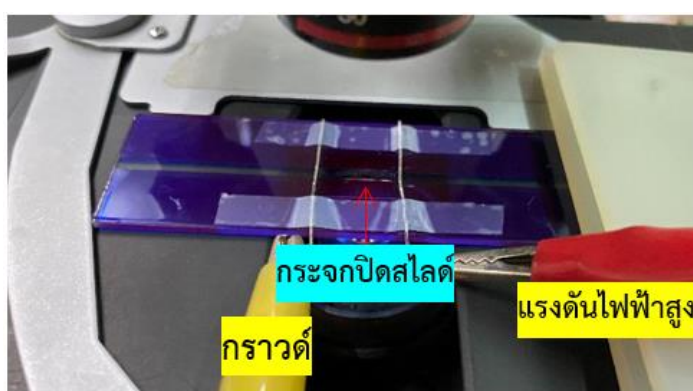
- สร้างช่องทางไหลจุลภาคโดยติดฟิล์มไวแสงแบบลบความหนา 75 μm ลงบนกระจกสไลด์ กว้าง 25.4 mm ยาว 76.2 mm. วิธีการทำ photoresist film เหมือนกับในภาคผนวก ก.
- ช่องทางไหลจุลภาคมีความกว้าง 2 mm. อิเล็กโทรดที่ใช้คือแพลทินัม มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 15 mm ดังแสดงในรูปที่ ง.1.



รูปที่ ง.1 ช่องทางไหลจุลภาคแบบเปิด

(ก) มิติ และ (ข) ภาพถ่ายจากการทดลอง.

- ผสมอนุภาคกับน้ำ DI อัตราส่วนอนุภาคต่อน้ำ DI เป็น 1:100. สภาพนำไฟฟ้าของสารแขวนลอย 1 mS/m. จากนั้น หยดสารแขวนลอยอนุภาคลงในช่องทางไหลจุลภาคด้วยปิเปตต์ปริมาตร 20 μ l แล้วปิดทับด้วยกระจกปิดสไลด์.
- ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับระบบของไหลจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ ๓.2. การทดลองใช้แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์และพัลส์สี่เหลี่ยม กำหนดแรงดันไฟฟ้าคงที่ 500 V ปรับคาบเวลาระหว่าง 0.25-2 sec (สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.021 และ 0.033 kV/mm สำหรับแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์และพัลส์สี่เหลี่ยม ตามลำดับ).



รูปที่ ๓.2 การต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับระบบของไหลจุลภาคแบบเปิด.

- สังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 4 เท่า. บันทึกวิดีโอการทดลองโดยตั้งค่าเฟรมเรทของวิดีโอ 25 frame/sec.

2. ผลการทดลอง

ตารางที่ ๓.1 แสดงผลการทดลองขนส่งอนุภาคด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ 2 รูปคลื่น ปรับคาบเวลาของแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 0.5-2 sec. ผู้วิจัยพบว่า เวลาการเคลื่อนที่เฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ 0.53, 1.01 และ 2.03 sec สำหรับคาบเวลาของแรงดันไฟฟ้า 0.5, 1 และ 2 sec ตามลำดับ. ตารางที่ ๓.2 แสดงผลการทดลองขนส่งอนุภาคด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม ปรับคาบเวลาของแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 0.25-1 sec. ผู้วิจัยพบว่า เวลาการเคลื่อนที่เฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ 0.28, 0.52 และ 1 sec สำหรับคาบเวลาของแรงดันไฟฟ้า 0.25, 0.5 และ 1 sec ตามลำดับ. เวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคกับเวลาที่ป้อนแรงดันไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกัน. ผู้วิจัยจึงสรุปได้ว่า เวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มากกว่าเวลาที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าของระบบของไหลจุลภาคที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ เป็นผลมาจากการปรับสมดุลของของเหลวหลังจากตัดแรงดันไฟฟ้า.

ตารางที่ ง.1 เวลาการเคลื่อนของอนุภาคด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์

คาบเวลา (s)	เวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาค (s)			เวลาเฉลี่ย (s)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0.5	0.56	0.52	0.52	0.53
1	1.04	1	1	1.01
2	2.08	2	2	2.03

ตารางที่ ง.2 เวลาการเคลื่อนของอนุภาคด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม

คาบเวลา (s)	เวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาค (s)			เวลาเฉลี่ย (s)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0.25	0.28	0.28	0.28	0.28
0.5	0.52	0.52	0.52	0.52
1	1	1	1	1

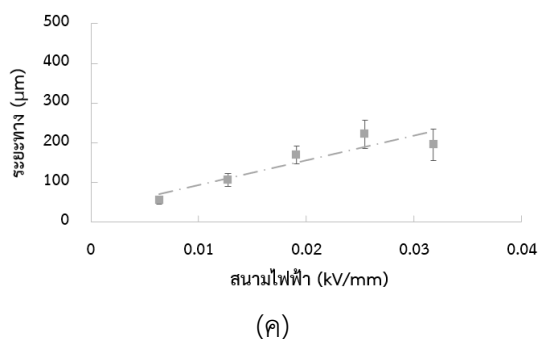
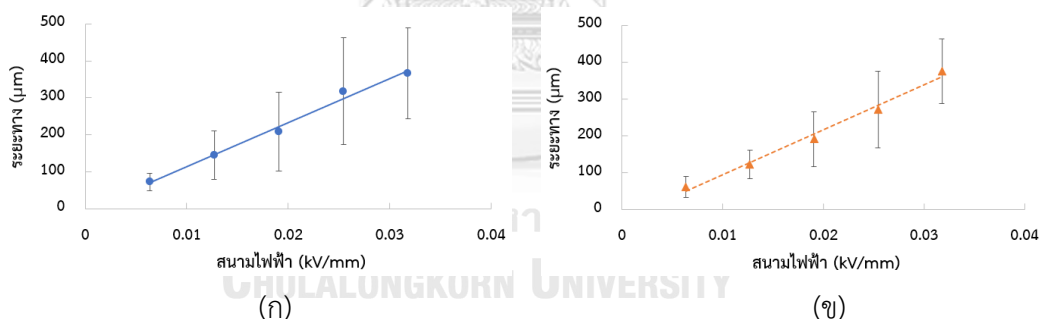
ภาคผนวก จ

ผลระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์

จากการทดลองขนส่งอนุภาคและเซลล์ในช่องทางไหลจุลภาค ผู้วิจัยแสดงระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคและเซลล์ดังตารางต่อไปนี้.

ตารางที่ จ.1 ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ครึ่งคาบ สนามไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่าง 0.006-0.032 kV/mm (แรงดันไฟฟ้า 100-500 V) คาบเวลา 1 sec.

สนามไฟฟ้า (kV/mm)	ระยะการเคลื่อนที่ (μm)			ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	1 mS/m	5 mS/m	25 mS/m	1 mS/m	5 mS/m	25 mS/m
0.006	73	62	55	23.701	28.802	9.296
0.013	145	123	106	66.078	37.874	15.921
0.019	209	192	169	106.929	74.086	22.307
0.025	318	272	222	144.682	103.690	35.434
0.032	367	375	195	123.389	87.703	40.019

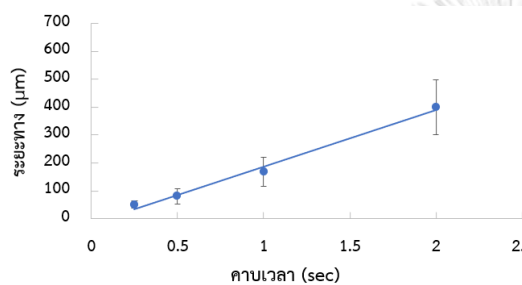


รูปที่ จ.1 ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ครึ่งคาบ สนามไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่าง 0.006-0.032 kV/mm (แรงดันไฟฟ้า 100-500 V) คาบเวลา 1 sec

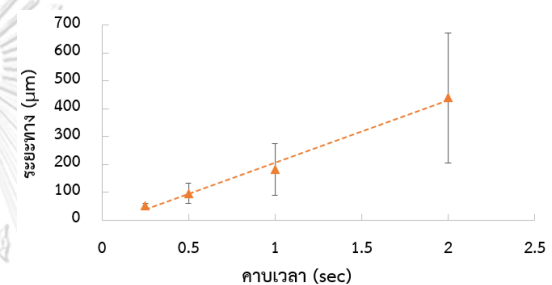
(ก) 1 mS/m, (ข) 5 mS/m และ (ค) 25 mS/m.

ตารางที่ จ.2 ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ครึ่งคาบ สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.019 kV/mm (แรงดันไฟฟ้า 300 V) คาบเวลาระหว่าง 0.25-2 sec.

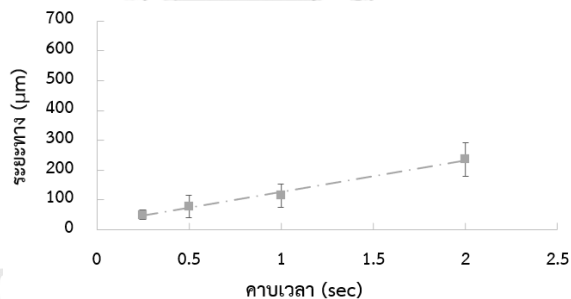
คาบเวลา (sec)	ระยะการเคลื่อนที่ (μm)			ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	1 mS/m	5 mS/m	25 mS/m	1 mS/m	5 mS/m	25 mS/m
0.25	51	51	50	13.336	10.290	15.769
0.5	80	97	79	28.725	35.048	38.459
1	167	183	115	51.821	92.526	39.505
2	400	438	236	98.691	231.788	57.428



(ก)



(ข)



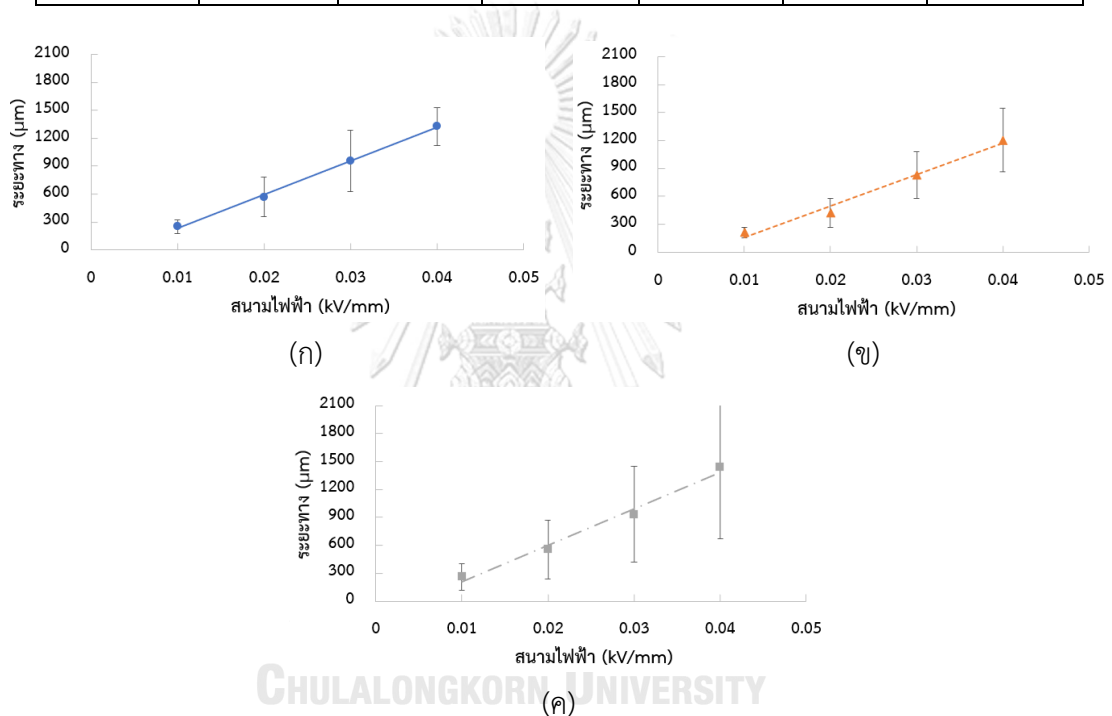
(ค)

รูปที่ จ.2 ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ครึ่งคาบ สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.019 kV/mm (แรงดันไฟฟ้า 300 V) คาบเวลาระหว่าง 0.25-2 sec

(ก) 1 mS/m, (ข) 5 mS/m และ (ค) 25 mS/m.

ตารางที่ จ.3 ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม สนามไฟฟ้าระหว่าง 0.01-0.04 kV/mm (แรงดันไฟฟ้า 100-400 V) คาบเวลา 1 sec.

สนามไฟฟ้า (kV/mm)	ระยะการเคลื่อนที่ (μm)			ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	1 mS/m	5 mS/m	25 mS/m	1 mS/m	5 mS/m	25 mS/m
0.01	252	215	263	75.395	57.027	142.090
0.02	569	424	555	213.669	157.870	318.286
0.03	958	827	935	326.320	249.315	511.214
0.04	1326	1203	1440	206.085	341.469	768.903

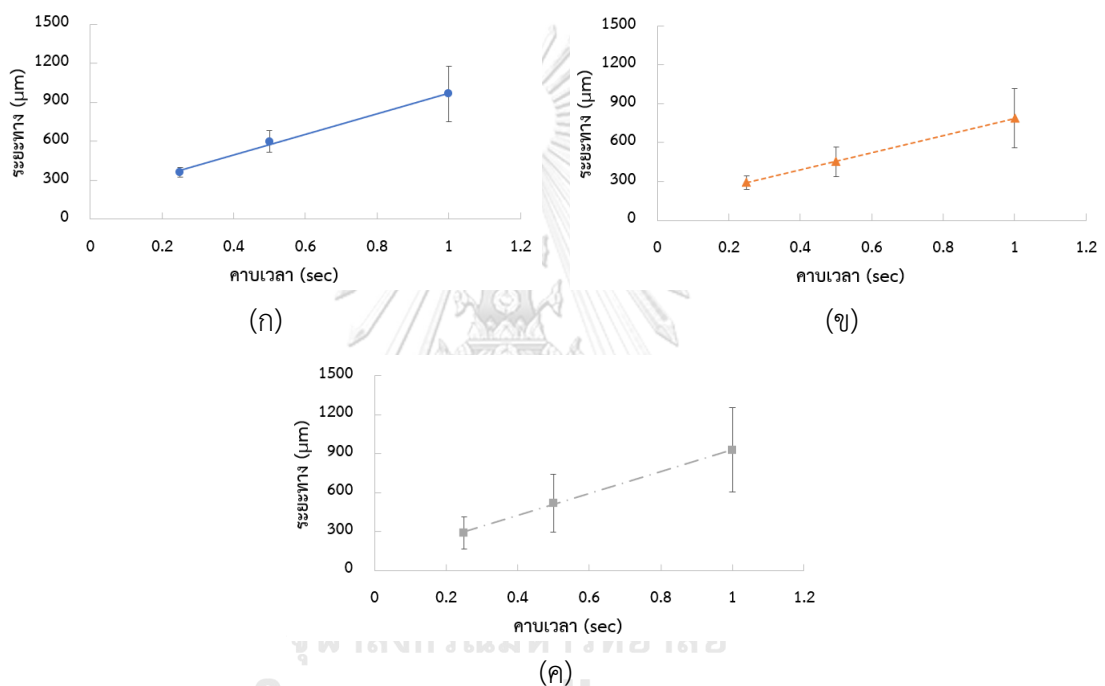


รูปที่ จ.3 ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม สนามไฟฟ้าระหว่าง 0.01-0.04 kV/mm (แรงดันไฟฟ้า 100-400 V) คาบเวลา 1 sec

(ก) 1 mS/m, (ข) 5 mS/m และ (ค) 25 mS/m.

ตารางที่ จ.4 ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม สนามไฟฟ้า 0.03 kV/mm (แรงดันไฟฟ้า 300 V) คาบเวลาระหว่าง 0.25-1 sec.

คาบเวลา (sec)	ระยะการเคลื่อนที่ (μm)			ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	1 mS/m	5 mS/m	25 mS/m	1 mS/m	5 mS/m	25 mS/m
0.25	360	291	289	36.818	54.661	124.495
0.5	598	453	518	84.301	114.606	224.143
1	964	789	928	212.457	231.538	325.057

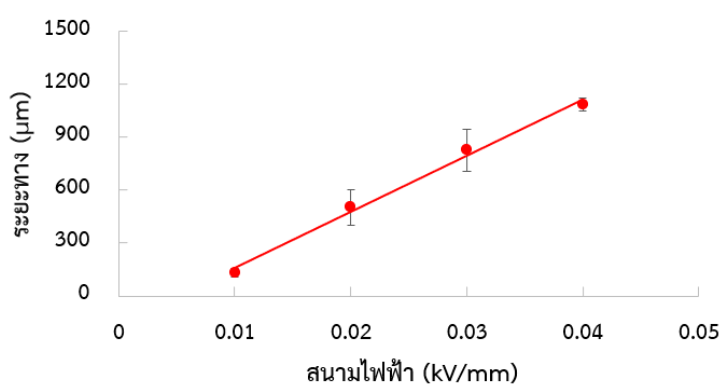


รูปที่ จ.4 ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม สนามไฟฟ้า 0.03 kV/mm (แรงดันไฟฟ้า 300 V) คาบเวลาระหว่าง 0.25-1 sec

(ก) 1 mS/m, (ข) 5 mS/m และ (ค) 25 mS/m.

ตารางที่ จ.5 ระยะการเคลื่อนที่ของเซลล์เม็ดเลือดแดงด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม สนามไฟฟ้าระหว่าง 0.01-0.04 kV/mm (แรงดันไฟฟ้า 100-400 V) คาบเวลา 1 sec.

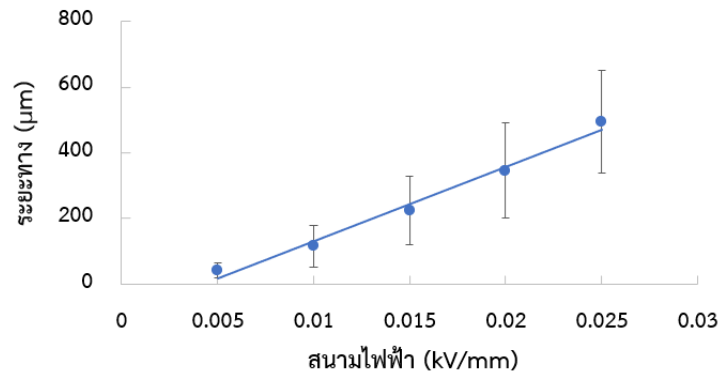
สนามไฟฟ้า (kV/mm)	ระยะทางเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.010	133	23.246
0.020	502	99.248
0.030	825	121.502
0.040	1084	38.069



รูปที่ จ.5 ระยะการเคลื่อนที่ของเซลล์เม็ดเลือดแดงด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม สนามไฟฟ้าระหว่าง 0.01-0.04 kV/mm (แรงดันไฟฟ้าระหว่าง 100-400 V) คาบเวลา 1 sec.

ตารางที่ จ.6 ระยะการเคลื่อนที่ของเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม สนามไฟฟ้าระหว่าง 0.005-0.025 kV/mm (แรงดันไฟฟ้า 150-750 V) คาบเวลา 1 sec.

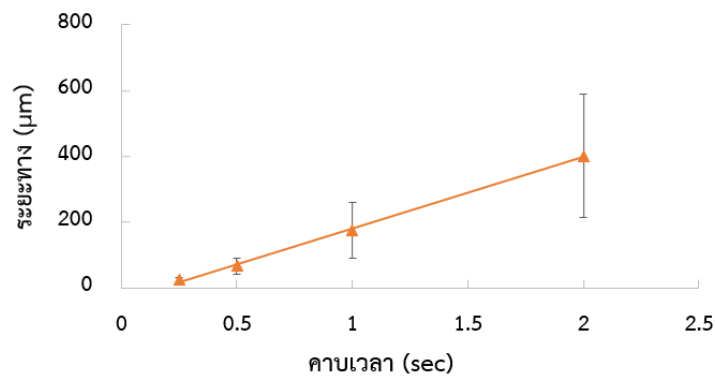
สนามไฟฟ้า (kV/mm)	ระยะทางเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.005	36	22.998
0.010	107.5	64.181
0.015	217.5	103.333
0.020	340.5	144.295
0.025	487.5	156.550



รูปที่ จ.6 ระยะการเคลื่อนที่ของเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม สนามไฟฟ้าระหว่าง 0.005-0.025 kV/mm (แรงดันไฟฟ้าระหว่าง 150-750 V) คาบเวลา 1 sec.

ตารางที่ จ.7 ระยะการเคลื่อนที่ของเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.01 kV/mm (แรงดันไฟฟ้า 300 V) คาบเวลาระหว่าง 0.25-2 sec.

สนามไฟฟ้า (kV/mm)	ระยะทางเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.25	24	8.433
0.5	66	25.473
1	175.5	84.507
2	400.5	187.549



รูปที่ จ.7 ระยะการเคลื่อนที่ของเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัขด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม สนามไฟฟ้าเฉลี่ย 0.01 kV/mm (แรงดันไฟฟ้า 300 V) คาบเวลาระหว่าง 0.25-2 sec.

ภาคผนวก ฉ

ผลการคำนวณค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาคและเซลล์

การคำนวณค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาคและเซลล์จะคำนวณจากระยะทางและเวลาที่อนุภาคหรือเซลล์เคลื่อนที่ด้วยอิเล็กโทรโพรเซซิส. ค่าที่ได้จากการทดลองและผลการคำนวณแสดงดังนี้.

ตารางที่ ฉ.1 ผลการคำนวณค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาคพอลิสไตรีน

แรงดันไฟฟ้า (V)	สนามไฟฟ้า (kV/mm)	ระยะทางเฉลี่ย (μm)	เวลาการเคลื่อนที่ (sec)	ค่าประจุไฟฟ้า (fC)
100	0.01	104	1.32	0.74
200	0.02	391	1.83	1.01
300	0.03	728	2.07	1.10
400	0.04	1030	2.23	1.09

ตารางที่ ฉ.2 ผลการคำนวณค่าประจุไฟฟ้าของเซลล์เม็ดเลือดแดง

แรงดันไฟฟ้า (V)	สนามไฟฟ้า (kV/mm)	ระยะทางเฉลี่ย (μm)	เวลาการเคลื่อนที่ (sec)	ค่าประจุไฟฟ้า (fC)
100	0.01	133	1.23	0.78
200	0.02	502	1.47	1.23
300	0.03	825	1.65	1.20
400	0.04	1084	1.69	1.16

ตารางที่ ฉ.3 ผลการคำนวณค่าประจุไฟฟ้าของเซลล์มะเร็งผิวหนังสุนัข

แรงดันไฟฟ้า (V)	สนามไฟฟ้า (kV/mm)	ระยะทางเฉลี่ย (μm)	เวลาการเคลื่อนที่ (sec)	ค่าประจุไฟฟ้า (fC)
150	0.005	36	2.02	0.42
300	0.01	107.5	2.77	0.46
450	0.015	217.5	3.40	0.51
600	0.02	340.5	4.00	0.51
750	0.025	487.5	4.50	0.51

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พิสิฐชัย ก้ามณี
วัน เดือน ปี เกิด	13 กรกฎาคม 2538
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลจันทบุรีเบกษา
วุฒิการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปี พ.ศ.2560
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 122/1 หมู่ที่ 9 ต.บางหลวง อ.บางเลน จ.นครปฐม รหัสไปรษณีย์ 73190
ผลงานตีพิมพ์	พิสิฐชัย ก้ามณี, บุญชัย เตชะอำนาจ, "การขนส่งอนุภาคและเซลล์ในช่องทาง ไหลจุลภาคด้วยปั๊มอิเล็กทรอนิกส์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 43 (EECON-43), pp.302- 305, 2020