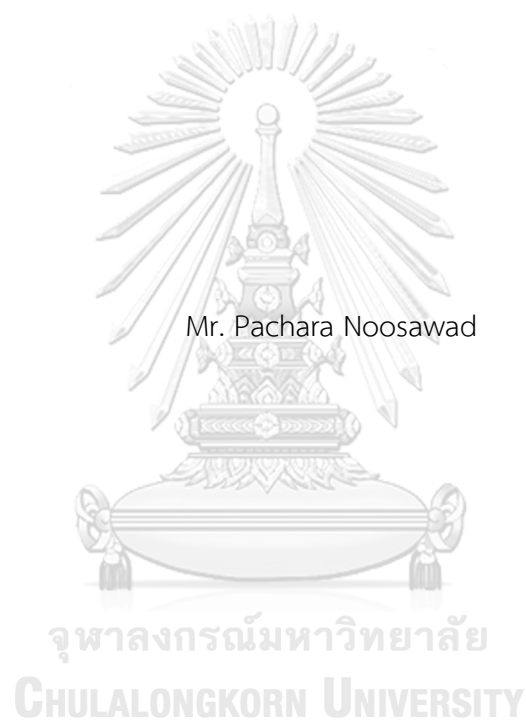


ระบบของไหลจุลภาคเพื่อดักจับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียด้วยแรงแม่เหล็กที่เหนียวนำโดย
โครงสร้างนิกเกิล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A microfluidic system for capturing malaria-infected red blood cells using magnetic force induced by an array of nickel structures



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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบของไหลจุลภาคเพื่อดักจับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อม
โดย	มาลาเรียด้วยแรงแม่เหล็กที่เหนียวนำโดยโครงสร้างนิกเกิล
สาขาวิชา	นายเพชร หนูสวัสดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	วิศวกรรมเครื่องกล
	รองศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีรัฐระวานิช)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิน)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สร้อย ศาลากิจ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.เวชพงศ์ ชูติชูเดช)	

พชร หนูสวัสดิ์ : ระบบของไหลจุลภาคเพื่อดักจับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียด้วยแรงแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำโดยโครงสร้างนิกเกิล. (A microfluidic system for capturing malaria-infected red blood cells using magnetic force induced by an array of nickel structures) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียโดยอาศัยแม่เหล็กถาวรพร้อมกับการใช้โครงสร้างเสาขนาดเล็กซึ่งเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก เพื่อเพิ่มเกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กโดยมีการศึกษาผลของรูปร่างโครงสร้างเสาขนาดเล็กต่อขนาดของแรงแมกนีโตเฟอร์ริติกและแรงดันการไหลที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีโครงสร้างวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมาขวางในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดเกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กขึ้นและขนาดของเกรเดียนต์จะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นกับรูปร่างของโครงสร้างเสาขนาดเล็ก โดยแรงแมกนีโตเฟอร์ริติกจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กสูงขึ้น ในการศึกษานี้ได้ศึกษารูปร่างเสาขนาดเล็กสามรูปร่างคือสี่เหลี่ยม รูปร่าง และรูปร่างดัดโค้งผ่านโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ COMSOL Multiphysics® เมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูปร่างของเสาทั้งสามแบบพบว่า เสาสี่เหลี่ยมจะทำให้เกิดแรงแมกนีโตเฟอร์ริติกให้กับอนุภาคไม่ติดกับโครงสร้างทางด้านหน้าแต่ในเสาและดัดโค้งจะมีแรงแมกนีโตเฟอร์ริติกที่ดึงดูดอนุภาคได้ ซึ่งจะเป็นข้อดีที่อาจจะทำให้เสาทั้งสองมีการดักจับอนุภาคได้ดีขึ้น หลังจากนั้นระบบของไหลจุลภาคที่มีโครงสร้างทั้งสามแบบได้ออกแบบและสร้างขึ้น โดยโครงสร้างเสาขนาดเล็กมีขนาด 200x200 ไมโครเมตร มีความสูง 30 ไมโครเมตร สำหรับโครงสร้างตัววีและดัดโค้งจะมีส่วนเว้าลึกเข้าไปในโครงสร้างประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวเสาและทำทดลองกับอนุภาคพาราแมกเนติกที่มีขนาด 5 และ 10 ไมโครเมตรและเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียเพื่อประเมินความสามารถของระบบ ในการทดลองได้ใช้อัตราการไหลที่ 0.04 มิลลิเมตรต่อนาที และเพิ่มอัตราการไหลขึ้นไปเป็น 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเสาและเสาตัววีมีความสามารถในการดักจับอนุภาคพาราแมกเนติกและเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียได้มากกว่ารูปร่างสี่เหลี่ยม ซึ่งอนุภาคพาราแมกเนติกและเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียจะเคลื่อนที่เข้าไปติดในบริเวณส่วนเว้าของรูปร่างวีและรูปร่างดัดโค้ง เนื่องจากในบริเวณส่วนเว้าของเสาและดัดโค้งมีขนาดแรงดันการไหลต่ำแต่มีแรงแมกนีโตเฟอร์ริติกที่สามารถดึงดูดอนุภาคได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970255421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD: Microfluidic system Malaria ferromagnetic Magnetophoresis

Pachara Noosawad : A microfluidic system for capturing malaria-infected red blood cells using magnetic force induced by an array of nickel structures. Advisor: Assoc. Prof. ALONGKORN PIMPIN, Ph.D.

This study aims to develop a technique of cell separation for malaria infected-red blood cells by using permanent magnet with adding nickel micro-structures. Nickel is a ferromagnetic material that could magnify a gradient of magnetic field. The effect of the shape of micro-structures is studied by examining the differences of magnetophoresis force and drag force. The magnitude of magnetic force becomes higher when the gradient of magnetic field is higher. In the case where the nickel structures obstruct the magnetic field, they would create the distortion of magnetic field and enhance the gradient depending on the shape of nickel structures. In this study, three micro-structures shapes, i.e. square shape, V-shape and W-shape were studied with COMSOL Multiphysics® software. The results showed that, the square structure has a relatively strong magnetophoresis force dragging particles away from the structure. In the meanwhile, the V-shape structure and W-shape structure can exert magnetophoresis force dragging particles towards them. In this way, it could increase the trapping capability for V-shape and W-shape structures. After that, experiments of three structures shape were conducted to examine the capability of the proposed system. The nickel consisted of the square structures of 200x200 micrometer with the height of 30 micrometer. For V-shape and W-shape structures, they have concave length about half of structure length. System was tested with paramagnetic beads and malaria infected red blood cells. The experiments were conducted at flow rate of 0.04 ml/min and then consecutively increase the flow rate to 0.4 and 0.8 ml/min. The results suggested that the V-shape structures and W-shape structures were capable to trap paramagnetic beads and infected red blood cells into concave area, due to the magnitude of the magnetophoresis force is higher than the drag force.

Field of Study: Mechanical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากการได้รับความช่วยเหลือทุกด้านจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พินดี มอบความรู้ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา ซึ่งทำให้เกิดขั้นตอนการวางแผนการทำงานวิจัยได้อย่างครบถ้วน เสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิระยุทธ ศรีธรรมาภิชา ผศ.ดร.สร้อย ศาลากิจ และ รศ.ดร.เวชพงศ์ ชูติชูเดช ที่สละเวลาเป็นคณะกรรมการและทุกท่านได้ให้คำแนะนำ คำชี้แจงที่เป็นประโยชน์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยจนส่งผลให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.มรกต แก้วธรรมสอน อาจารย์ประจำคณะสัตวแพทย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเหลือด้านการเตรียมตัวอย่างเลือด ทั้งนี้รวมถึง ศ.ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ฟินิตพิงศ์ ปานกลาง นิสิตปริญญาเอก คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเหลือด้านอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ รวมไปถึงคำแนะนำในการทดลองกับตัวอย่างเลือด

ขอขอบคุณรุ่นพี่ในห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องกลไฟฟ้าจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่คอยให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้ชีวิตภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย คอยให้กำลังใจ คอยให้คำแนะนำและเทคนิคเบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์การทดลองในห้องปฏิบัติการ รวมไปถึงคอยสร้างเสียงหัวเราะและความสนุกสนานอันเป็นบรรยากาศที่ดีต่อผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนโครงการพัฒนาวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศตวรรษที่ 2 ในหัวข้ออุปกรณ์การแพทย์ชาญฉลาด และ ทุนการศึกษาจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณบิดามารดาที่เลี้ยงดูตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา อีกทั้งยังคอยมอบความห่วงใย ความหวังดีและเป็นกำลังใจที่สำคัญต่อผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

พชร หนูสวัสดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ระเบียบขั้นตอนการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 บทนำก่อนเข้าเรื่อง	5
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม.....	6
2.1 การแยกเซลล์โดยไม้อาศัยแรงภายนอก	6
2.1.1 การคัดแยกเซลล์โดยอาศัยความยืดหยุ่นของเซลล์	6
2.2 การแยกเซลล์โดยอาศัยแรงภายนอก	8
2.2.1 แรงทางไฟฟ้า (Dielectrophoretic Force).....	9
2.2.2 แรงทางแม่เหล็ก (Magnetophoretic Force)	10
2.2.2.1 ระบบของไหลแบบจุลภาคเพื่อการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงโดยอาศัยเฉพาะแรงแม่เหล็ก	11
2.2.2.2 การคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียด้วยเทคนิคการเพิ่มวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติกเข้าไปเหนี่ยวนำโดยอาศัยแรงแม่เหล็ก	14

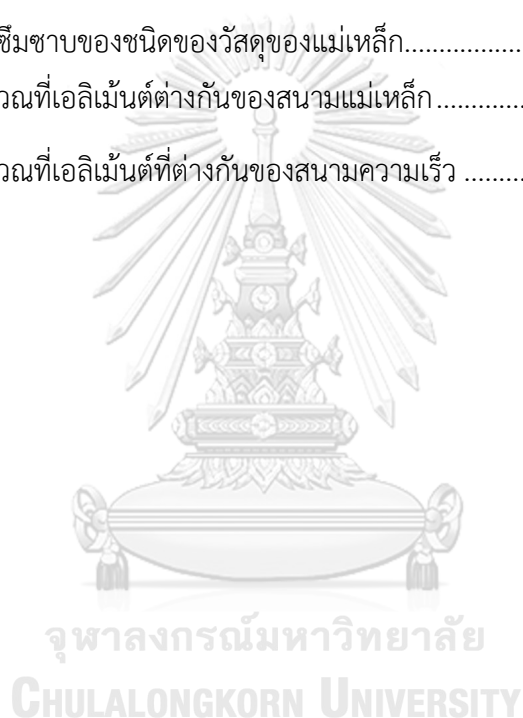
2.3 สรุป	23
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	26
3.1 แรงแมกนีโตเฟอริติก (Magnetophoresis Force).....	26
3.1.1 สนามแม่เหล็ก (Magnetic field)	27
3.1.2 ประเภทของแม่เหล็ก.....	28
3.2 แรงต้านการไหล (Drag Force).....	29
3.3 การกำหนดโครงสร้างการจำลองในคอมพิวเตอร์	30
3.4 การจำลองสนามแม่เหล็ก.....	32
3.5 การจำลองรูปแบบของสนามความเร็ว	36
3.6 การเก็บข้อมูลของสนามแม่เหล็กและสนามความเร็ว	39
3.7 สรุป	43
บทที่ 4 กระบวนการสร้างรูปร่างนิกเกิลและการออกแบบระบบของไหลจุลภาค	46
4.1 ขั้นตอนการสร้างระบบของไหลจุลภาค.....	47
4.2 การออกแบบลวดลายบนแผ่นหน้ากากพลาสติก.....	47
4.2.1 การเคลือบแผ่นฟิล์มฉายแสงบนแผ่นทองแดง.....	48
4.2.2 การฉายแสง	49
4.2.3 การล้างฟิล์มฉายแสง.....	50
4.3 กระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้า.....	50
4.3.1 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับเตรียมฟิล์มบางฉายแสงยูวี	50
4.3.2 ข้อจำกัดในการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้า.....	50
4.3.3 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้า	51
4.3.4 การล้างแผ่นฟิล์มบางหลังจากกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้า.....	52
4.3.4.1 อุปกรณ์สำหรับการล้างแผ่นฟิล์มบาง	52
4.3.4.2 วิธีการล้างแผ่นฟิล์ม	52

4.4 การสร้างระบบของไหลจุลภาค	53
4.4.1 การเตรียมแม่พิมพ์ของระบบของไหลจุลภาค	54
4.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์ของเหลว Polydimethylsiloxane (PDMS)	55
4.4.3 การขึ้นรูประบบของไหลจุลภาค	55
4.5 การสร้างส่วนยึดหนีบด้านบนและด้านล่าง	56
4.5.1 การสร้างส่วนฐานยึดหนีบด้านล่าง	56
4.5.2 การสร้างส่วนยึดหนีบด้านบน	56
4.6 อุปกรณ์สร้างแมกนีโตเฟอริติก	57
4.6.1 ข้อกำหนดในการสร้างแมกนีโตเฟอริติก	57
4.7 อุปกรณ์ในการควบคุมการไหล	58
4.7.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองควบคุมของไหล	58
4.7.2 ข้อกำหนดของอุปกรณ์ในการควบคุมการไหล	58
4.8 การเตรียมตัวอย่างและติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบ	58
4.8.1 การเตรียมตัวอย่างสารของอนุภาคพาราแมกเนติก	59
4.8.2 การเตรียมตัวอย่างของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียจากหนูทดลอง	59
4.8.3 การเตรียมตัวอย่างของเซลล์เม็ดเลือดแดงมาลาเรียจากเลือดคน	59
4.9 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเตรียมทดสอบประสิทธิภาพของระบบ	60
4.10 สรุป	62
บทที่ 5 ผลการทดลอง	63
5.1 การสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติก	63
5.1.1 การสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกกรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวร	63
5.1.2 การสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกกรณีที่มีแม่เหล็กถาวร	65
5.1.3 การทดลองเพิ่มอัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีและ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที	66
5.1.4 การทดลองของอนุภาคพลาสติกที่มีขนาด 10 ไมโครเมตร	71

5.2 การทดลองกับเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียจากหนูทดลองโดยมีระยะเวลาการติดเชื้อที่ 2 วัน.....	73
5.2.1 การทดลองที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีในเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียเป็นระยะเวลา 2 วัน	75
5.2.2 การทดลองที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาทีในเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียเป็นระยะเวลา 2 วัน	76
5.3 การทดลองกับเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียจากหนูทดลองโดยมีระยะเวลาการติดเชื้อที่ 5 วัน.....	76
5.3.1 การทดลองที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีในเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียเป็นระยะเวลา 5 วัน	78
5.3.2 การทดลองที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาทีในเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียเป็นระยะเวลา 5 วัน	79
5.4 การทดลองกับเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียจากหนูทดลองโดยมีระยะเวลาการติดเชื้อที่ 7 วัน.....	79
5.4.1 การทดลองที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีในเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียเป็นระยะเวลา 7 วัน	82
5.4.2 การทดลองที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาทีในเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียเป็นระยะเวลา 7 วัน	82
5.5 การทดลองกับเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียจากคน	82
5.5.1 การทดลองที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีในเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียในคน	85
5.5.2 การทดลองที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาทีในเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียในคน	85
5.6 สรุป	87
บทที่ 6 สรุปงานวิจัย	88
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก ผลการเปรียบเทียบแรงแม่เหล็กเมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับการไหล	92
ภาคผนวก ข ผลการเปรียบเทียบแรงแม่เหล็กเมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางตามการไหล	95
ภาคผนวก ค ผลการนับอนุภาคที่ทางออกของระบบของไหลจุลภาค.....	101
ภาคผนวก ง การตรวจสอบอัตราการไหลทั้งสองช่องทางการไหล.....	114
บรรณานุกรม.....	117
ประวัติผู้เขียน.....	118

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2. 1 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียและเซลล์ที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรียและเซลล์เม็ดเลือดขาว.....	11
ตารางที่ 2. 2 ขนาดของเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียในแต่ละระยะ [9]	11
ตารางที่ 2. 3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียโดยอาศัยแรงแม่เหล็กไนโตรเฟอริติก	24
ตารางที่ 3. 1 ค่าความซึมซาบของชนิดของวัสดุของแม่เหล็ก.....	39
ตารางที่ 3. 2 การคำนวณที่เอลิเมนต์ต่างกันของสนามแม่เหล็ก	32
ตารางที่ 3. 3 การคำนวณที่เอลิเมนต์ที่ต่างกันของสนามความเร็ว	36



สารบัญญักรูปภาพ

รูปที่ 2. 1 การตัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อโดยอาศัยความแตกต่างของเซลล์ [4].....	7
รูปที่ 2. 2 การตัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงโดยใช้เสาขนาดเล็กวางเรียงตัวภายในช่องทางการไหล [5] ..	8
รูปที่ 2. 3 วงอิเล็กทรอนิกส์แบบ interdigitated electrode array [6].....	9
รูปที่ 2. 4 วงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ spiral electrode array [6].....	10
รูปที่ 2.5 อุปกรณ์การทดลองในการตัดแยกอนุภาคพาราแมกเนติกและอนุภาคที่ไม่เป็นแม่เหล็ก [17]	12
รูปที่ 2. 6 ทิศทางการเคลื่อนของอนุภาคในอุปกรณ์การทดลอง [17].....	13
รูปที่ 2. 7 ระบบของไหลแบบจุลภาคเพื่อการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงโดยอาศัยแรงแม่เหล็ก [10]14	
รูปที่ 2. 8 แสดงถึงการนับเซลล์ที่ทางออกของระบบของไหลจุลภาค [10].....	15
รูปที่ 2. 9 การพัฒนาระบบของไหลแบบจุลภาคเพื่อการดักจับเซลล์มะเร็งโดยอาศัยแรงแม่เหล็ก [11]	15
รูปที่ 2. 10 การทดลองเมื่อมีเซลล์มะเร็งถูกจับไว้ในระบบโดยอาศัยแรงแม่เหล็ก [11].....	16
รูปที่ 2. 11 ระบบการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อโดยอาศัยแรงแม่เหล็ก [12]	17
รูปที่ 2. 12 รูปแบบโครงสร้างของระบบของไหลจุลภาคที่ใช้วัสดุเพอมาลลอยมาช่วยในการคัดแยกอนุภาค [13].....	18
รูปที่ 2. 13 การทดลองทั้งก่อนและหลังการทดลองดักจับอนุภาคที่มีความเป็นแม่เหล็กลงบนแผ่นวัสดุเพอมาลลอย Permalloys [13]	18
รูปที่ 2. 14 (ก) ระบบของไหลจุลภาคเพื่อคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรีย (ข) โครงสร้างภายในของระบบคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื้อ [14].....	19
รูปที่ 2. 15 ระบบคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียโดยอาศัยการเหนี่ยวนำของแท่งเฟอร์โรแมกเนติก [15]	20
รูปที่ 2. 16 โครงสร้างภายในระบบคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรีย [15].....	21

รูปที่ 2. 17 การเคลื่อนที่ของเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียภายในระบบคัดแยก (ซ้าย) ไม่มีสนามแม่เหล็กในระบบของไหลจุลภาค, (ขวา) มีสนามแม่เหล็กในระบบของไหลจุลภาค [15] 21

รูปที่ 2. 18 ระบบการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดขาวออกจากกระบบโดยอาศัยแรงแมกนีโตเฟอร์ริติกดักจับเซลล์เม็ดเลือดแดง [16] 22

รูปที่3. 1 การเรียงตัวของสนามแม่เหล็ก 27

รูปที่3. 2 รูปร่างของโครงสร้างขนาดเล็กในรูปแบบต่าง รูปร่างสี่เหลี่ยม, รูปร่างวีและรูปร่างดัดเบิ้ลยู 30

รูปที่3. 3 รูปจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ติดเชื่อมมาลาเรียเข้าหาโครงสร้างเสาขนาดเล็ก (ก) กรณีไม่มีแม่เหล็ก (ข) กรณีมีแม่เหล็ก 31

รูปที่3. 4 ระบบที่ทำการออกแบบการจำลองสนามแม่เหล็ก 33

รูปที่3. 5 ระบบที่ทำการออกแบบจำลองการไหลซึ่งใช้ค่าอัตราการไหลที่ 0.04 มิลลิเมตรต่อนาที..... 33

รูปที่3. 6 ขนาดของสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอถูกเหนี่ยวนำด้วยแรงจากแม่เหล็กถาวร 34

รูปที่3. 7 การจำลองสนามแม่เหล็กตามโครงสร้างเสาขนาดเล็ก (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวีและ (ค) รูปร่างดัดเบิ้ลยู 35

รูปที่3. 8 การจำลองสนามความเร็วผ่านรูปร่างนิกเกิล (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวีและ(ค)รูปร่างดัดเบิ้ลยู 37

รูปที่3. 9 การจำลองแรงแมกนีโตเฟอร์ริติกที่เหนี่ยวนำกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กกำหนดการแสดงเป็นแรงแมกนีโตเฟอร์ริติก (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวีและ(ค) รูปร่างดัดเบิ้ลยู 38

รูปที่3. 10 การเก็บข้อมูลตามแนวนอนเพื่อนำไปเปรียบเทียบข้อมูลของสนามแม่เหล็กและสนามความเร็ว..... 39

รูปที่3. 11 แรงแมกนีโตเฟอร์ริติกและแรงต้านการไหลในทิศทางตามแนวนอนของโครงสร้าง (เก็บข้อมูลตามแนวนอน) (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวี และ (ค) รูปร่างดัดเบิ้ลยู..... 41

รูปที่3. 12 การเก็บข้อมูลตามแนวตั้งเพื่อนำไปเปรียบเทียบข้อมูลของสนามแม่เหล็กและสนามความเร็ว..... 41

รูปที่3. 13 แรงแมกนีโตเฟอริติกและแรงต้านการไหลในทิศทางตามแนวนอนของโครงสร้าง (เก็บข้อมูลตามแนวตั้ง) (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวีและ(ค) รูปร่างดับเบิลยู.....	43
รูปที่4. 1 ส่วนประกอบของระบบของไหลจุลภาคเพื่อนำมาใช้ในงานวิจัย.....	47
รูปที่4. 2 ลวดลายที่ออกแบบไว้ในโปรแกรมวาดแบบสามมิติกำหนดขนาดไว้ที่ 200x200 ไมโครเมตร รูปร่างสี่เหลี่ยม รูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยู.....	48
รูปที่4. 3 รูปร่างที่ปรับลงแผ่นใสพลาสติกเพื่อเตรียมสร้างเป็นหน้ากากในขั้นตอนทำการฉายแสง....	48
รูปที่4. 4 กระบวนการสร้างลวดลายบนแผ่นทองแดงด้วยการฉายแสงยูวีผ่านหน้ากากลวดลาย (ก) ฟิล์มฉายแสงติดบนแผ่นทองแดง (ข) หน้ากากฉายแสงวางไว้ด้านบนของฟิล์มฉายแสง (ค) แผ่น ทองแดงที่นำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต และ (ง) แผ่นทองแดงหลังจากแช่สารละลายเสร็จ แล้ว	49
รูปที่4. 5 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองสำหรับกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้า	51
รูปที่4. 6 รูปร่างที่นิกเกิดติดอยู่บนแผ่นทองแดงหลังจากกระบวนการชุบโลหะนิกเกิลแล้วจึงเป็น โครงสร้างขนาดเล็ก รูปร่างสี่เหลี่ยม รูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยู.....	52
รูปที่4. 7 การออกแบบช่องทางการไหลจุลภาคเพื่อนำไปสร้างเป็นแม่พิมพ์	53
รูปที่4. 8 ขั้นตอนการขึ้นรูปช่องทางการไหลจุลภาคจากพอลิเมอร์ PDMS	54
รูปที่4. 9 กระบวนการสร้างรูปร่างของแม่พิมพ์จากกระบวนการ CNC	54
รูปที่4. 10 การหล่อแม่พิมพ์ด้วยพอลิเมอร์ PDMS และเจาะรูเพื่อสร้างช่องทางการไหลเพื่อขึ้นรูป ระบบของไหลจุลภาค	55
รูปที่4. 11 การสร้างฐานด้านล่างพร้อมทั้งช่องใส่แม่เหล็กถาวร (ซ้าย) การออกแบบด้วยโปรแกรม คอมพิวเตอร์ (ขวา) ฐานด้านล่างสร้างจากการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ.....	56
รูปที่4. 12 ตัวยึดหนีบด้านบนของอุปกรณ์ที่ต้องใส่ใส่สกรูเข้าไป (ซ้าย) การออกแบบตัวยึดหนีบ ด้านบนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ขวา) ชิ้นงานเมื่อผ่านกระบวนการตัดด้วยเลเซอร์	57
รูปที่4. 13 การประกอบอุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันเพื่อเตรียมพร้อมทดลองสำหรับทั้งอนุภาคพารา แมกเนติกและเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรีย	61
รูปที่4. 14 แผนภาพการติดตั้งระบบของไหลจุลภาคเพื่อทดลองกับอนุภาคพาราแมกเนติก	61

รูปที่5. 1 การเคลื่อนของอนุภาคพาราแมกเนติกกรณีไม่มีแม่เหล็กถาวรภายในระบบของโครงสร้างเสาขนาดเล็ก รูปร่างสี่เหลี่ยม รูปร่างวี และรูปร่างดับเบิลยู.....	64
รูปที่5. 2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกจากซ้ายไปขวาเคลื่อนที่เข้าไปติดกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 0.04 ไปสู่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาที	65
รูปที่5. 3 การทดลองอัตราการไหลที่ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 30 วินาทีเพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกในโครงสร้างเสารูปปร่างต่าง ๆ.....	67
รูปที่5. 4 การทดลองอัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 30 วินาทีเพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกในโครงสร้างเสารูปปร่างต่าง ๆ.....	67
รูปที่5. 5 การแสดงผลการเก็บข้อมูลในการทดลองครั้งแรกที่อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีกรณีที่มีแม่เหล็ก.....	68
รูปที่5. 6 แผนภาพแสดงจำนวนอนุภาคพาราแมกเนติกที่ช่องทางออกของอุปกรณ์ (ก) อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีและ(ข) อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที	71
รูปที่5. 7 แผนภาพแสดงจำนวนอนุภาคพลาสติกที่ไหลออกจากระบบ (ก) อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีและ (ข) อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	73
รูปที่5. 8 การประเมินอัตราส่วนของเซลล์ที่ติดเชื้อและไม่ติดเชื้อในระยะเวลาการติดเชื้อ 2 วันเซลล์ในวงกลมสีแดงและสีน้ำเงินคือเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียและเซลล์ที่ไม่ติดเชื้อมาลาเรียตามลำดับ	74
รูปที่5. 9 แผนภาพแสดงจำนวนเซลล์ที่หลุดออกของอุปกรณ์ระยะเวลาการติดเชื้อ 2 วัน (ก) อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีและ(ข) อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที	75
รูปที่5. 10 การประเมินอัตราส่วนของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อและเซลล์เม็ดเลือดแดงไม่ติดเชื้อระยะเวลาการติดเชื้อ 5 วันเซลล์ในวงกลมสีแดงและสีน้ำเงินคือเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียและเซลล์ที่ไม่ติดเชื้อมาลาเรียตามลำดับ.....	77
รูปที่5. 11 แผนภาพแสดงจำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียหลุดออกจากอุปกรณ์ที่ระยะเวลาการติดเชื้อ 5 วัน (ก) อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีและ(ข) อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อ นาที.....	78
รูปที่5. 12 การประเมินอัตราส่วนของเซลล์ที่ติดเชื้อและไม่ติดเชื้อในระยะเวลาการติดเชื้อ 7 วันเซลล์ในวงกลมสีแดงและสีน้ำเงินคือเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียและเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อมาลาเรียตามลำดับ.....	80

รูปที่ 5. 13 แผนภาพแสดงจำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียหลุดออกจากอุปกรณ์ที่ระยะการติดเชื้อ 7 วัน (ก) อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีและ(ข) อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	81
รูปที่ 5. 14 การประเมินอัตราส่วนของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อและเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อในคนในวงกลมสีแดงและสีน้ำเงินคือเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียและเซลล์เม็ดเลือดขาวตามลำดับ.....	83
รูปที่ 5. 15 แผนภาพแสดงจำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียหลุดออกจากอุปกรณ์ที่ระยะการติดเชื้อในคน (ก) อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีและ(ข) อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	84
รูปที่ 5. 16 เซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียเคลื่อนที่เข้าไปติดตามโครงสร้างเสาในรูปร่างสี่เหลี่ยมรูปร่างวีและรูปร่างดัดเบิ้ลยู.....	86
รูปที่ ก1 การจำลองสนามแม่เหล็กรูปร่างโครงสร้างเสาขนาดเล็กมีทิศทางของสนามแม่เหล็กแนวตั้ง (ก) รูปสี่เหลี่ยม (ข) รูปวี และ (ค) รูปดัดเบิ้ลยู	92
รูปที่ ก2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงแมกนีโตเฟอร์ติกในทิศทางตามแนวตั้งของโครงสร้าง(เก็บข้อมูลตามแนวนอน) (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวี และ (ค) รูปร่างดัดเบิ้ลยู.....	93
รูปที่ ก3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงแมกนีโตเฟอร์ติกในทิศทางตามแนวตั้งของโครงสร้าง(เก็บข้อมูลตามแนวตั้ง) (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวี และ (ค) รูปร่างดัดเบิ้ลยู	94
รูปที่ ข1 การจำลองสนามแม่เหล็กรูปร่างโครงสร้างเสาขนาดเล็กมีทิศทางของสนามแม่เหล็กแรงแนวนอน (ก) รูปสี่เหลี่ยม (ข) รูปวี และ (ค) รูปดัดเบิ้ลยู	95
รูปที่ ข2 การจำลองสนามแม่เหล็กรูปร่างโครงสร้างเสาขนาดเล็กมีทิศทางของสนามแม่เหล็กแรงแนวตั้ง (ก) รูปสี่เหลี่ยม (ข) รูปวี และ (ค) รูปดัดเบิ้ลยู.....	96
รูปที่ ข3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงแมกนีโตเฟอร์ติกและแรงต้านการไหลในทิศทางตามแนวนอนของโครงสร้าง(เก็บข้อมูลตามแนวนอน) (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวี และ (ค) รูปร่างดัดเบิ้ลยู..	97
รูปที่ ข4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงแมกนีโตเฟอร์ติกในทิศทางตามแนวนอนของโครงสร้าง(เก็บข้อมูลตามแนวตั้ง) (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวี และ (ค) รูปร่างดัดเบิ้ลยู	98

รูปที่ ค12 ผลการนับอนุภาคเม็ดพลาสติก อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที (ก) ไม่มีเหล็กถาวร
(ข) มีแม่เหล็กถาวร..... 113

รูปที่ ง1 การคำนวณอัตราการไหลทั้งสองช่องทางของระบบของไหลจุลภาค 114



บทที่ 1

บทนำ

โรคมาลาเรียหรือไข้มาลาเรียเป็นโรคติดต่อที่เกิดจากเชื้อโปรโตซัวพลาสโมเดียม ซึ่งก่อโรคในคนและสัตว์ และมีพาหะคือยุงก้นปล่องเพศเมีย โดยเป็นโรคที่มีขอบเขตการแพร่กระจายในเขตภูมิอากาศร้อนและอบอุ่น โรคมาลาเรียมีชื่อที่ใช้เรียกอื่น ๆ ที่แตกต่างกันไปตามลักษณะอาการหรือฤดูกาลเกิดโรค เช่น ไข้ป่า ไข้จับสั่น ไข้ป่า และไข้ดอกส้น ปัจจุบันมีประชากรจาก 99 ประเทศทั่วโลก จำนวนกว่า 2,000 ล้านคนอาศัยอยู่ในบริเวณที่เสี่ยงติดเชื้อมาลาเรีย โดยมีผู้ติดเชื้อมาลาเรียประมาณ 500 ล้านราย ในประเทศไทยพบผู้ติดเชื้อมาลาเรียมากกว่า 34,000 ราย ในปี พ.ศ. 2556 ตั้งแต่ มกราคมถึงเดือนตุลาคม มีผู้ป่วยทั้งประเทศจำนวน 12,000 ราย เสียชีวิต 12 รายเนื่องจากประเทศไทยมีสภาพอากาศที่เหมาะสมแก่การวางไข่และเจริญเติบโตโดยเฉพาอย่างยิ่งในแหล่งน้ำกร่อยที่มีแสงแดดส่องถึงทำให้เป็นพื้นที่เพาะพันธุ์ยุงซึ่งจะกลายเป็นพื้นที่อันตรายต่อการถูกยุงกัด ซึ่งพื้นที่ในภาคกลางของประเทศไทยนั้นพบผู้ป่วยที่เป็นโรคมาลาเรียจำนวนน้อย ผู้ป่วยส่วนใหญ่พบมาจากบริเวณพื้นที่ที่เสี่ยงโดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่ป่าในบางจังหวัดของภาคใต้และจังหวัดที่มีฝนตกชุกสูง โดยจังหวัดที่พบผู้ป่วยสูงสุดได้แก่ แม่ฮ่องสอน ตาก ตรวค ตามลำดับ โดยผู้ป่วยมีอายุช่วง 10 -35 ปี การระบาดของโรคมาลาเรียนั้นพบมากในช่วงฤดูฝนซึ่งเป็นช่วงฤดูกาลระบาดของโรคและตามรายงานของกระทรวงสาธารณสุขนั้นพบว่าอัตราส่วนผู้ป่วยโรคมาลาเรียที่เป็นเพศชายมากกว่าเพศหญิง

โรคมาลาเรียเกิดจากเชื้อโปรโตซัวซึ่งสาเหตุของการเกิดโรคมาลาเรียโดยเป็นปรสิตสัตว์เซลล์เดียว[1] มีทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ พลาสโมเดียม-ฟัลซิพารัม (*P. falciparum*) พลาสโมเดียม-ไวแวกซ์ (*P. Vivax*) พลาสโมเดียม มาลารีอี (*P. Malariae*) พลาสโมเดียม โอวาเล่ (*P. Ovale*) และพลาสโมเดียม โนวาไซ (*P. Knowlesi*) สำหรับในประเทศไทยนั้นเชื้อที่เป็นสาเหตุของโรคมาลาเรียที่พบในผู้ป่วยมากที่สุดเพียง 2 ชนิด คือ พลาสโมเดียม-ฟัลซิพารัมและพลาสโมเดียม-ไวแวกซ์ ซึ่งพลาสโมเดียม-ฟัลซิพารัมเป็นชนิดเป็นเชื้อที่รุนแรงมาก หากได้รับเชื้อนี้เข้าไปและไม่ได้รับการรักษาหรือรักษาไม่ทันจะมีอาการรุนแรงเกิดเป็นมาลาเรียขึ้นสมองอาจทำให้เสียชีวิตได้ และพลาสโมเดียมไวแวกซ์เป็นเชื้อชนิดไม่รุนแรง หากเชื้อไม่ได้ถูกกำจัดออกไปให้หมดจากร่างกาย จะทำให้กลับมาเป็นโรคนี้อีกเป็นระยะๆ

การวินิจฉัยเพื่อยืนยันถึงการเป็นโรคมาลาเรียนั้นในปัจจุบันมีสองวิธีหลักคือวิธีการวินิจฉัยโรคโดยการย้อมฟิล์มเลือด ซึ่งทำได้โดยการนำเลือดผู้ป่วยมาหยดบนแผ่นกระจกใสแล้วย้อมฟิล์มเลือดด้วยสียิมซา (Giemsa) จากนั้นนำสไลด์ที่ย้อมสีแล้วไปตรวจดูเชื้อปรสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์ถ้าพบการติดเชื้อมาลาเรียจะเห็นได้ชัดว่าสีที่ย้อมจะไปติดสีในเซลล์เม็ดเลือดแดงนั้น ๆ ซึ่งการวินิจฉัยโรคโดย

ด้วยวิธีการย้อมฟิล์มเลือดนั้นต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญในการย้อมสีและการตรวจวิเคราะห์รวมทั้งยังระบุระยะเวลาของการติดเชื้อไม่ได้ สำหรับอีกวิธีนั้นเป็นการวินิจฉัยโรคมาลาเรียด้วยตรวจสอบอย่างรวดเร็ว (Rapid diagnostic immunochromatographic test) หรือ RDT วิธีตรวจหาเชื้อมาลาเรียนั้นจะนำตัวอย่างเลือดจากผู้ป่วยหยดลงในอุปกรณ์ ซึ่งการทำงานอาศัยหลักการโครโมโทกราฟีเพื่อการจับคู่แอนติเจนและแอนติบอดีที่เหมือนกันและวัดผลจากการดูสีบนอุปกรณ์ [2] ซึ่งวิธีนี้เป็นที่นิยมที่ใช้ในสถานพยาบาล ทั้งยังสามารถวินิจฉัยเลือดของผู้ป่วยที่ติดเชื้อมาลาเรียได้ในพื้นที่ที่ไม่มีกล้องจุลทรรศน์อีกด้วย การวินิจฉัยโรคมาลาเรียโดยวิธีการตรวจสอบอย่างรวดเร็วที่มีความไวสูง (Sensitivity) มากสำหรับการรายงานผล แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือหากตัวอย่างเลือดที่นำมาตรวจมีการติดเชื้อมาลาเรียที่อยู่ในระยะเริ่มต้นของโรคและทำการวินิจฉัยด้วยวิธีการตรวจสอบอย่างรวดเร็วจะทำให้ผลคลาดเคลื่อนเป็นอย่างมากกว่าวิธีย้อมฟิล์มเลือดและตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ เนื่องจากสาเหตุนี้ทำให้ การวินิจฉัยโรคมาลาเรียเกิดความผิดพลาดอาจทำให้ผู้ป่วยได้รับการรักษาที่ไม่ถูกวิธีและไม่ทันเวลา อาจส่งผลร้ายแรงถึงขั้นชีวิตได้ ดังนั้นการวินิจฉัยโรคมาลาเรียที่แม่นยำจึงจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้การรักษาผู้ป่วยมีประสิทธิภาพสูงสุด

ปัจจุบันระบบของไหลจุลภาค (Microfluidics) มีบทบาทสำคัญในการศึกษาวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และทางการแพทย์ โดยระบบของไหลจุลภาคนั้นมีความสามารถจำกัดขอบเขตในการศึกษาที่จำเพาะเจาะหรือบริเวณที่ต้องการจะศึกษาได้ ซึ่งในปัจจุบันระบบของไหลจุลภาคนั้นมีขนาดใกล้เคียงกับเซลล์หรืออนุภาคขนาดไมคอนได้ ทั้งนี้ระบบของไหลจุลภาคนั้นเป็นการย่ออุปกรณ์ให้ให้มีขนาดเล็กลง สะดวกต่อการพกพา แต่ยังคงไว้ถึงประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผล อุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ระบบของไหลจุลภาคบนชิพที่นำมาใช้งานในปัจจุบันคือช่องทางการไหลจุลภาคเป็นช่องทางการไหลขนาดเล็กที่ใช้จัดการกับของเหลวหรือสารละลายต่าง ๆ ในระดับไมโครลิตร สำหรับการสร้างช่องทางการไหลแบบจุลภาคนั้นในปัจจุบันสร้างมาจากวัสดุพอลิเมอร์ที่เรียกว่า Polydimethylsiloxane (PDMS) โดยช่องทางการไหลจุลภาคนั้นสามารถนำไปเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่ช่วยคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดที่ติดเชื้อมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดปกติ ทั้งยังสามารถสร้างระบบของไหลจุลภาค รวมทั้งยังสามารถใช้ตัวอย่างเลือดผู้ป่วยในปริมาณน้อยซึ่งอยู่ในระดับไมโครลิตร และสามารถคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อ เพื่อนำตัวอย่างส่งไปวิเคราะห์เพื่อวินิจฉัยระยะการติดเชื้อมาลาเรียได้ชัดเจนมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปในการวิจัยเพื่อหาตัวยาที่สามารถรักษาโรคมาลาเรียต่อไปในอนาคต การคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียด้วยระบบของไหลจุลภาคนั้นมีหลายวิธี เช่น การคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดด้วยวิธีทางไฟฟ้า ทางแม่เหล็กและขนาดของเซลล์เม็ดเลือด โดยปัญหาที่พบในการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดปกติคือหากการติดเชื้อมาลาเรียยังอยู่ในระยะเริ่มต้นแล้วการแสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของเม็ดเลือดจะน้อยมาก ส่งผลให้การคัดแยกเม็ดเลือดแดงมีประสิทธิภาพที่ต่ำ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการตัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์ที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรียโดยอาศัยแรงแม่เหล็กพร้อมกับเพิ่มโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกคือนิกเกิลเข้าไปในระบบของไหลจุลภาคโดยสามารถเพิ่มเกรเดียนของสนามแม่เหล็กเพื่อจะเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์ที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรียได้ โดยโครงสร้างเสาขนาดเล็กนั้นจะแสดงความเป็นแม่เหล็กก็ต่อเมื่อมีสนามแม่เหล็กมาเหนี่ยวนำที่เกิดจากแม่เหล็กถาวร ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่สูงมากกว่าเซลล์เม็ดเลือดที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรียโดยเหตุนี้ในปัจจุบันสำคัญที่ทำให้เกิดเทคนิคการตัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์ที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรียขึ้น โดยงานวิจัยเริ่มจากการออกแบบและสร้างโครงสร้างเสาขนาดเล็ก (Micro-Structures) ที่ขึ้นรูปมาจากนิกเกิล และสามารถนำวิธีนี้ไปช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงปกติ ทั้งนี้ยังสามารถบ่งชี้ถึงระดับความรุนแรงของระยะการติดเชื้อของโรคมาลาเรียได้ งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายการออกแบบโครงสร้างนิกเกิลเพื่อที่หารูปร่างโครงสร้างขนาดเล็กที่เหมาะสมสำหรับการดักจับเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์ที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรีย โดยโครงสร้างนิกเกิลนั้นถูกสร้างให้ขวางกับสนามแม่เหล็ก เพื่อทำให้เกิดเกรเดียนของสนามแม่เหล็กขึ้นในระบบของไหลจุลภาค

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ออกแบบและสร้างระบบของไหลจุลภาคโดยการเพิ่มโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกเข้าไปในระบบของไหลจุลภาคเพื่อใช้ในการตัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียโดยอาศัยแรงจากแม่เหล็กถาวร

1.2.2 ศึกษารูปร่างของโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ด้วยการจำลองระบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาตำแหน่งที่ทำให้มีแรงแม่เหล็กที่สูงและแรงต้านการไหลที่ต่ำ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่เชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อมด้วยแรงแม่เหล็กที่เพิ่มโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

1.3.2 ศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการคัดแยกอนุภาคพาราแมกเนติกและเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียโดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลในการทดลอง

1.3.3 ศึกษาถึงประสิทธิภาพของรูปร่างโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกที่ใช้งานควบคู่กับแรงแม่เหล็กมาแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรีย

1.4 ระเบียบขั้นตอนการวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้แรงแม่เหล็กในระบบของไหลจุลภาค สำหรับการนำไปใช้ในการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงปกติ

1.4.2 ศึกษากระบวนการสร้างโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกโดยวิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าและระบบของช่องทางการไหลจุลภาค

1.4.3 ศึกษาการความเป็นไปได้เบื้องต้นในการนำระบบของไหลจุลภาคไปใช้งานร่วมกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กโดยอาศัยแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำ

1.4.4 ศึกษาความเป็นไปได้ในการคัดแยกเซลล์เม็ดแดงที่ติดเชื่อมออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อมโดยการจำลองทั้งสนามแม่เหล็กและแรงต้านการไหลให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลองเพื่อหาข้อดีและข้อเสียที่จะขึ้นกับรูปร่างของโครงสร้างเสาขนาดเล็ก

1.4.5 สร้างโครงสร้างขนาดเล็กที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีสามรูปร่างได้แก่ รูปร่างสี่เหลี่ยม รูปร่างวี และรูปร่างดัดเบี้ยพร้อมทั้งสร้างช่องทางการไหลจุลภาคที่ใช้งานร่วมกับแรงแม่เหล็ก

1.4.6 ทำการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการคัดแยกทั้งอนุภาคพาราแมกเนติกและเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรีย

1.4.7 สรุปงานวิจัย

1.4.8 รายงานผลการทดลองและอภิปรายผลที่เกิดขึ้น

1.4.9 จัดทำรูปเล่ม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

องค์ความรู้ในการออกแบบและสร้างโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกซึ่งอยู่ในระบบของไหลจุลภาคคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงโดยอาศัยแรงแม่เหล็กที่เข้าไปเหนี่ยวนำกับโครงสร้างเสาขนาดเล็ก เพื่อนำไปเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียให้มีประสิทธิภาพ แม่นยำมากขึ้น รวมทั้งลดระยะเวลาและความผิดพลาดในการวินิจฉัยลงได้ สำหรับการรักษาผู้ป่วยให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ทำให้สามารถนำไปแยกประเภทของเชื้อมาลาเรียได้อย่างแม่นยำมากขึ้นและลดความผิดพลาดของการวินิจฉัยได้ซึ่งจะทำให้สามารถลดจำนวนผู้ป่วยที่ติดเชื่อมมาลาเรียลงได้

1.6 บทนำก่อนเข้าเรื่อง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาในเรื่องระบบของไหลจุลภาคเพื่อดักจับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียด้วยแรงแม่เหล็กที่เหนียวนำโดยโครงสร้างนิกเกิลซึ่งมีแนวทางการเริ่มศึกษาโดยงานวิจัยต่างๆที่มีอยู่ทั้งในอดีตและปัจจุบันมีเทคนิคในการตัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียเป็นจำนวนมากแต่ปัจจัยหลักที่ใช้ในการตัดแยกคือฮีโมโซอิน ซึ่งเป็นลักษณะของปรสิตที่เข้าไปจับตัวกับเซลล์เม็ดเลือดแดงปกติทำให้เกิดผลึกสีน้ำตาลขึ้นในผลึกนั้นจากการศึกษาพบว่ามีความเป็นแม่เหล็กสูงกว่าเซลล์ที่ไม่ติดเชื้อจึงเกิดเป็นวิธีการตัดแยกโดยอาศัยแรงแม่เหล็กเข้ามาช่วยในการตัดแยกทั้งในงานวิจัยนี้ยังเพิ่มวัสดุเฟอร์โรแมกนีติกเข้าไปช่วยในการตัดแยกด้วย

ในการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็นสองส่วนคือการจำลองสนามแม่เหล็กและรูปแบบของสนามความเร็วจากนั้นนำทั้งสองส่วนมาเปรียบเทียบกับในตำแหน่งเดียว ซึ่งจะเปรียบเทียบกับแรงแม่เหล็กและแรงต้านการไหลเพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งที่อนุภาคหรือเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียเคลื่อนที่ผ่านในบริเวณนั้น ๆ เพื่อจะเข้ามาติดกับโครงสร้างในรูปร่างต่าง ๆ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกโครงสร้างรูปสี่เหลี่ยมที่เป็นรูปร่างที่ใช้ในงานวิจัยทั่วไปได้เลือกใช้ แต่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกทำการออกแบบรูปร่างขึ้นมาคือโครงสร้างรูปวีและโครงสร้างรูปดัดเบิ้ลยูเพื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างรูปสี่เหลี่ยมถึงประสิทธิภาพในการดักจับ

งานวิจัยนี้ได้เริ่มการทดลองจากอนุภาคพาราแมกเนติกและอนุภาคเม็ดพลาสติกเพื่อประเมินประสิทธิภาพในเบื้องต้นงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิตรต่อนาทีและ 0.8 มิลลิตรต่อนาที จากนั้นได้รับตัวอย่างเลือดจากทางคณะสัตวแพทย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มีการติดเชื่อมมาลาเรียในหนูทดลองที่ 2 ,5 และ 7 วัน มีการติดเชื้อที่ 1.5 , 8.5 และ 86 เพอร์เซ็นต์ตามลำดับในตัวอย่างสุดท้ายได้รับความช่วยเหลือในการขอตัวอย่างเลือดจากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นตัวอย่างเลือดมาลาเรียที่ติดเชื้อในคนมีระยะการติดเชื้อที่ 90 เพอร์เซ็นต์ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคหรือเซลล์เพื่อหารูปร่างของโครงสร้างที่สามารถบอกถึงประสิทธิภาพที่ดีในการดักจับได้

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

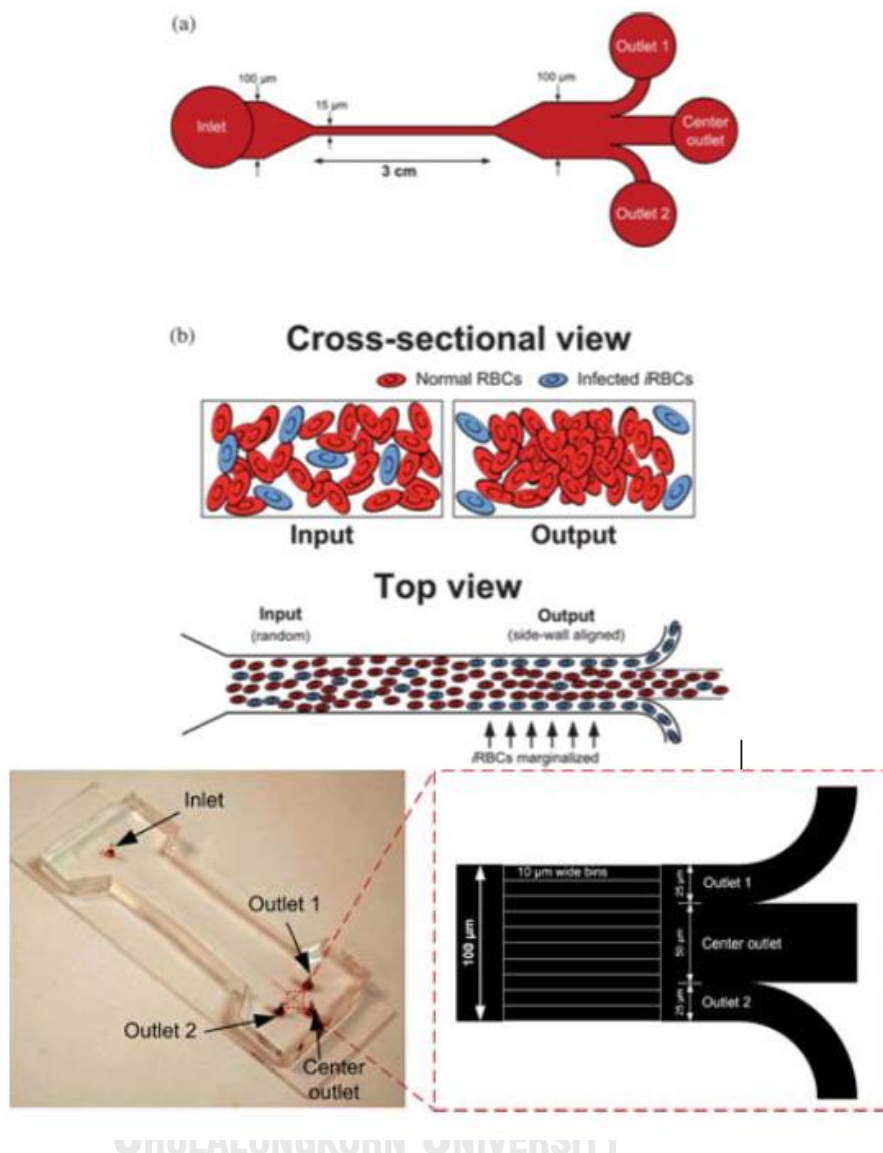
ระบบของไหลจุลภาคถูกนำมาใช้จัดการกับอนุภาคขนาดเล็ก เนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดเล็กใกล้เคียงกับอนุภาค ทำให้สามารถควบคุมพฤติกรรมของอนุภาคได้ดีขึ้น ต่อมาจึงนำไปช่วยในการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อมาลาเรีย ซึ่งใช้ปริมาณของสารตัวอย่างที่น้อย และในงานวิจัยระบบของไหลจุลภาคมาใช้ในการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อมาลาเรีย

2.1 การแยกเซลล์โดยไม่อาศัยแรงภายนอก

ลักษณะของเซลล์จะมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดการพัฒนาเทคนิคกระบวนการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อได้ เช่น อาศัยความยืดหยุ่นของเซลล์มาช่วยคัดแยก [4] การคัดแยกขนาดโดยใช้แรงเฉื่อย [3]

2.1.1 การคัดแยกเซลล์โดยอาศัยความยืดหยุ่นของเซลล์

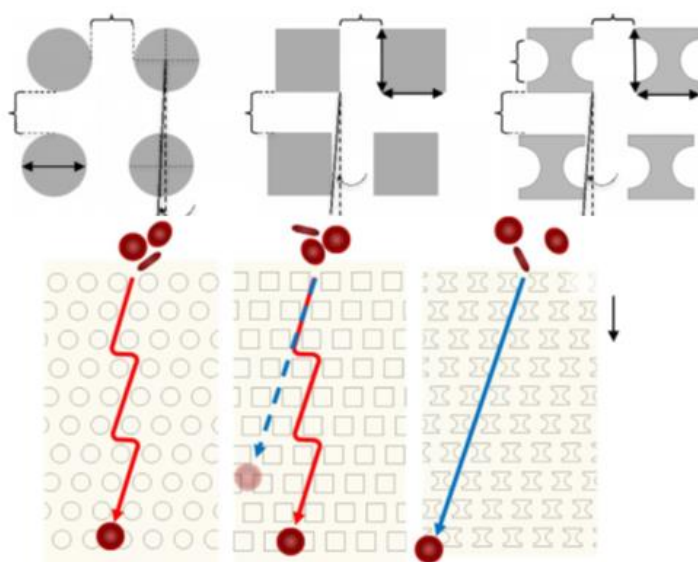
งานวิจัยของ H. W. Hou *et al* [4] ได้ทำการศึกษาวิธีการคัดแยกเซลล์โดยอาศัยลักษณะทางกายภาพ ในงานวิจัยที่จะกล่าวถึงนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติการยืดหยุ่นของเซลล์ ที่แตกต่างกันมาจำแนกแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อ โดยหลักการเมื่อฉีดตัวอย่างเลือดที่มีการติดเชื้อมาลาเรียเข้ามาเซลล์จะเกาะกลุ่มอย่างไม่เป็นระเบียบและพอไหลเข้าไปตามท่อจะเกิดการตำหน่งสมดุลจะคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียไปเกาะอยู่ที่ผนังของท่อทำให้จึงเกิดแนวคิดที่จะคัดแยกเซลล์คือทำการออกแบบทางออกสามทางสองด้านข้างจะเป็นปลายโค้ง และทางออกตรงกลางจะเป็นทางตรงเพื่อจะคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อออกมาได้



รูปที่ 2. 1 การคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อโดยอาศัยความแตกต่างของเซลล์ [4]

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองและตรวจสอบประสิทธิภาพ 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายถึงการคัดแยกเซลล์ในช่องทางออกตรงกลางได้ประสิทธิภาพที่สูงพอสมควร ส่วนทางออกที่เหลือจะมีประสิทธิภาพประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ เห็นได้ชัดว่าจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเนื่องจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียในระยะแรกจะค่อนข้างคัดแยกออกยากกว่าการติดเชื้อในระยะหลังทำให้ประสิทธิภาพลดลง

งานวิจัยของ K. K. Zeming *et al*[5] ได้ทำการศึกษาหลักการของการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงในงานวิจัยนี้คือสร้างโครงสร้างของเสาขนาดเล็ก งานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาการคัดแยกขนาดของเซลล์เม็ดเลือดแดง ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 ไมโครเมตร ใช้อัตราการไหลที่ 0.2 ไมโครลิตร ต่อนาที โดยงานวิจัยนี้มีการออกแบบโครงสร้างของเสาขนาดเล็กทั้งหมด 3 รูปแบบได้แก่ รูปแบบเสา รูปวงกลม รูปแบบเสารูปสี่เหลี่ยม และรูปแบบเสารูปไอ ตามรูปที่ 2.2 แล้วนำไปทดลองทั้ง 3 รูปแบบ ผลการทดลองในงานวิจัยนี้บอกว่ารูปแบบที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงคือรูปแบบเสากลม ส่วนแบบที่มีการเคลื่อนที่ของเซลล์ที่ไม่เป็นระเบียบคือรูปแบบสี่เหลี่ยม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2. 2 การคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงโดยใช้เสาขนาดเล็กวางเรียงตัวภายในช่องทางการไหล [5]

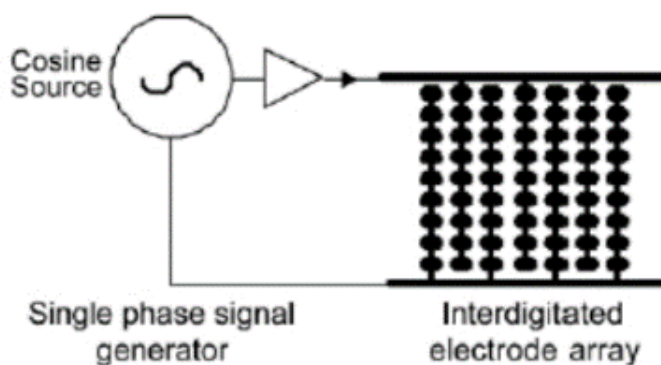
2.2 การแยกเซลล์โดยอาศัยแรงภายนอก

การคัดแยกเซลล์โดยอาศัยแรงภายนอกเข้ามาช่วยในการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อ เป็นการแยกเซลล์โดยใช้คุณสมบัติของเม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียที่มีความเป็นแม่เหล็กอยู่ในเม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อ จึงสามารถนำคุณสมบัติเหล่านี้มาช่วยในการคัดแยกเซลล์โดยอาศัยแรงภายนอก โดยแรงภายนอกยังสามารถแบ่งออกได้อีก 2 ประเภทคือ การคัดแยกเซลล์โดยอาศัยแรงทางไฟฟ้า (Dielectrophoretic force) และการคัดแยกเซลล์โดยอาศัยแรงทางแม่เหล็ก (Magnetophoretic force)

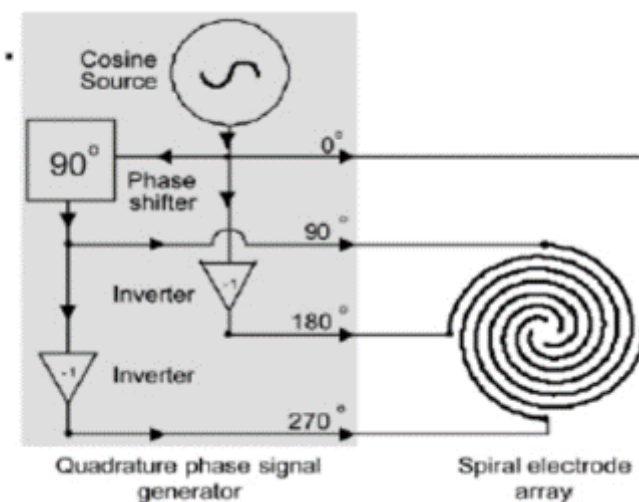
2.2.1 แรงทางไฟฟ้า (Dielectrophoretic Force)

แรงทางไฟฟ้ามีคุณสมบัติในการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรีย จากงานวิจัยต่าง ๆ ได้นำค่าการนำไฟฟ้าของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียมาวิเคราะห์ ซึ่งสรุปได้ว่าภายในเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์ที่ไม่ติดเชื่อมเนื่องจากเยื่อหุ้มภายในเซลล์มีการเชื่อมสภาพลงของไซโตพลาสซึม ค่าการนำไฟฟ้าจึงเพิ่มมากขึ้นของภายในเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรีย จึงเป็นประเด็นที่ทำให้เกิดการคัดแยกเซลล์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าได้

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรีย โดยอาศัยสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งจากงานวิจัยของ Peter Gascoyne [6] ได้ทำการศึกษาการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรีย ออกแบบการทดลองเพื่อใช้คัดแยกเซลล์ออกมา 2 แบบ คือ 1. Microelectrode arrays 2. Spiral electrode arrays ใช้จำนวนตัวอย่างของเลือดในปริมาณระดับไมโครลิตร ในภาพที่รูป 2.3 การทดลองในรูปแบบของ Microelectrode arrays ใช้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 1 เฟส ความถี่อยู่ในช่วง 1 kHz ถึง 5MHz และใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 5 โวลต์ยอดถึงยอด ผลการทดลองพบว่าในแบบแรกสามารถแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรียได้ โดยอีกรูปแบบคือ Spiral electrode arrays รูปที่ [2.4] เป็นการใช้นิวสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ระหว่าง 1 kHz ถึง 15 MHz แรงดันทางไฟฟ้า 5 โวลต์ยอดถึงยอด โดยเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียจะถูกดูดเข้าหาเข้าจุดศูนย์กลางของอิเล็กโทรด ผลมาจากการใช้ความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในอิเล็กโทรดแบบกันหอย และเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อมจะติดอยู่ตามอิเล็กโทรดด้านนอก ซึ่งจะแยกตำแหน่งในการติดภายในอิเล็กโทรดอย่างชัดเจน



รูปที่ 2. 3 วงอิเล็กโทรดแบบ interdigitated electrode array [6]



รูปที่ 2. 4 วงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ spiral electrode array [6]

2.2.2 แรงทางแม่เหล็ก (Magnetophoretic Force)

แรงแม่เหล็กหรือเรียกอีกอย่างว่าแรงแมกนีโตเฟอร์ติก เป็นแรงที่อาศัยคุณสมบัติของแม่เหล็กเพื่อนำมาใช้คัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อมได้ โดยจะอาศัยคุณสมบัติของเซลล์ที่ติดเชื่อม จากการศึกษพบว่า การที่จะเป็นโรคมะเร็งได้นั้นเกิดจากโปรตีนมาลาเรียจะเข้ามาเกาะกับตัวเซลล์เม็ดเลือดแดงมาเกาะกินสารอาหารภายในเซลล์เม็ดแดงพบว่าเมื่อมีโปรตีนเข้ามาติดกับเซลล์เม็ดเลือดแดงมันจะสร้างผลึกคริสตัลสีน้ำตาลเรียกว่า ฮีโมโซอิน (hemozoin) [7],[8] ทางด้านการวิจัยได้นำตัวที่ติดเชื่อมไปศึกษาในเบื้องต้นพบว่า จะมีความเป็นแม่เหล็กสูงกว่าฮีโมโกลบินหรือเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ปกติ จึงเป็นสาเหตุให้นำมาใช้ในการคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมได้โดยเรียกวิธีนี้ว่าแมกนีโตเฟอร์ติก (Magnetophoretic force) โดยคุณสมบัติของของความเป็นแม่เหล็กระหว่างเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาเรียกับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อม ดังตารางที่ 2.1 และขนาดของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาเรียในระยะต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าพอเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมที่เวลาผ่านไปจะแสดงได้ว่าเซลล์ที่ติดเชื่อมจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ตามดังตารางที่ 2.2 ซึ่งวิธีการคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมโดยอาศัยแม่เหล็กในงานวิจัยที่ผ่านมา มีหลากหลายวิธีเช่น การสร้างโครงสร้างขนาดเล็ก (Micro-structures) , แท่งนิกเกิล, ลำดับแถวของแม่เหล็ก เป็นต้น

ตารางที่ 2. 1 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียและเซลล์ที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรียและเซลล์เม็ดเลือดขาว

สมบัติทางกายภาพ	iRBCs	hRBCs	WBCs
ความหนาแน่นของเซลล์ (kg/m^3)	1090	1110	1070
ค่าความไวทางแม่เหล็ก	-7.16×10^{-6} [7]	-9.02×10^{-6} [7]	-11.6×10^{-6}
เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ (μm)	3.35	2.75	5.00

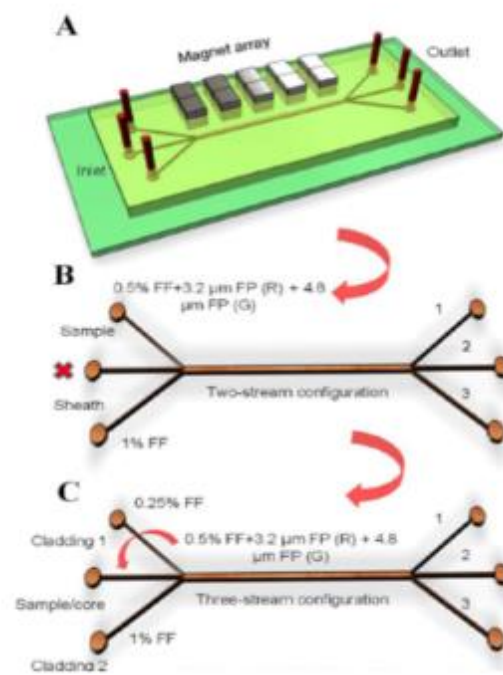
ตารางที่ 2. 2 ขนาดของเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียในแต่ละระยะ [9]

ระยะของมาลาเรีย	Δx (10^{-6})	ความหนาแน่น (g.cm^{-1})	ความยาว (μm)
Healthy	-0.18	1.110	8
Ring	0.82	1.110	16
Trophozoite	0.91	1.106	21.3
Schizont	1.80	1.090	53.3

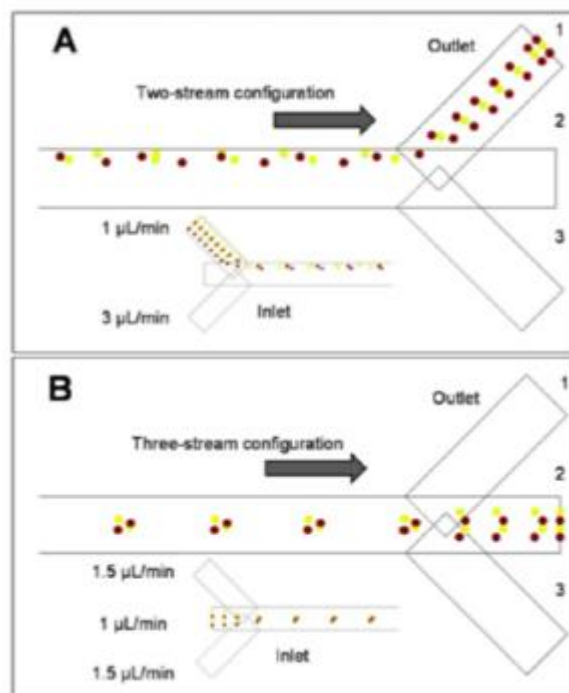
2.2.2.1 ระบบของไหลแบบจุลภาคเพื่อการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงโดยอาศัยเฉพาะแรงแม่เหล็ก

ค.ศ. 2018 งานวิจัยของ Ahmed Munaz *et al* [10] ได้ทำการศึกษาการคัดแยกอนุภาคพาราแมกเนติกขนาดเล็กรวมถึงอนุภาคที่ไม่ได้มีความเป็นแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการแมกนีโตเฟอร์ติกเข้ามาช่วยในการคัดแยกอาศัยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอัตราการไหลภายในช่องทางการไหลขนาดเล็ก โดยหลักการการออกแบบอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้ได้สร้างช่องทางการไหลขาเข้ามีสามทางเข้าและสามทางออกมีและมีแม่เหล็กถาวรวางตัวอยู่บนตรงกลางของบริเวณท่อของช่องทางการไหลซึ่ง

เป็นบริเวณที่อนุภาคไหลเข้ามาด้วยกัน และผ่านไปยังบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กมีรูปร่างอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.5 โดยในการทดลองของงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองเป็นใช้สองทางเข้าและสามทางเข้ามาปรับเปลี่ยนอัตราการไหลที่จะฉีดเข้าระบบ โดยหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับการทดลองโดยอาศัยการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในระบบของไหลจุลภาค



รูปที่ 2.5 อุปกรณ์การทดลองในการคัดแยกอนุภาคพาราแมกเนติกและอนุภาคที่ไม่เป็นแม่เหล็ก [10]

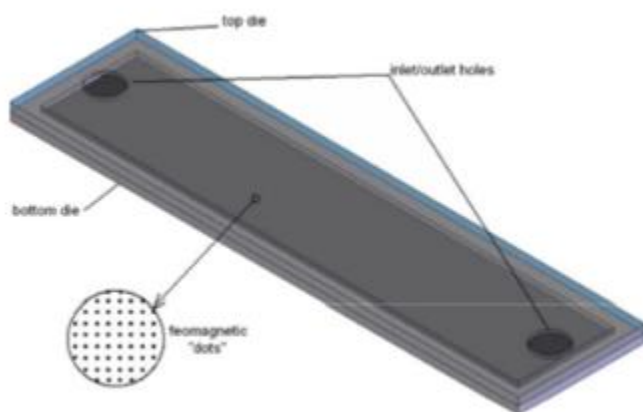


รูปที่ 2. 6 ทิศทางการเคลื่อนของอนุภาคในอุปกรณ์การทดลอง [10]

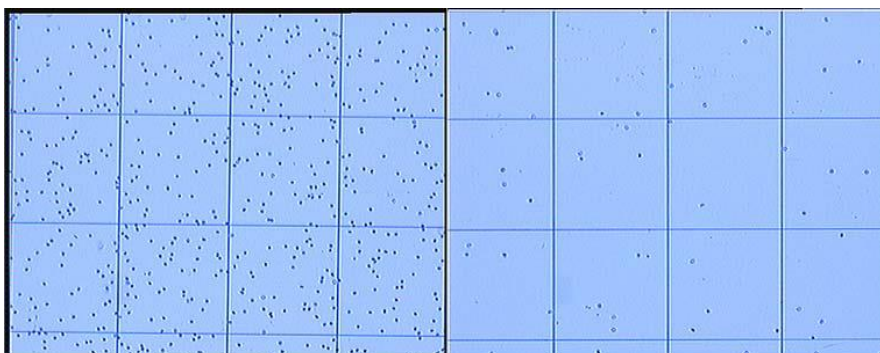
การเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกที่มีขนาดแตกต่างกันในกรณีที่ใช้ทางเข้าสองทางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเคลื่อนที่เข้าใกล้กับสนามของแม่เหล็กถาวรซึ่งมีแรงแมกนีโตเฟอร์ติกเหนี่ยวนำให้เข้าใกล้มากขึ้นส่งผลให้อนุภาคพาราแมกเนติกเคลื่อนที่ออกไปยังช่องทางออกหมายเลข 1 และในส่วนของกรณีที่ใช้ท่อทางเข้าสามทางอนุภาคพาราแมกเนติกจะเคลื่อนที่อยู่บริเวณกลางท่อเป็นส่วนใหญ่โดยอัตราการไหลที่ท่อทางเข้าด้านบนและด้านล่างมีอัตราการไหลที่เท่ากันอยู่ที่ 1.5 ไมโครลิตรต่อวินาทีส่งผลให้การอนุภาคเคลื่อนที่ออกไปบริเวณทางออกตรงกลางหมายเลข 2 ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทดลองโดยสามารถแยกอนุภาคออกได้ได้ถึง 78 เปอร์เซ็นต์ และ 75 เปอร์เซ็นต์ ในอนุภาคที่ 3.2 และ 4.8 ไมโครเมตรได้ ตามลำดับ

2.2.2.2 การคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียด้วยเทคนิคการเพิ่มวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติกเข้าไปเหนี่ยวนำโดยอาศัยแรงแม่เหล็ก

งานวิจัยของ [11] Guolin Xu *et al* ได้ทำการศึกษาวิธีการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงออกจากตัวอย่างเลือดโดยในขณะคัดแยกนั้นยังมีการไหลอย่างต่อเนื่อง โดยอาศัยวิธีการแรงทางแม่เหล็กที่ Guolin Xu ได้โครงสร้างเสาขนาดเล็กไปด้วย มีขนาด 2×2 ไมโครเมตร นำมาวางไว้ด้านล่างของระบบของไหลจุลภาคดังภาพ 2.7 และจะมีแม่เหล็กถาวรวางใกล้กับโครงสร้างเสาขนาดเล็กรูปร่างสี่เหลี่ยมเพื่อจะให้เกิดการเหนี่ยวนำเกิดสนามแม่เหล็กภายในระบบของไหลจุลภาคนี้ ผลการทดลองนี้มีจุดประสงค์คือ เมื่อนำตัวอย่างเลือดเข้ามาในระบบแล้วเซลล์เป้าหมายคือเซลล์เม็ดเลือดแดงจะถูกจับไว้ภายในระบบสิ่งที่มาต้องการคือพลาสมา เซลล์เม็ดเลือดขาวก็จะไหลออกไปที่ทางออกของระบบของไหลจุลภาค ซึ่งผลการทดลองของงานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างเลือดที่ไหลออกตามทางของทางออกของระบบมาตรวจสอบ โดยวิธีการนับอนุภาคผ่านอุปกรณ์การนับ Hemocytometry ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการคัดแยกเซลล์เม็ดแดงได้ 95 เปอร์เซ็นต์



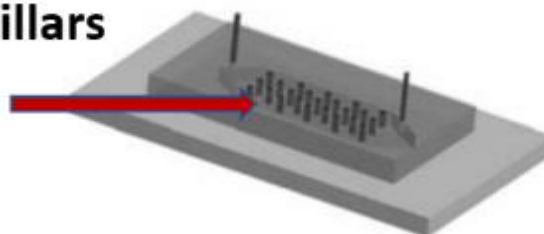
รูปที่ 2. 7 ระบบของไหลแบบจุลภาคเพื่อการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงโดยอาศัยแรงแม่เหล็ก [11]



รูปที่ 2. 8 แสดงถึงการนับเซลล์ที่ทางออกของระบบของไหลจุลภาค [11]

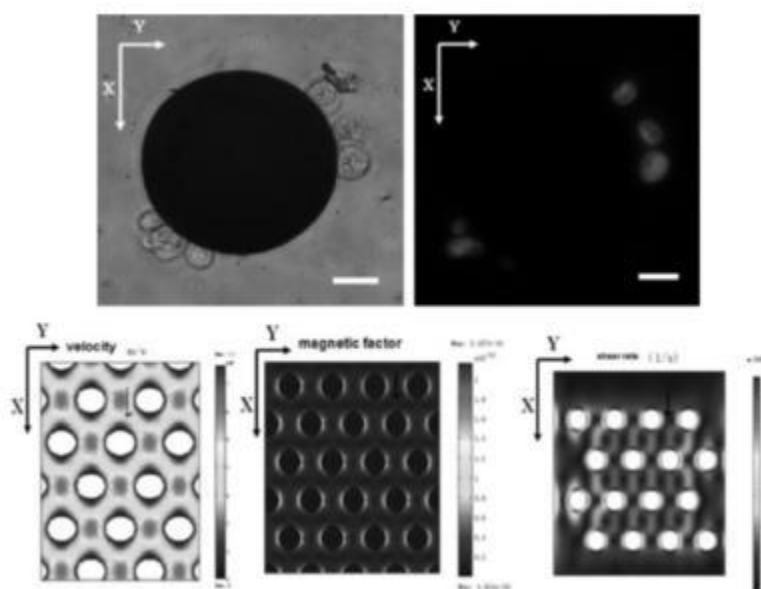
ในต่อมางานวิจัยของ J.Xia *et al* [12] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงกระบวนการสร้างทางช่องทางไหลจุลภาค เพื่อให้เหมาะสมกับงานและใช้ขั้นตอนการทำที่ง่าย ต้นทุนต่ำ ซึ่งมีรูปร่างตามภาพที่ 2.9 โดยยังอาศัยหลักการพื้นฐานของแรงแม่เหล็ก แต่ที่งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพิ่มเติมคือการสร้างโครงสร้างขนาดเล็กขึ้นมาภายในช่องทางไหลจุลภาคเพื่อเป็นการเพิ่มเกรเดียนต์สามารถให้ดักจับเซลล์มะเร็งได้ขึ้น โดยหลักการทำงานของระบบนี้ได้ออกแบบโครงสร้างขนาดเล็กมีการออกแบบรูปร่างไว้ 4 รูปร่างคือ วงกลม สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม และสามเหลี่ยมในที่นี้ได้เลือกรูปแบบวงกลมมาสร้างเป็นชิ้นงานเพื่อที่ใช้คัดแยกเซลล์มะเร็งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การจำลองในทางแม่เหล็กความเร็วภายในระบบของไหลจุลภาค และ แรงเฉือนภายในระบบของไหลจุลภาค และส่วนของการทดลอง เพื่อจะเปรียบเทียบถึงความเป็นไปได้ที่จะทำให้เซลล์มาติดกับโครงสร้างขนาดเล็กที่ได้ออกแบบไว้ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกอัตราการไหลที่ 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ผลลัพธ์จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าจากการจำลองโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์แสดงทั้งแรงแม่เหล็กและความเร็วของการไหลบ่อบอกถึงแรงแม่เหล็กที่สูงตามรูปร่างของโครงสร้างเสารูปวงกลมและสามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อเซลล์เคลื่อนที่เข้ามาติดกับโครงสร้างรูปวงกลม

Micropillars



รูปที่ 2. 9 การพัฒนาระบบของไหลแบบจุลภาคเพื่อการดักจับเซลล์มะเร็งโดยอาศัยแรงแม่เหล็ก [12]

การทดลองเมื่อมีจำนวนของตัวอย่างเลือดไหลเข้ามาในระบบเพื่อที่คัดแยกเซลล์มะเร็งลำไส้ ออกจากตัวอย่างเลือดที่ปกติจะสังเกตได้ว่าเมื่อจะมีเซลล์มาเกาะตามรอบ ๆ ดังรูปที่ 2.10 ของ โครงสร้างเสาขนาดเล็กที่มองจากตำแหน่งด้านบนของเสาซึ่งจะสอดคล้องกับการจำลองภายใน โปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICS อย่างไรก็ตามในการจำลองจะเห็นว่าอีกด้านของวงกลมจะมี แรงแม่เหล็กที่สูงมากแต่เซลล์ก็ยังไม่ติด ซึ่งจะสอดคล้องอีกว่าผลการจำลองทั้งแรงแม่เหล็กและแรง ต้านการไหลที่สูงขึ้นไปทำให้ประสิทธิภาพในการดักจับลดลงไปด้วย และประสิทธิภาพระบบนี้สามารถ ดักจับเซลล์มะเร็งลำไส้ได้ 72.8 เปอร์เซ็นต์

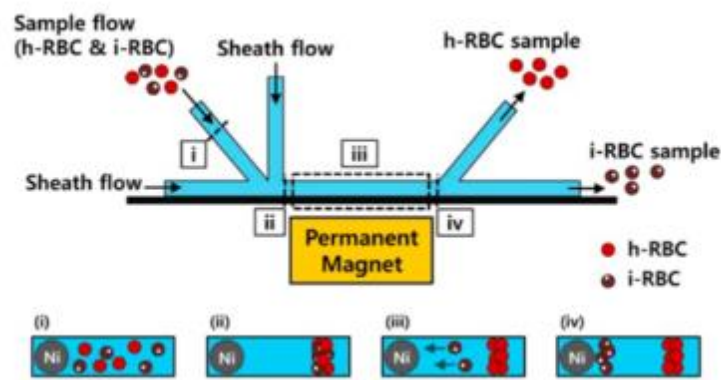


รูปที่ 2. 10 การทดลองเมื่อมีเซลล์มะเร็งถูกจับไว้ในระบบโดยอาศัยแรงแม่เหล็ก [11]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

งานวิจัยนี้ของ[13] Jeonghun Nam *et al* ได้ทำการศึกษาแนวคิดของเซลล์ที่ติดเชื่อม มาลาเรียโดยอาศัยแรงแม่เหล็กไนโตรพรีติก โดยงานนี้ได้ออกแบบระบบของไหลจุลภาค ดังรูป 2.11 ซึ่ง หลักการของระบบของไหลจุลภาคนี้ประกอบไปด้วยการออกแบบท่อเข้าสามทาง ทางออกสองทาง ซึ่งที่ออกแบบมาสามท่อทางเข้าเพื่อจะเป็นการปรับเส้นทางการไหลให้เข้าใกล้ตำแหน่งของเส้นนิกเกล ที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก โดยแนวคิดเป็นการนำเส้นลวดเฟอร์โรแมกเนติกมาวางให้ขนานไปกับ ช่องทางการไหลในงานวิจัยนี้ได้สร้างแรงแม่เหล็กไนโตรพรีติกมาจากการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กถาวรกับ เส้นเฟอร์โรแมกเนติก เมื่อมีตัวอย่างของเลือดที่ติดเชื่อมมาลาเรียไหลผ่านเข้ามาจะเกิดการดูดเซลล์เม็ด เลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียเข้ามาหาเส้นเฟอร์โรแมกเนติก ส่วนเซลล์ที่ไม่ติดเชื่อมก็จะไหลผ่านออกไป ทางออกของระบบ ด้วยจุดประสงค์นี้ทำให้เกิดการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียออก จากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อม ผลการทดลองงานวิจัยของ Jeonghun Nam ได้สรุปออกมาใน 2

ระยะคือ ในระยะเริ่มต้นของการติดเชื่อมมาลาเรียและระยะสุดท้ายของการติดเชื่อ ในประสิทธิภาพการคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อในระยะแรกของการติดเชื่อในระบบนี้สามารถคัดแยกได้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพการคัดแยกในระยะสุดท้ายของการติดเชื่อสามารถคัดแยกได้ถึงประมาณ 98.3 เปอร์เซ็นต์ ที่คัดแยกได้ประสิทธิภาพสูงเนื่องจากในระยะสุดท้ายของเชื้อที่ติดเชื่อมมาลาเรียจะแสดงความเป็นแม่เหล็กที่สูงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียได้ที่ขึ้น ซึ่งจะแตกต่างจากในระยะแรกที่ยังแสดงความเป็นแม่เหล็กไม่ชัดเจน อาจจะได้ประสิทธิภาพไม่สูงมากเมื่อเทียบกับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียในระยะสุดท้าย

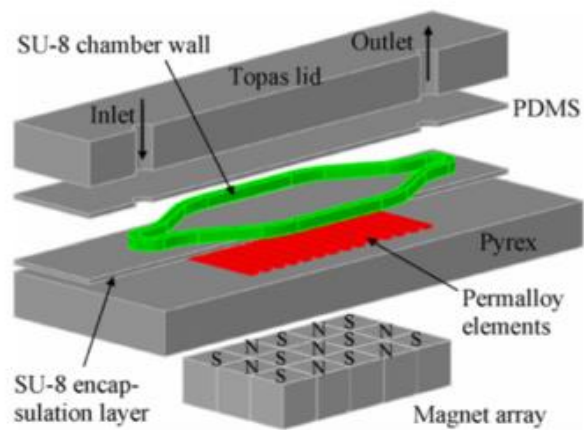


รูปที่ 2. 11 ระบบการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อโดยอาศัยแรงแม่เหล็ก [13]

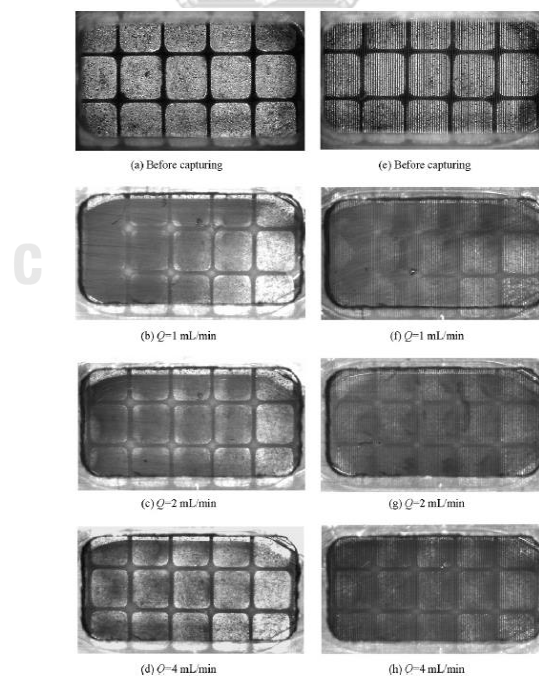
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งานวิจัยของ Minqiang Bu *et al* [14] ได้ทำการศึกษาวิธีการการคัดแยกเม็ดแม่เหล็กโดยอาศัยแรงแม่เหล็กถาวรและการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าของเพอมาลอย ทำให้เกิดลวดลายขึ้น ในปริมาณของสารตัวอย่างที่มีเม็ดแม่เหล็กอยู่ประมาณ 10 ไมโครลิตร เมื่อรวมกันเป็นระบบของไหลจุลภาค โดยงานวิจัยนี้นำแม่เหล็กถาวรไปไว้ด้านล่างสุดของระบบชั้น ถัดขึ้นมาจะเป็นลวดลายของเพอมาลอยเอลิเมนต์ ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งจะวางตัวให้พอดีกันระหว่างแม่เหล็กถาวรกับเพอมาลอยอิลิเมนต์ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากอนุภาคในงานวิจัยนี้ได้อาศัยอนุภาคที่เป็นแม่เหล็กทำการทดลองเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของการดักจับ โดยอาศัยวัสดุที่เป็นเพอมาลอย งานวิจัยนี้ได้มีการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลเริ่มต้นที่ 1 มิลลิเมตรต่ออนาที ไปจนถึงอัตราการไหลที่ 4 มิลลิเมตรต่ออนาที ซึ่งงานวิจัยนี้เมื่อทดลองกับอนุภาคที่เป็นแม่เหล็กแล้วการจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเหนี่ยวนำเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นจะดักจับอนุภาคพาราแมกเนติกลงบนตามแนวการออกแบบของกับเพอมาลอย อิลิเมนต์ ดังรูปที่ 2.13 ประสิทธิภาพการทดลองกับอนุภาคที่เป็นแม่เหล็กที่อัตราการไหลที่ 1 มิลลิเมตร

ต่อมาที่สามารถดักจับอนุภาคพาราแมกเนติกได้ถึง 91 เปอร์เซ็นต์ และ อัตราการไหลที่ 4 มิลลิลิตร ต่อนาที่ประสิทธิภาพที่ 54 เปอร์เซ็นต์

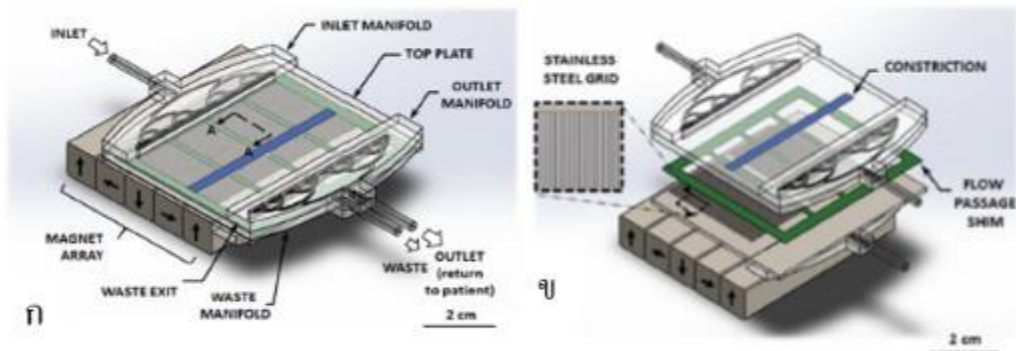


รูปที่ 2. 12 รูปแบบโครงสร้างของระบบของไหลจุลภาคที่ใช้วัสดุเพอมาลอยมาช่วยในการคัดแยกอนุภาค [14]



รูปที่ 2. 13 การทดลองทั้งก่อนและหลังการทดลองดักจับอนุภาคที่มีความเป็นแม่เหล็กลงบนแผ่นวัสดุเพอมาลอย Permalloys [14]

ต่อมาเป็นงานวิจัยของในปี 2017 A. Blue Martin *et al* [15] ได้ทำการศึกษาหลักการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่เชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรียอาศัยหลักการคัดแยกนี้อาศัยการไหลของเซลล์เม็ดเลือดที่ติดเชื่อมมาลาเรียไหลผ่านอุปกรณ์คัดแยก ซึ่งในระบบอุปกรณ์นั้นจะประกอบไปด้วยแม่เหล็กถาวร ซึ่งทิศทางการวางแม่เหล็กของงานวิจัยนี้จะอาศัยการเรียงตัวของสนามแม่เหล็กไว้ด้านบนหมายความว่าสนามแม่เหล็กแบบนี้จะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่าด้านล่างเรียกว่า Halbach Magnet ถัดขึ้นมาจะเป็นวัสดุสเตนเลสกริด ซึ่งจะมีความเป็นแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเมื่อมีแม่เหล็กถาวรเข้ามาเหนี่ยวนำ ทำให้ระบบนี้เกิดสนามแม่เหล็กมากขึ้น ซึ่งเป็นระยะที่เข้าใกล้ช่องทางการไหลของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียทำ ส่งผลให้สนามแม่เหล็กนี้ไปเหนี่ยวนำเซลล์ที่ติดเชื่อให้เข้ามาติดกับแนวเส้นของสเตนเลสกริดมากขึ้น และชั้นด้านบนสุดเป็นช่องทางการไหลที่สร้างขึ้นเพื่อนำเลือดที่ติดเชื่อมมาลาเรียเข้ามาผ่านระบบคัดแยกนี้ ดังรูปที่ 2.14 ลักษณะการคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียของงานวิจัยนี้จะอาศัยการดักจับเซลล์ที่ติดเชื่อไว้ในระบบ และส่วนทางออกที่ออกมาจะต้องมีเซลล์ที่ไม่ติดเชื่อออกมาตามทางออกได้ประสิทธิภาพในการคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียได้ถึง 96 เปอร์เซ็นต์ต่ออัตราการไหลอยู่ที่ 77 ไมโครลิตรต่อนาที ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ติดตั้งการทดลองแบบระบบชุดเนื่องจากเซลล์จะตกตะกอนได้เร็ววิธีการดูดีจึงเหมาะสมกับการทดลองในงานวิจัยนี้ [15]



รูปที่ 2. 14 (ก) ระบบของไหลจุลภาคเพื่อคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรีย (ข) โครงสร้างภายในของระบบคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อ [15]

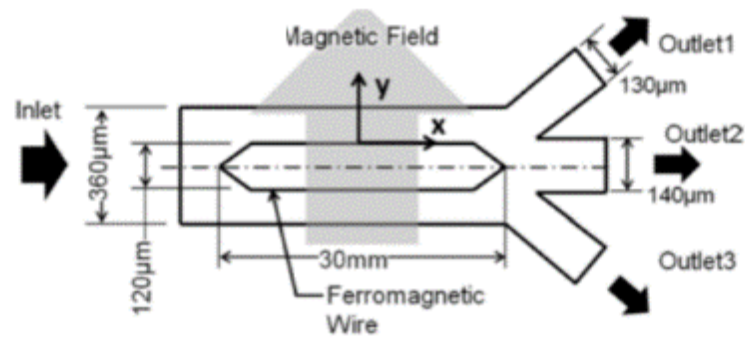
ในปี 2016 Wei-Tao Wu *et al* [16] ได้มีการพัฒนาระบบการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรีย โดยกล่าวว่าในอดีตนั้นระบบที่นำมาใช้ในการคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียนั้นอาศัยจากแม่เหล็กถาวรมาเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ซึ่งก็ยังขาดการศึกษาถึงแรงที่จะส่งผลกระทบต่อเซลล์โดยตรง และแรงของสนามแม่เหล็กที่จะต้องเกิดขึ้นภายในระบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาโดยนำวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกเข้ามาไว้ภายในระบบคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื้อ โดยมีจุดประสงค์เพื่อจะคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื้อและกำหนดให้เซลล์ที่ติดเชื้อออกไปทางออกที่กำหนดไว้โดยหลักการในการในงานวิจัยนี้เป็นการนำแม่เหล็กถาวรมาวางไว้ด้านนอกระบบ ซึ่งวางชิดกับระบบทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำกับวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งมีความคาดหวังในงานวิจัยนี้เมื่อทำการทดลองเซลล์ที่ติดเชื้อเข้ามาในระบบเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียจะถูกเหนี่ยวนำเข้ามาติดไว้ใกล้กับเฟอร์โรแมกเนติก ดังรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าจุดสีดำจะถูกแทนด้วยเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียและจุดสีเทาจะเป็นเซลล์ปกติ และได้ตั้งเป้าหมายให้ออกไปยังช่องทางที่ต้องการเพื่อจะนำเซลล์ที่ติดเชื้อไปวิเคราะห์ต่อไป



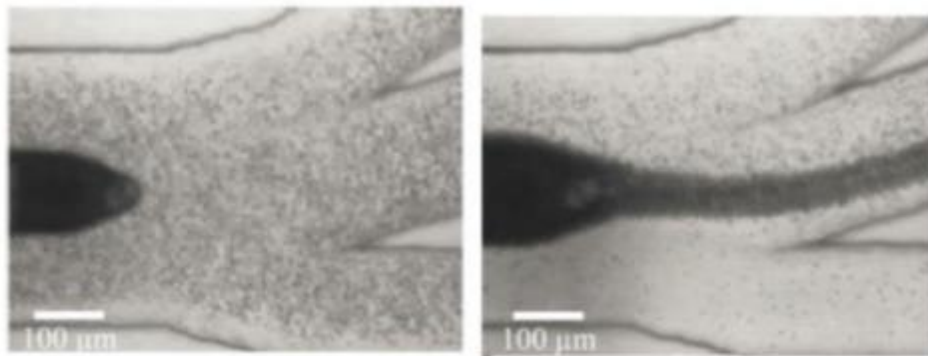
รูปที่ 2. 15 ระบบคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียโดยอาศัยการเหนี่ยวนำของแท่งเฟอร์โรแมกเนติก [16]

การออกแบบอุปกรณ์ในการคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียนี้ได้ออกแบบให้มีทางเข้าอยู่ทางเข้าเดียวและมีทางออกอยู่สามทางออกดังรูปที่ 2.16 โดยยังใช้แนวคิดของการใช้แท่งวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกเรียงเป็นแนวยาวอยู่ภายในระบบโดยเมื่อมีเซลล์ที่ติดเชื้อเข้ามาจะถูกแรงของสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำกับเฟอร์โรแมกเนติกเกิดการดึงดูดอนุภาคที่ติดเชื้อเข้าหาบริเวณที่มีเกรเดียนสูง ซึ่งจะเกิดในบริเวณที่มีเฟอร์โรแมกเนติก ทำให้แนวการเคลื่อนที่ของเซลล์ที่ติดเชื้อไปรวมกันบริเวณช่วงกลางของ

อุปกรณ์ทำให้มีแนวโน้มการที่เซลล์ติดเชื้อจะออกไปยังบริเวณทางออกที่ 2 เยอะขึ้นและทั้งนี้ยังสามารถนำอนุภาคที่ไหลออกจากบริเวณดังกล่าวไปวิเคราะห์ต่อไป ดังรูปที่ 2.17

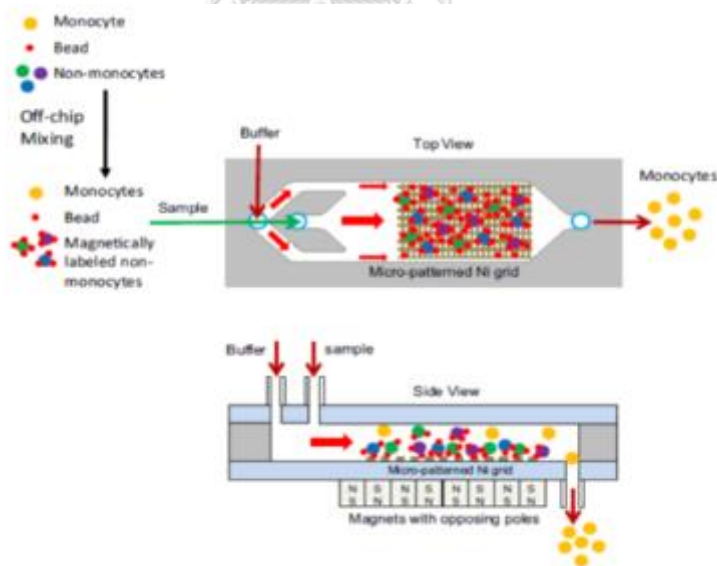


รูปที่ 2. 16 โครงสร้างภายในระบบคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรีย [16]



รูปที่ 2. 17 การเคลื่อนที่ของเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียภายในระบบคัดแยก (ซ้าย) ไม่มีสนามแม่เหล็กในระบบของไหลจุลภาค, (ขวา) มีสนามแม่เหล็กในระบบของไหลจุลภาค [16]

ในปีเดียวกันงานวิจัยของ Jeff Darabi *et al* [17] ได้ทำการศึกษาการคัดแยกเซลล์ชนิดต่างๆออกจากเลือดคน ซึ่งมีทั้งเซลล์เม็ดเลือดแดง พลาสมา เกล็ดเลือดและเซลล์เม็ดเลือดขาว โดยอาศัยแรงจากแมกนีโตโฟติกที่เกิดจากการสร้างสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร โดยงานวิจัยนี้ยังมีจุดประสงค์เพื่อต้องการคัดแยกเม็ดเลือดขาวออกจากเลือด ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มีแนวคิดเพิ่มเติมอีกโดยการนำอนุภาคพาราแมกเนติกเข้าไปผสมกับเลือดก่อนที่ฉีดเข้าสู่ระบบในการคัดแยกเทคนิคในงานวิจัยนี้คือเซลล์เม็ดเลือดแดงเดิมที่จะมีไอออนของธาตุเหล็กอยู่แล้วมีคุณสมบัติมีความเป็นแม่เหล็กอยู่บางส่วนเซลล์เม็ดเลือดขาวไม่มีความเป็นแม่เหล็กอยู่เลย ทั้งนี้ยังมีการผสมอนุภาคพาราแมกเนติกลงไปอีกเมื่อทุกอย่างเข้าไปรวมกันนำสารตัวอย่างเข้าสู่ระบบ โดยด้านล่างของอุปกรณ์คัดแยกเซลล์นั้นจะมีแม่เหล็กถาวรสร้างสนามแม่เหล็กมาเหนี่ยวนำอีกทั้งงานวิจัยนี้ยังได้เพิ่มช่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็กที่สร้างมาจากนิกเกิลเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกวางอยู่บนแม่เหล็กถาวรอีก ซึ่งเมื่ออนุภาคพาราแมกเนติกเคลื่อนที่ผ่านมายังพื้นที่ที่มีสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ และอนุภาคพาราแมกเนติกยังสามารถไปเกาะกับเซลล์เม็ดเลือดแดงและเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่พากันลงมาติดที่บริเวณของสี่เหลี่ยมขนาดเล็กที่ทำมาจากนิกเกิลในส่วนช่องทางออกสุดท้ายจะมีเซลล์เม็ดเลือดหลุดออกไปจากระบบ รูปที่ 2.18



รูปที่ 2. 18 ระบบการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดขาวออกจากระบบโดยอาศัยแรงแมกนีโตเฟอร์ริติกดักจับเซลล์เม็ดเลือดแดง [17]

2.3 สรุป

จากที่ได้กล่าวมาในการใช้เทคนิคในการตัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์ที่ไม่ติดเชื่อมมีหลากหลายเทคนิคในการตัดแยก เช่น การนำแท่งนิกเกิลมาวางไว้ด้านข้างของระบบของไหลแบบจุลภาค การอาศัยการวางตัวของแม่เหล็กมาวางต่อกันเพื่อจะให้เกิดการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กมากขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมเพิ่มมากขึ้น และเทคนิคสุดท้ายมีการสร้างโครงสร้างขนาดเล็กขึ้นมาภายในช่องทางการไหลของระบบของไหลจุลภาค อย่างไรก็ตามในงานวิจัยที่ผ่านมาจะมีปัญหาในการดักจับเซลล์ที่ติดเชื่อมในระยะแรกได้น้อยเนื่องจากคุณสมบัติของเซลล์ที่ติดเชื่อมยังแสดงออกมาได้น้อยรวมถึงความเร็วในการไหลในตำแหน่งๆ นั้นอาจจะสูงไปด้วยทำให้ประสิทธิภาพในการดักจับเซลล์ระยะแรกลดลง จึงเป็นเหตุผลที่นำมาเสนอวิธีการตัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมโดยการสร้างโครงสร้างขนาดเล็กขึ้นมาไว้ในช่องทางการไหลของระบบของไหลจุลภาค เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่รูปร่างนั้นจะมีแรงแม่เหล็กที่สูงและแรงต้านการไหลที่ต่ำเพื่อเพิ่มการดักจับเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรีย รวมไปถึงเซลล์มาลาเรียในระยะแรก

ดังนั้นแล้วงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการตัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์ที่ไม่ติดเชื่อมโดยอาศัยแรงทางแม่เหล็กโดยมีการสร้างโครงสร้างเสาขนาดเล็กเข้าไปในช่องทางการไหลของระบบจุลภาค โดยงานวิจัยนี้เลือกรูปร่างของโครงสร้างเสาขนาดเล็กกรูปร่างสี่เหลี่ยมและเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นรูปร่างวีและรูปร่างดัดเบิ้ลยูเพื่อที่จะเลื่อนหรือเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่แรงแม่เหล็กไนโตเฟอริติกและแรงต้านการไหลให้ค่าสูงที่สุดคนละตำแหน่งกันเพื่อเพิ่มความเป็นไปได้ในการดักจับเซลล์ที่ติดเชื่อมโดยอาศัยความจำเพาะเจาะจงในการของเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียที่แสดงความเป็นแม่เหล็กที่แสดงออกมาอย่างชัดเจน

ตารางที่ 2. 3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียโดยอาศัยแรงแรงแม่เหล็กไฟฟ้า

ชื่องานวิจัย	ประสิทธิภาพ		ข้อดี	ข้อเสีย
	ระยะแรก	ระยะหลัง		
Guolin Xu <i>et al.</i> 2008 [11]	95เปอร์เซ็นต์		สามารถคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงออกจากเซลล์เม็ดเลือดขาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ	ประสิทธิภาพต่ำเมื่อมีการใช้อัตราการไหลที่สูงขึ้น
J.Xia <i>et al.</i> 2011 [12]	78เปอร์เซ็นต์		สามารถคัดแยกเซลล์มะเร็งลำไส้ได้โดยอาศัยการไหลอย่างต่อเนื่อง	จำนวนของโครงสร้างขนาดเล็กมีจำนวนน้อยเกินไปอาจจะเป็นเพราะในกระบวนการขึ้นรูปที่ค่อนข้างยาก ส่งผลทำให้ได้ประสิทธิภาพในการคัดแยกน้อย
Jeonghun Nam <i>et al.</i> (2013) [13]	73 เปอร์เซ็นต์	98.3 เปอร์เซ็นต์	แยกอนุภาคที่ติดเชื้อได้ในระยะหลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ	ในระยะแรกของเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียยังแยกได้ไม่มากพอ
Minqiang Bu <i>et al.</i> 2007[14]	91 เปอร์เซ็นต์	54 เปอร์เซ็นต์	คัดแยกอนุภาคพาราแมกเนติกในอัตราการไหลที่ต่ำ	เนื่องจากมีอัตราการไหลที่สูงทำให้ดักจับอนุภาคพาราแมกเนติกได้ประสิทธิภาพได้น้อย

ชื่องานวิจัย	ประสิทธิภาพ		ข้อดี	ข้อเสีย
	ระยะแรก	ระยะหลัง		
A. Blue Martin <i>et al.</i> 2017 [15]	90 เปอร์เซ็นต์		สามารถคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียได้ในเงื่อนไขใช้อัตราการไหลที่สูง	เนื่องจากการวางตัวของสนามแม่เหล็กที่ดัดแปลงขึ้นทำให้เซลล์อาจได้รับความเสียหายจากการดักจับ
Wei-Tao Wu <i>et al.</i> 2016[16]	72 เปอร์เซ็นต์		สามารถคัดแยกเซลล์ที่เชื่อมมาลาเรียได้ในปริมาณที่มากซึ่งอาศัยการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนของเซลล์ไปยังช่องทางออกที่ต้องการ	ถ้ามีเซลล์ที่มีระยะการติดเชื้อมากหรือเพิ่งจะเริ่มการติดเชื้อทำให้เกิดการคัดแยกที่ได้ประสิทธิภาพที่ต่ำมาก

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ซึ่งจะมีความสำคัญมากในการศึกษา เช่น แมกนีโตเฟอริติก(Magnetophoresis Force) แรงต้านการไหล (Drag Force) และที่สำคัญคือการอธิบายการเก็บข้อมูลจากผลการจำลองผ่านโปรแกรม COMSOL Multiphysics® รวมไปถึงความหมายทางกายภาพของข้อมูลทางแม่เหล็กเพื่อให้เข้าใจถึงการความหมายของ สนามแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็ก และประเภทของแม่เหล็กที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นต้น เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการทำนายถึงความเป็นไปได้ในการดักจับเซลล์ที่ติดเชื้อมาหาเรียกก่อนที่จะทำการทดลอง

3.1 แรงแมกนีโตเฟอริติก (Magnetophoresis Force)

อนุภาคของแม่เหล็กจะประกอบไปด้วยขั้วเหนือขั้วใต้ โดยอนุภาคพาราแมกเนติกจะอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ ทั้งขั้วเหนือและขั้วใต้จะได้รับแรงที่ไม่เท่ากัน ทำให้เกิดแรงลัพธ์กับอนุภาคถูกเรียกว่าแรงแมกนีโตเฟอริติก โดยทั่วไปมีรูปแบบดังนี้

$$F_{MAG} = 2\pi\mu_1 R^3 \left(\frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \right) \nabla |\vec{H}|^2 \quad (3.1)$$

โดย μ_1 และ μ_2 หมายถึงความซึมได้ของสนามแม่เหล็ก (Permeability) ส่วน H คือความเข้มของสนามแม่เหล็ก

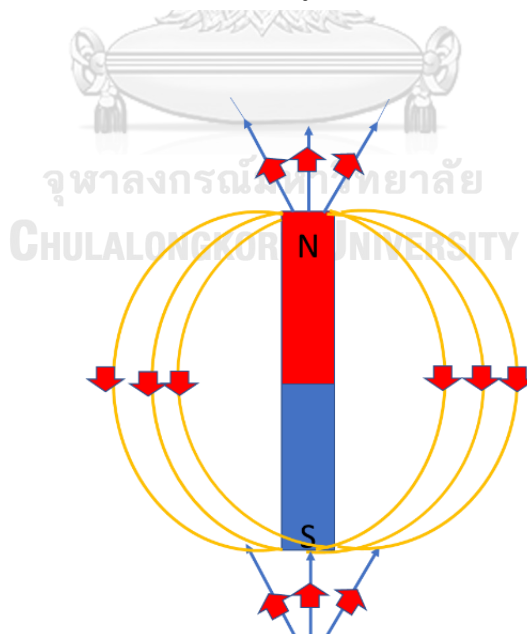
สามารถนำมาอธิบายถึงปรากฏการณ์ของแรงแมกนีโตเฟอริติกได้

- 1.แรงแมกนีโตเฟอริติกจะเกิดขึ้นได้เมื่ออนุภาคพาราแมกเนติกอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ (non-uniform) โดยขนาดของแรงแม่เหล็กจะขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือเกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กกำลังสอง
- 2.อนุภาคพาราแมกเนติกจะถูกดูดจากบริเวณที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงไปต่ำหรืออาจจะกล่าวได้ว่าค่าซึมซาบของสนามแม่เหล็กมากกว่าของไหลตัวกลาง

3.1.1 สนามแม่เหล็ก (Magnetic field)

เมื่อมีแม่เหล็กถาวรวางอยู่ ณ ที่ใดก็ตาม แม่เหล็กถาวรนั้นจะส่งอำนาจแม่เหล็กออกไปรอบตัวในบริเวณนั้น ถ้าเอาแม่เหล็กหรือวัตถุที่เป็นเหล็กเข้าไปในบริเวณนั้นจะเกิด แรงแม่เหล็กส่งมากระทำทันทีจากแม่เหล็กที่วางอยู่ก่อนนั้น อย่างนี้ถือว่าแม่เหล็กหรือสารแม่เหล็กที่เราพาเข้าไปที่หลังไปอยู่ในบริเวณซึ่งเป็น สนามแม่เหล็กของแม่เหล็กอันแรก ซึ่งถ้าถอยแม่เหล็กถาวรหรือสารแม่เหล็กนั้นออกมาให้ห่างมาก ๆ แรงแม่เหล็กที่เคยเกิดขึ้นดังกล่าวจะหมดไป นั่นคือแม่เหล็กอันแรกส่งแรงไปกระทำไม่ถึง จึงเห็นได้ว่าสนามแม่เหล็กคือ บริเวณรอบ ๆ แม่เหล็ก ซึ่งแท่งแม่เหล็กนั้นสามารถส่งอำนาจแม่เหล็กไปถึง

เส้นแรงแม่เหล็กเป็นเส้นที่แสดงทิศของสนามแม่เหล็กรอบ ๆ แท่งแม่เหล็กถาวร นอกจากนั้นยังแสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วยทิศของสนามคือ ทิศของแรงนี้กระทำกับขั้วเหนือ ในสนามแม่เหล็กเส้นแรงแม่เหล็กแสดงให้เห็นได้โดยใช้ผงเหล็กโรยรอบ ๆ แท่งแม่เหล็ก หรือระบุตำแหน่งของเข็มทิศเล็กๆ ณ จุดต่างๆ รอบๆ แท่งแม่เหล็ก การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่จุดหนึ่งแสดงได้ โดยเส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่ชิดกันเส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่ภายนอกแท่งแม่เหล็กจะทิศทางออกจากขั้วเหนือ N และวนเข้าหาขั้วใต้ S ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3. 1 การเรียงตัวของสนามแม่เหล็ก

3.1.2 ประเภทของแม่เหล็ก

ไดแมกเนติก (Diamagnetic)

คุณสมบัติของแม่เหล็กที่อ่อนแอที่สุด ซึ่งอาจจะไม่ได้อยู่ในคุณสมบัติของของถาวร ในกรณีที่มีการกระทำจากแรงภายนอกซึ่งจะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในกรณีนี้เกิดการเสียดสมดุลเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจเรียกได้ว่าค่าสภาพไวต่อสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยมากจึงเป็นผลทำให้แม่เหล็กประเภทไดแมกเนติกมีค่าความเป็นแม่เหล็กน้อยมาก

พาราแมกเนติก (Paramagnetic)

คุณสมบัติมีความเป็นแม่เหล็กสูงกว่าไดแมกเนติก ซึ่งจะมี magnetic susceptibility ในระดับ 10^{-2} เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของขั้วของอนุภาคพาราแมกเนติกที่แสดงความเป็นแม่เหล็กออกมา

เฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic)

แม่เหล็กมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กสูงที่สุด ซึ่งเป็นสภาวะที่คงความเป็นแม่เหล็กได้ แม้จะไม่มีสนามแม่เหล็ก สภาวะแบบนี้จึงเหมาะในการใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ วัสดุเหล่านี้ที่แสดงความเป็นแม่เหล็กได้ เช่น นิกเกิล เหล็ก โคบอลต์ เป็นต้น ซึ่งค่า สภาพซึมซาบของแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility) อยู่ที่ประมาณ 10^6 แม่เหล็กประเภทเฟอร์โรแมกเนติกยังสามารถแบ่งได้อีก 2 ชนิดย่อย ๆ คือ

- Hard Ferromagnetic Material หรือวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกชนิดแข็ง เป็นโครงสร้างที่มักจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงตัวเอง สามารถคงความเป็นแม่เหล็กได้นาน เช่น Nd Fe B
- Soft Ferromagnetic Material หรือวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกชนิดอ่อน เป็นโครงสร้างที่มักจะอ่อนตัวได้ง่าย สูญเสียความเป็นแม่เหล็กได้ง่าย เช่น นิกเกิล เหล็ก โคบอลต์

ตารางที่ 3. 1 ค่าความซึมซาบของชนิดวัสดุของแม่เหล็ก

วัสดุ (Material)	Relative permeability	Classification
Silver	0.99998	Diamagnetic
Aluminium	1.00002	Paramagnetic
Cobalt	250	Ferromagnetic
Nickel	600	Ferromagnetic
Iron	5000	Ferromagnetic

3.2 แรงต้านการไหล (Drag Force)

เมื่อความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่อยู่ภายในช่องทางการไหลซึ่งจะมีความแตกต่างกันจะเกิดแรงต้านขึ้นเป็นผลมาจากค่าความหนืดของของไหลที่กระทำต่อผิวอนุภาค โดยการคำนวณแรงต้านการไหล ในงานวิจัยนี้จะศึกษาไปที่ค่าความหนืดของตัวอย่างเลือด และเจาะจงไปยังที่ขนาดของเซลล์เม็ดเลือดแดงเพื่อกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ เข้าไปในโปรแกรม โดยสมการของแรงต้านการไหลแสดงดังนี้

$$F_{DRAG} = C_D \left(\frac{1}{2} \rho V^2 A \right) \quad (3.2)$$

นำสมการ (3.3) แทนลงในสมการ (3.2) ค่าการไหลภายในช่องทางการไหลแบบจุลภาคจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ C_D มีค่า

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (3.3)$$

นำทั้งสองสมการมาจัดรูปแบบใหม่จะได้สมการของแรงต้านการไหล

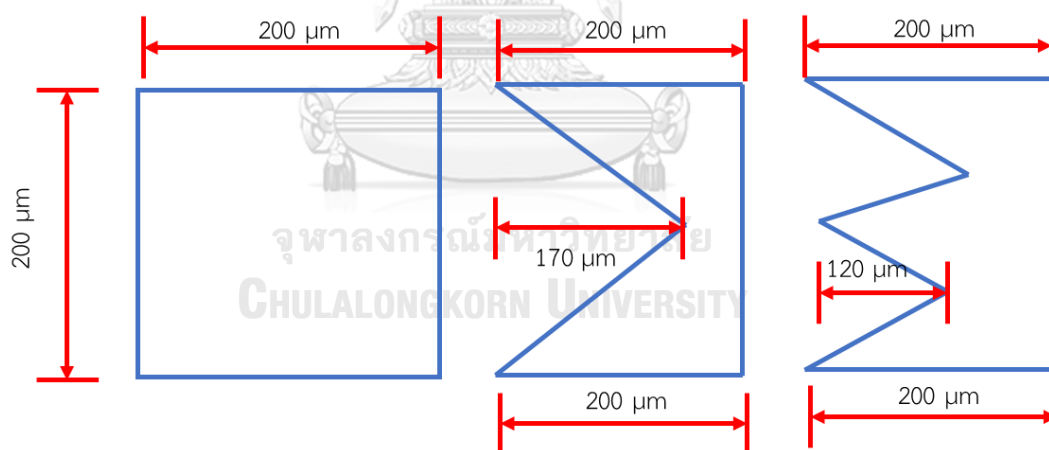
$$F_D = \frac{12\mu V A}{D} \quad (3.4)$$

โดยที่ μ คือความหนืดของของไหล V คือความเร็วตำแหน่งนั้น A คือพื้นที่ของเซลล์เม็ดเลือดที่ติดเชื้อ และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ที่ติดเชื้อ ระบบจะดักจับอนุภาคที่ติดเชื้อมาลาเรียเมื่อ

ได้รับขนาดของแรงแม่เหล็กมีขนาดสูงเมื่อเทียบกับแรงต้านการไหลของโครงสร้างเสาขนาดเล็กจะเหนี่ยวนำกับสนามแม่เหล็กและสร้างกระแสวนของสนามแม่เหล็กขึ้นมาได้ ดังนั้นเมื่อดัดแปลงที่ติดเชื่อมมาลาเรียจะถูกดักจับติดไว้ที่โครงสร้างเสาขนาดเล็กนี้ ดังนั้นแนวทางการออกแบบคือการใช้รูปร่างของโครงสร้างที่เหนี่ยวนำทำให้เกิดตำแหน่งที่มีขนาดของแรงแม่เหล็กสูงและขนาดของแรงต้านการไหลต่ำได้ ซึ่งทั้งสองสมการจึงนำเข้ามาวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการดักจับเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียเบื้องต้นได้

3.3 การกำหนดโครงสร้างการจำลองในคอมพิวเตอร์

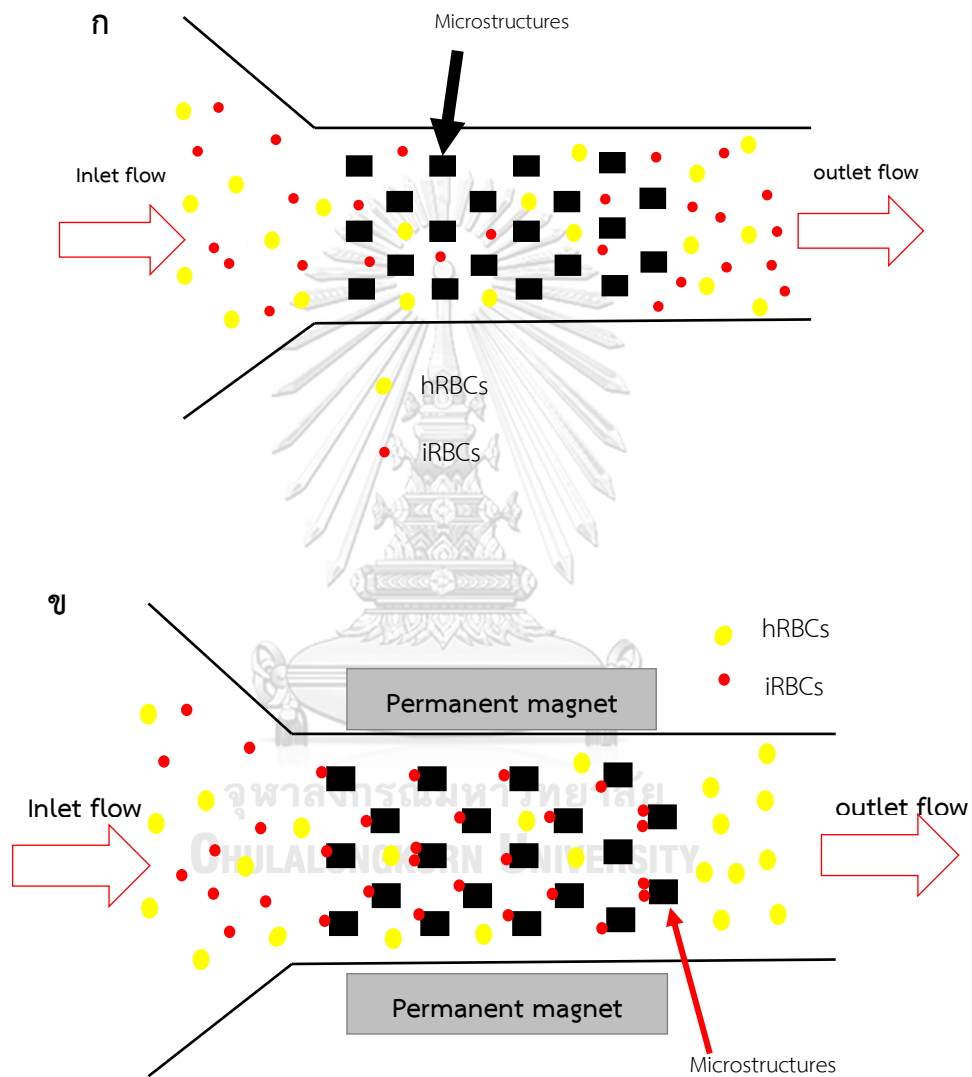
หัวข้อที่จะกล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างในการจำลองในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics® และอธิบายถึงการเก็บข้อมูลในรูปแบบต่าง ๆ ของโครงสร้างขนาดเล็ก ซึ่งในการศึกษานี้ได้แบ่งคิดออกเป็น 2 Module คือ AC/DC Module Magnetic Field No Current และ Laminar Flow โดยการออกแบบโครงงานของงานวิจัยนี้ได้ออกแบบรูปร่างไว้ 3 รูปแบบ คือ สี่เหลี่ยม รูปร่างวี และรูปร่างดัดเบิ้ลตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3. 2 รูปร่างของโครงสร้างขนาดเล็กในรูปแบบต่าง รูปร่างสี่เหลี่ยม, รูปร่างวีและรูปร่างดัดเบิ้ล

จากนั้นเก็บข้อมูลจากโปรแกรม COMSOL Multiphysics® เพื่อนำข้อมูลออกมาหาแรงแม่เหล็กและแรงต้านการไหลซึ่งในงานวิจัยนี้ บริเวณของโครงสร้างเสาขนาดเล็กโดยทางโปรแกรมการจำลอง ได้นำข้อมูลขนาดของแรงแม่เหล็กออกมามีชื่อว่า Magnetic Field No Current. (Norm.H) ซึ่งในเชิงความหมายคือขนาดของสนามแม่เหล็กในบริเวณนั้น ๆ ซึ่งจะมีขนาดเพียงอย่างเดียวเท่านั้น หรือกล่าวอีกอย่างว่าแรงของสนามแม่เหล็กเป็นปริมาณสเกลลาร์ โดยต้องสอดคล้องกับการเก็บข้อมูล

ของแรงต้านการไหลโดยในงานวิจัยนี้หมายถึงต้องเก็บข้อมูลในตำแหน่งเดียวกันทั้งสองแรง เพื่อจะได้เปรียบเทียบถึงความเป็นไปได้ถึงการดักจับเซลล์ ที่งานวิจัยนี้จะได้นำเสนอในบทต่อไป ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างการเก็บข้อมูลของรูปร่างสี่เหลี่ยมมาคำนวณหาแรงแม่เหล็กและแรงการไหลเพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบ



รูปที่ 3. 3 รูปจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ติดเชื่อมมาลาเรียเข้าหาโครงสร้างเสาขนาดเล็ก (ก) กรณีไม่มีแม่เหล็ก (ข) กรณีมีแม่เหล็ก

ในรูปที่ 3.3 เป็นรูปแบบจำลองของโครงสร้างขนาดเล็กที่อยู่บนกระจกสไลด์ซึ่งจะมีการวางตัวสลับไปมาภายในช่องทางการไหลโครงสร้างเสาขนาดเล็กนี้ ถูกสร้างมาจากวัสดุเฟอร์โรแมกนีติก

แบ่งเป็น 2 กรณีได้แก่ กรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวรซึ่งจะไม่ทำให้เกิดแรงแมกนีโตเฟอริติกส่งผลให้ไม่เกิดการดักจับของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อทั้งเซลล์ที่ติดเชื้อและไม่ติดเชื้อ ไหลออกไปยังช่องทางออกของอุปกรณ์และกรณีต่อมาจะมีการใส่แรงแมกนีโตเฟอริติกเข้าไป ซึ่งจะแสดงความเป็นแม่เหล็กได้ก็ต่อเมื่อมีแม่เหล็กถาวรมาเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นเมื่อมีเซลล์ที่ติดเชื้อไหลผ่านเข้ามา ก็มีความเป็นไปได้ในการดักจับเซลล์ที่ติดเชื้อให้ติดอยู่บริเวณรอบ ๆ โครงสร้างขนาดเล็กและส่วนที่เซลล์ที่ไม่ติดเชื้อสามารถไหลออกไปได้

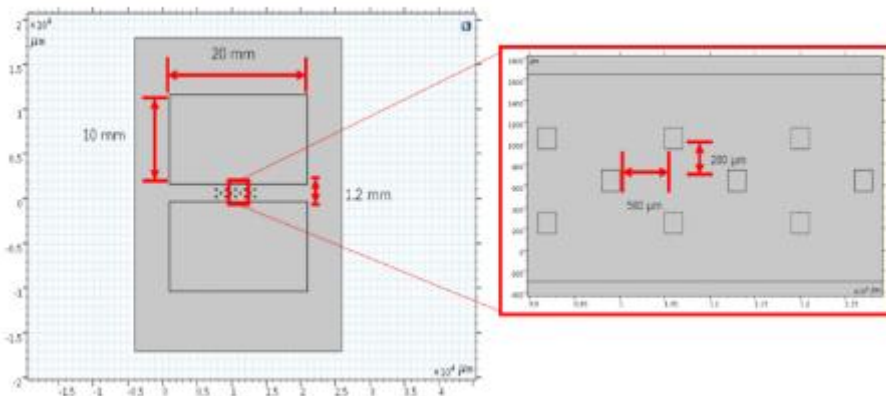
3.4 การจำลองสนามแม่เหล็ก

ในการศึกษานี้ได้ออกแบบรูปร่างเสาขดทั้งหมด 3 รูปร่างคือ รูปร่างสี่เหลี่ยม รูปร่างวี และรูปร่างดัดเบิ้ลยู โดยโครงสร้างเสาขนาดเล็กมีขนาด 200×200 ไมโครเมตรมีระยะห่างระหว่างแท่งขดเท่ากับ 500 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 ในงานวิจัยนี้ได้เลือกการนำเสนอการแสดงผลจากการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจะเป็นแนวทางในการศึกษาเทียบกับผลการทดลองโดยเลือกการนำเสนอเป็นสองมิติเพื่อจะให้เห็นถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ง่ายกว่า โดยได้กำหนดเงื่อนไขของการจำลองสนามแม่เหล็กไว้ ดังนี้ฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทำมาจากนีโอไดเมียมมีค่า 0.4 เทสลา และแม่เหล็กถาวรมีขนาด $5 \times 5 \times 5$ มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่งานวิจัยนี้เลือกมาใช้ทดลอง

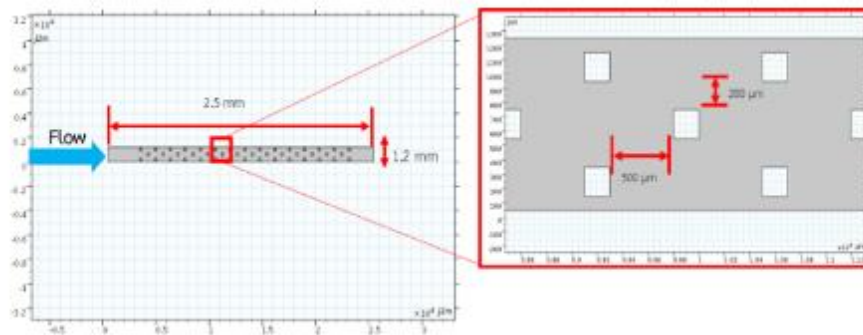
เมชรูปสามเหลี่ยมภายในการจำลองสนามแม่เหล็กซึ่งมีจำนวนเอลิเมนต์ประมาณ 1 ล้านเอลิเมนต์ มีการกำหนดค่าสูงสุดของเอลิเมนต์ที่ 50 ไมโครเมตรและค่าต่ำสุดของเอลิเมนต์ที่ 0.7 ไมโครเมตร และได้ปรับจำนวนเอลิเมนต์รอบบริเวณรูปร่างขดให้มีความละเอียดสูงกว่าช่องทางไหล โดยทำการศึกษาอิทธิพลของจำนวนเอลิเมนต์ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3. 2 การคำนวณที่เอลิเมนต์ต่างกันของสนามแม่เหล็ก

Number of elements	Magnetic field Norm,H [A/m]
1.089×10^6	3.620×10^5
1.118×10^6	4.239×10^5
1.137×10^6	4.720×10^5
1.168×10^6	5.505×10^5

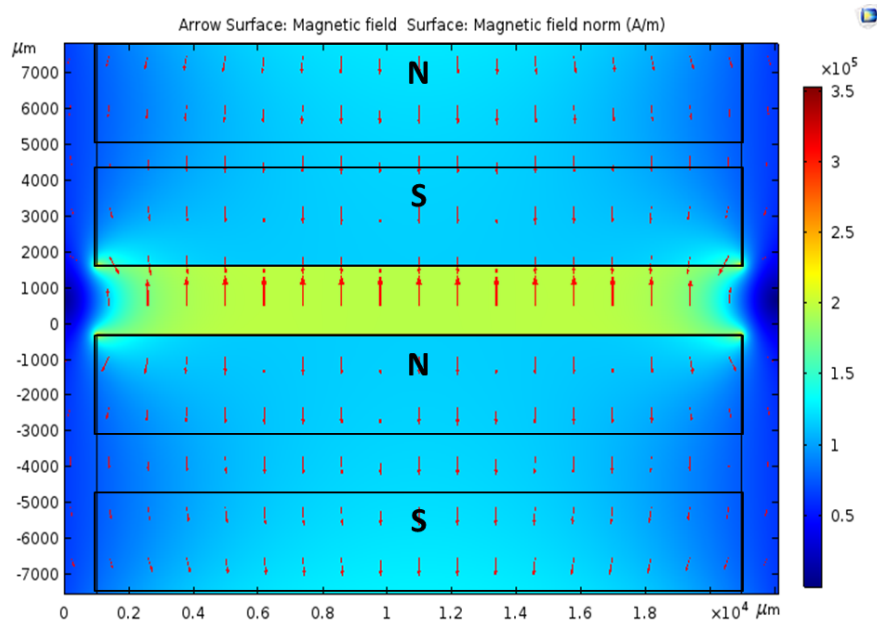


รูปที่ 3. 4 ระบบที่ทำการออกแบบการจำลองสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3. 5 ระบบที่ทำการออกแบบจำลองการไหลซึ่งใช้ค่าอัตราการไหลที่ 0.04 มิลลิเมตรต่อวินาที

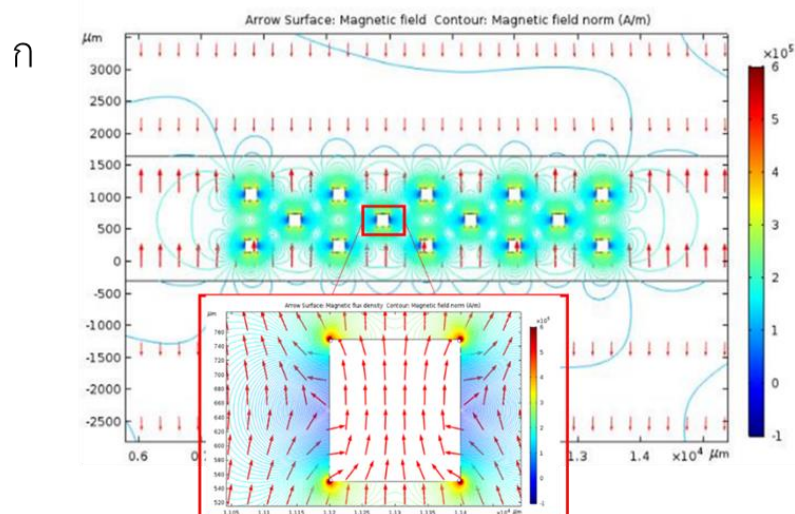
ผลการจำลองสนามแม่เหล็กเบื้องต้นในงานวิจัยนี้เริ่มจากการกำหนดทิศของสนามแม่เหล็กในโปรแกรมจำลองซึ่งงานวิจัยนี้เลือกที่จะกำหนดให้มีแม่เหล็กถาวร 2 ก้อนแต่ละก้อนถูกกำหนดให้มีขั้วที่ต่างกันเข้าหาทำให้เกิดสนามแม่เหล็กตามทิศทางแนวตั้ง และแสดงผลเป็นขนาดของสนามแม่เหล็ก (Norm.H) พบว่าในบริเวณกรอบสีแดงมีขนาดของสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอเนื่องจากในตำแหน่งนั้นไม่มีวัสดุที่มีอนุภาคพาราแมกเนติกไปวางไว้ รูปที่ 3.6

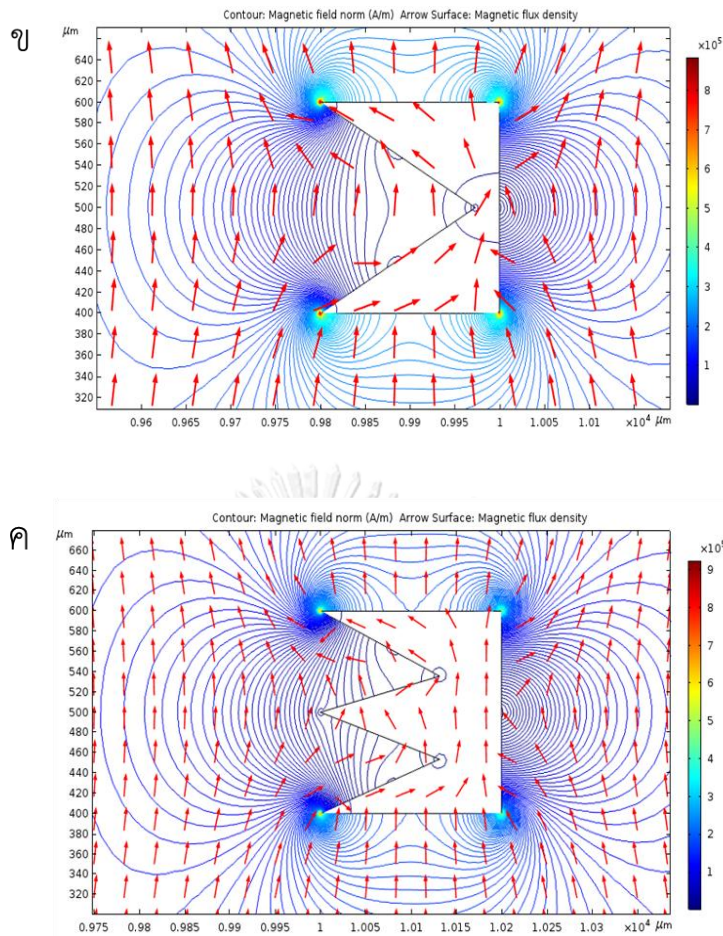


รูปที่ 3. 6 ขนาดของสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอถูกเหนี่ยวนำด้วยแรงจากแม่เหล็กถาวร

ผลของรูปร่างนิกเกิลรูปสี่เหลี่ยมซึ่งจำลองผ่านโปรแกรม COMSOL Multiphysics แสดงถึงขนาดของสนามแม่เหล็กที่ภายในมีโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่เป็นวัสดุของเฟอร์โรแมกเนติกอยู่ในสนามแม่เหล็กทำให้สนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กทิศทางของแม่เหล็กที่พุ่งไปยังบริเวณที่มีเกรเดียนสูง ซึ่งบริเวณมุมของโครงสร้างเสาขนาดเล็กจะมีขนาดของสนามแม่เหล็กที่สูง ดังนั้นสำหรับรูปร่างสี่เหลี่ยมนี้มีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กอย่างสม่ำเสมอ และสนามแม่เหล็กจะสูงขึ้นเมื่อเข้าไปใกล้กับมุมของโครงสร้างเสาขนาดเล็กรูปร่างสี่เหลี่ยม (รูปที่ 3.7ก)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 3. 7 การจำลองสนามแม่เหล็กตามโครงสร้างเสาขนาดเล็ก (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวีและ (ค) รูปร่างดัดเบิ้ลยู

สำหรับสนามแม่เหล็กของโครงสร้างเสาขนาดเล็กรูปร่างวี แสดงผลออกมาเป็นขนาดของสนามแม่เหล็กซึ่งจะมีขนาดที่สูงที่สุดอยู่ตามมุมของโครงสร้างแล้วเกรเดียนจะสูงขึ้นเมื่อเข้าใกล้กับโครงสร้างนิกเกิลมาก ๆ และในรูปร่างโครงสร้างเสาขนาดเล็กรูปร่างวีจะเห็นได้ว่าภายในส่วนเว้าของโครงสร้างจะมีการแสดงขนาดของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในเนื่องจากอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (รูปที่ 3.7ข)

และสำหรับโครงสร้างเสาขนาดเล็กรูปร่างดัดเบิ้ลยู มีการกระจายตัวคล้ายคลึงกับสนามแม่เหล็กในแท่งนิกเกิลรูปร่างสี่เหลี่ยมและรูปร่างวี (รูปที่ 3.7ค) ซึ่งการแสดงผลแสดงออกมาเป็นขนาดของสนามแม่เหล็กพบว่าตามมุมของโครงสร้างเสาขนาดเล็กรูปร่างดัดเบิ้ลยูจะมีขนาดของสนามแม่เหล็กที่สูงอยู่ที่บริเวณที่มุมของโครงสร้าง ซึ่งในรูปร่างดัดเบิ้ลยูยังพบอีกว่าในบริเวณส่วนเว้าด้านในของโครงสร้างมีขนาดของสนามแม่เหล็กอยู่

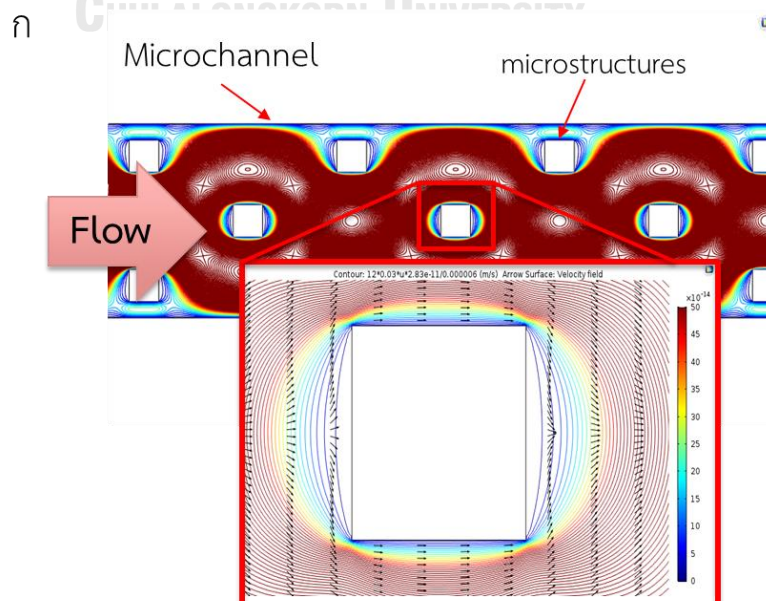
3.5 การจำลองรูปแบบของสนามความเร็ว

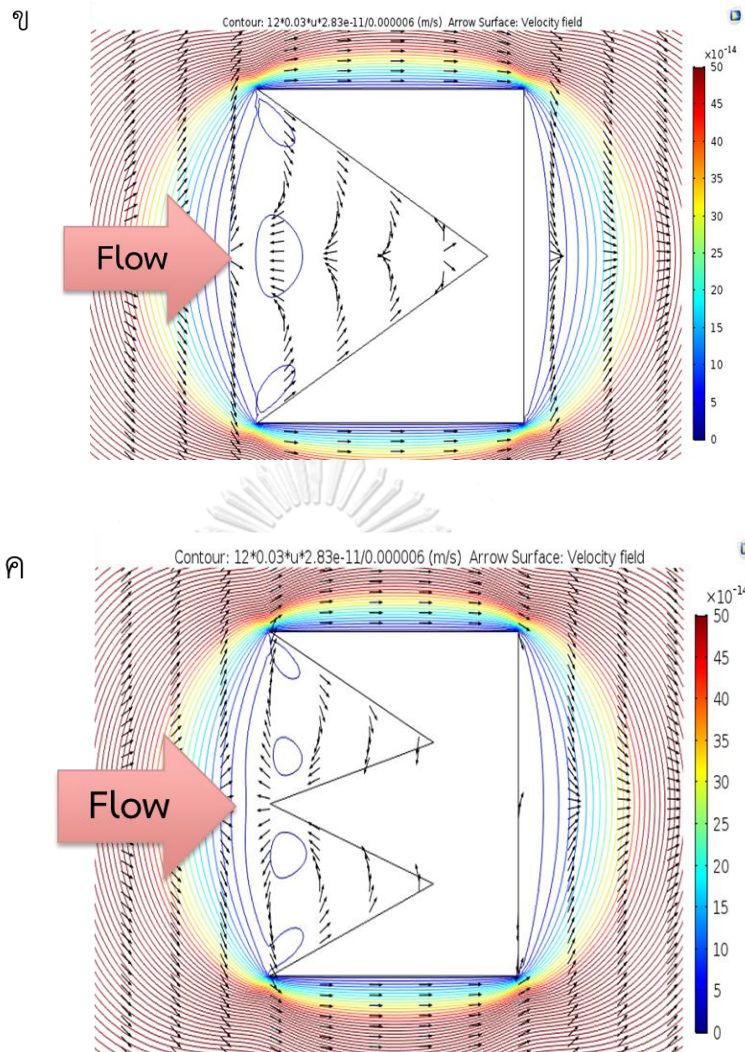
ในการศึกษานี้ได้กำหนดอัตราการไหลที่ 0.04 มิลลิเมตรต่อวินาที การจำลองสนามความเร็วภายในช่องทางการไหลที่มีโครงสร้างเสาขนาดเล็กรูปร่างต่างกันที่ขวางทางการไหลทำให้เกิดสนามความเร็วตามแนวนอน โดยสนามความเร็วเมื่อไหลผ่านโครงสร้างเสาขนาดเล็กทั้งสามรูปร่างจะไม่ค่อยแตกต่างกัน ดังรูป 3.8 (ก-ค) การแสดงผลของสนามความเร็วภายในช่องทางการไหลขนาดเล็กนี้ งานวิจัยนี้ได้เลือกการแสดงผลออกมาเป็นการแสดงผลของแรงต้านการไหล ซึ่งนำสมการที่ 3.4 มาเพิ่มลงในโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์

เมชรูปสามเหลี่ยมภายในการจำลองสนามความเร็วมีจำนวนเอลิเมนต์ประมาณ 2 ล้านเอลิเมนต์ มีการกำหนดค่าสูงสุดของเอลิเมนต์ที่ 10 ไมโครเมตรและค่าต่ำสุดที่ 0.1 ไมโครเมตร และได้ปรับจำนวนเอลิเมนต์รอบบริเวณรูปร่างนิกเกิลสูงกว่าช่องทางการไหล โดยทำการศึกษาอิทธิพลของจำนวนเอลิเมนต์ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การคำนวณที่เอลิเมนต์ที่ต่างกันของสนามความเร็ว

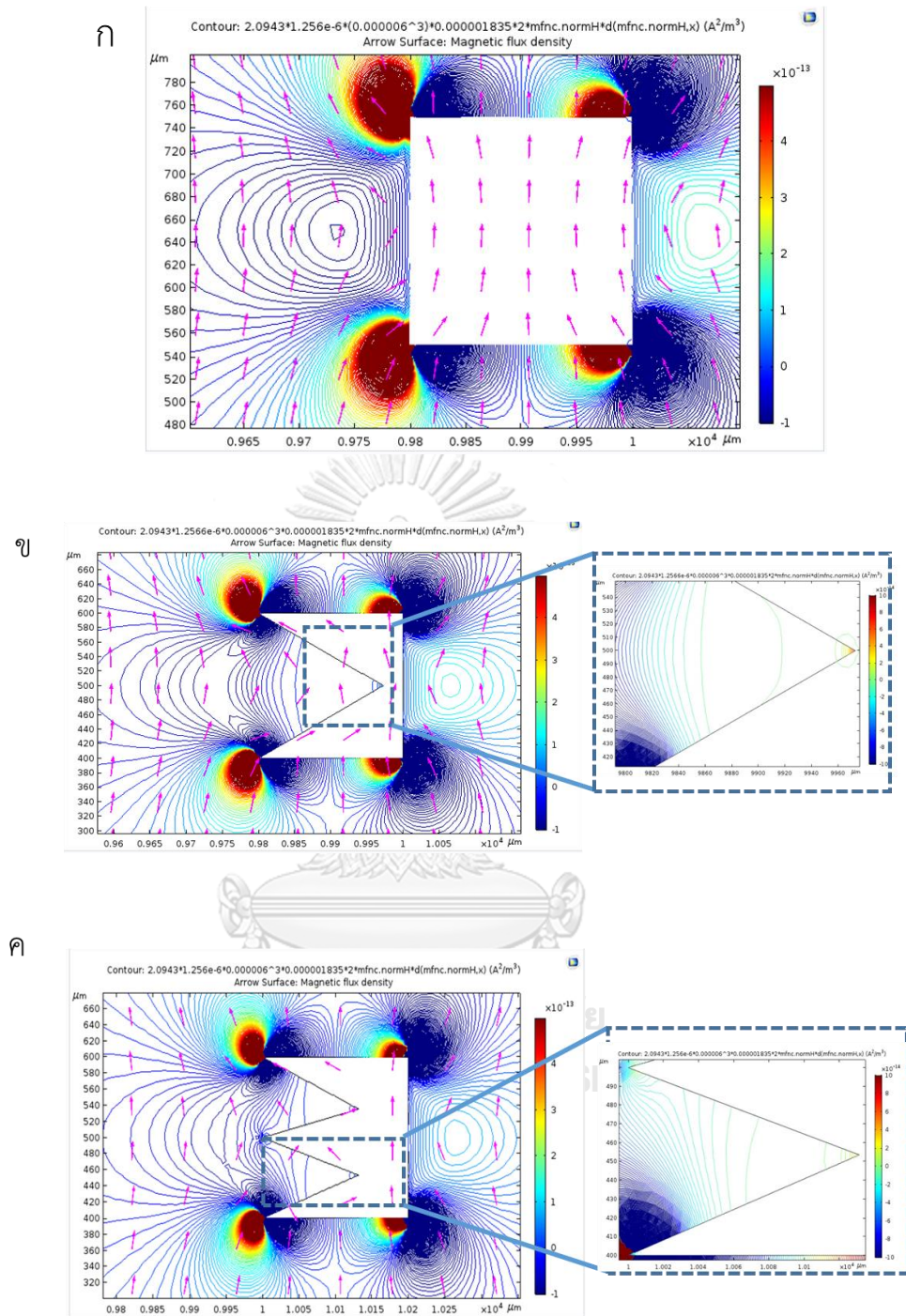
Number of elements	Velocity field, x, component [m/s]
1.578×10^6	1.374×10^{-4}
2.078×10^6	1.385×10^{-4}
2.581×10^6	1.397×10^{-4}





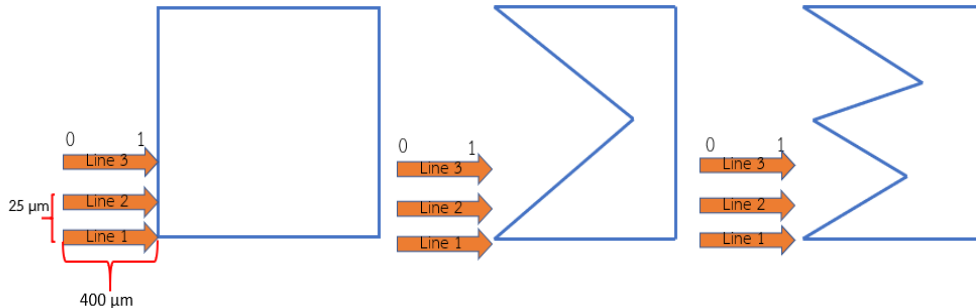
รูปที่ 3. 8 การจำลองสนามความเร็วผ่านรูปร่างนิกเกิล (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวีและ(ค)รูปร่าง
 ดับเบิ้ลยู

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกที่จะแสดงผลออกมาเป็นแรงแมกนีโตเฟอริติกซึ่งใช้สมการที่ 3.1 เพิ่มลงไป
 ในคำสั่งของโปรแกรมการจำลอง พบว่าแรงแมกนีโตเฟอริติกมีค่าที่สูงสุดตามมุมของโครงสร้างเสา
 ขนาดเล็ก ซึ่งจะพบอีกว่ารูปร่างของโครงสร้างเสาขนาดเล็กตามมุมจะมีเกรเดียนที่สูงมากทั้งสาม
 รูปร่างมีแนวโน้มที่คล้ายกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จำเป็นต้องเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างของการ
 เปลี่ยนรูปร่างของโครงสร้างเสาขนาดเล็กจึงเลือกที่จะเก็บข้อมูลตามแนวเส้น ซึ่งจะแสดงผลในหัวข้อ
 ถัดไปโดยเบื้องต้นของการเปรียบเทียบคือนำค่าของแรงแมกนีโตเฟอริติกและแรงต้านการไหลใน
 ตำแหน่งเดียวกันมาเปรียบเทียบกันเก็บข้อมูลตามแนวนอน รูปที่ 3.10 และ เก็บข้อมูลตามแนวตั้ง รูป
 ที่ 3.12



รูปที่ 3. 9 การจำลองแรงแมกนีโตเฟอริติกที่เหนี่ยวนำกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กกำหนดการแสดงเป็นแรงแมกนีโตเฟอริติก (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวีและ(ค) รูปร่างดับเบิลยู

3.6 การเก็บข้อมูลของสนามแม่เหล็กและสนามความเร็ว



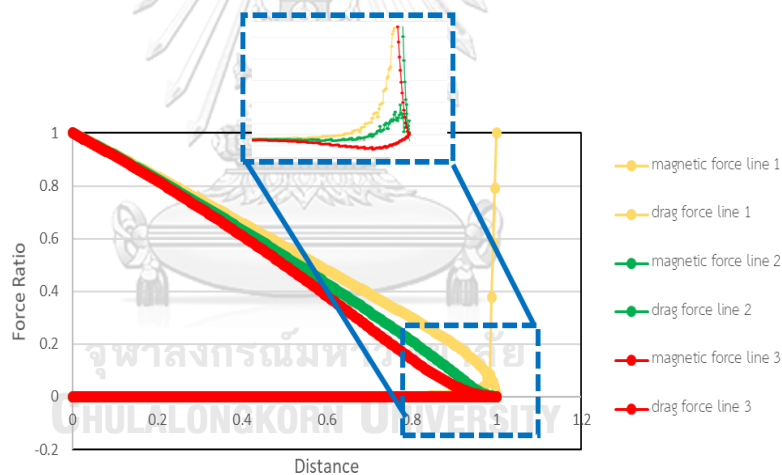
รูปที่ 3. 10 การเก็บข้อมูลตามแนวนอนเพื่อนำไปเปรียบเทียบข้อมูลของสนามแม่เหล็กและสนามความเร็ว

เมื่อเก็บข้อมูลสนามแม่เหล็กและความเร็วในตำแหน่งตามแนวนอน X-direction เส้นล่างสุด, เส้นกลาง และเส้นบน เพื่อมาคำนวณและเปรียบเทียบขนาดแรงแม่เหล็กและแรงต้านการไหลในตำแหน่งเดียวกัน ตำแหน่งสัมพัทธ์ Distance ratio จะเริ่มจาก 0 ไปจนถึง 1 ซึ่งเป็นระยะเริ่มต้นที่ห่างจากรูปร่างนิกเกิล 400 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 3.10 จนถึงระยะสุดท้ายที่ติดกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กขนาดของแรงทั้งสองคำนวณจากสมการที่ 3.1 และ 3.4 ซึ่งเป็นค่าของแรงแมกนีโตเฟอริติกและแรงต้านการไหลตามลำดับ แล้วนำมาหารด้วยค่าสูงสุดของมุมแต่ละรูปร่างเพราะบริเวณตรงมุมมีแรงแมกนีโตเฟอริติกสูงที่สุดและแรงต้านการไหลจะมีค่าสูงที่สุดที่บริเวณตำแหน่งที่ห่างออกไปจากโครงสร้างเสาขนาดเล็กซึ่งแต่ละเส้นจะทำให้ได้ขนาดของแรงสัมพัทธ์ Force ratio ซึ่งการคำนวณนี้สนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับการไหล

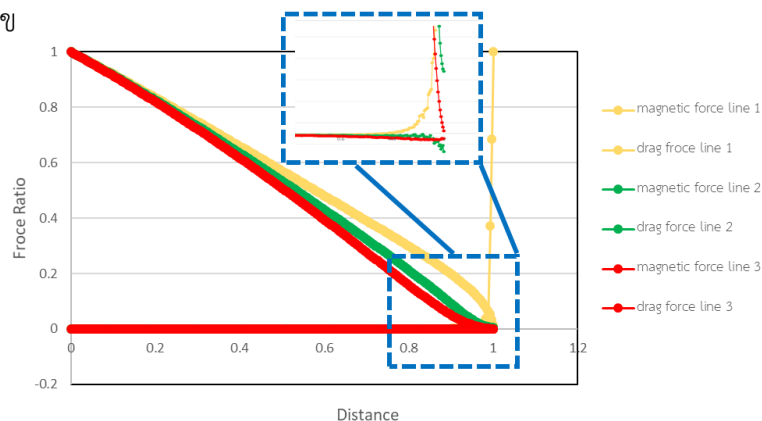
ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลทั้งขนาดของแรงแม่เหล็กและแรงต้านการไหลนำมาเปรียบเทียบในกราฟโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง Distance ratio กับ Force ratio ได้แบ่งการเปรียบเทียบระหว่างแรงแม่เหล็กและแรงต้านการไหลสำหรับโครงสร้างเสาขนาดเล็กรูปร่างสี่เหลี่ยมพบว่าแรงแมกนีโตเฟอริติกรูปร่างสี่เหลี่ยมที่ตำแหน่งการเก็บข้อมูลด้านบนในระยะที่ 0.5 เป็นต้นไปพบว่าแรงแมกนีโตเฟอริติกมีความเป็นลบ Negative มาก ซึ่งเกิดในโครงสร้างเสาขนาดเล็กรูปร่างสี่เหลี่ยมจะสร้างแรงผลักให้ออกมากขึ้น (รูปที่ 3.11ก) ทำให้อนุภาคหรือเซลล์ที่เคลื่อนที่ผ่านในบริเวณนี้อาจจะไม่มือนุภาคหรือเซลล์มาติดในบริเวณดังกล่าวได้ และเมื่อตำแหน่งขยับเข้าใกล้กับโครงสร้างเสาขนาดเล็กแรงแมกนีโตเฟอริติกยิ่งเข้าใกล้ศูนย์ในส่วนของการเก็บข้อมูลเส้นล่างซึ่งมีแรงแมกนีโตเฟอริติกที่สูงบริเวณมุมของรูปร่างสี่เหลี่ยมทำให้เกรเดียนต์เป็นบวก Positive มากขึ้นเมื่อเข้าใกล้โครงสร้างรูปร่างสี่เหลี่ยมที่บริเวณมุม และในส่วนของการไหล พบว่ามีแนวโน้มของขนาดลดลงอย่างต่อเนื่องและมีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเข้าใกล้กับโครงสร้างรูปร่างสี่เหลี่ยม ต่อมาโครงสร้างเสาขนาดเล็กรูปร่างวี พบว่าแรงแมกนีโตเฟอริติกรูปร่างวีตำแหน่งการเก็บข้อมูลด้านบนในระยะที่ 0.5

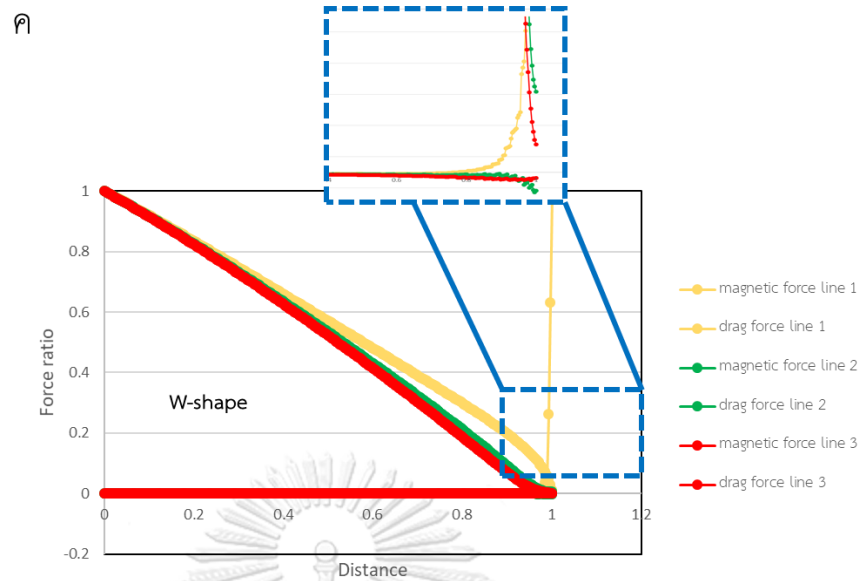
เป็นต้นไปพบว่าแรงแมกนีโตเฟอริติกมีความเป็นลบ Negative น้อยมาก (รูปที่ 3.11ข) โครงสร้างเสาขนาดเล็กรูปร่างวีแทบจะไม่เกิดแรงผลักให้ออกมาให้อุณหภูมิหรือเซลล์ที่เคลื่อนที่ผ่านในบริเวณนี้อาจจะมีการเข้ามาติดกับโครงสร้างรูปร่างวีได้ในส่วนของตำแหน่งการเก็บข้อมูลเส้นล่าง ซึ่งมีแรงแมกนีโตเฟอริติกที่สูงบริเวณมุมของรูปร่างวีทำให้เกรเดียนเป็นบวก Positive มากขึ้น เมื่อเข้าใกล้โครงสร้างรูปร่างวีที่บริเวณมุมและในส่วนของแรงต้านการไหล พบว่ามีแนวโน้มของขนาดลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเข้าใกล้กับโครงสร้างรูปร่างวี และการเปรียบเทียบโครงสร้างนิกเกิลรูปร่างดับเบิลยูพบว่าแรงแม่เหล็กที่แนวการเก็บข้อมูลที่ตำแหน่งตรงกลางและด้านบนมีแนวโน้มใกล้เคียงกับรูปวีพบว่าทั้งสองตำแหน่งมีแรงผลักที่น้อยมาก (รูปที่ 3.11ค) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปร่างสี่เหลี่ยมทั้งนี้ยังพบอีกว่าจากกราฟที่แสดงผลออกมาที่บริเวณตำแหน่งใกล้กับโครงสร้างทั้งรูปร่างวีและดับเบิลยูยังมีแรงแมกนีโตเฟอริติกสูงกว่ารูปร่างสี่เหลี่ยม ในส่วนของตำแหน่งการเก็บข้อมูลเส้นล่างซึ่งมีแรงแมกนีโตเฟอริติกที่สูงบริเวณมุมของรูปร่างดับเบิลยูทำให้เกรเดียนเป็นบวก Positive มากขึ้นเมื่อเข้าใกล้โครงสร้างรูปร่างดับเบิลยูที่บริเวณมุม

ก



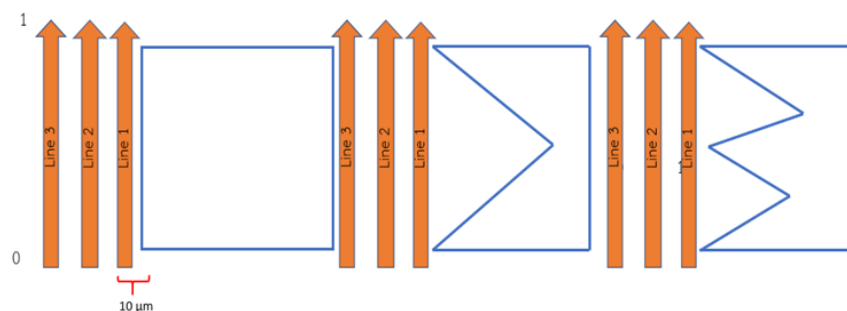
ข





รูปที่ 3. 11 แรงแมกนีโตเฟอริติกและแรงต้านการไหลในทิศทางตามแนวนอนของโครงสร้าง (เก็บข้อมูลตามแนวนอน) (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวี และ (ค) รูปร่างดับเบิลยู

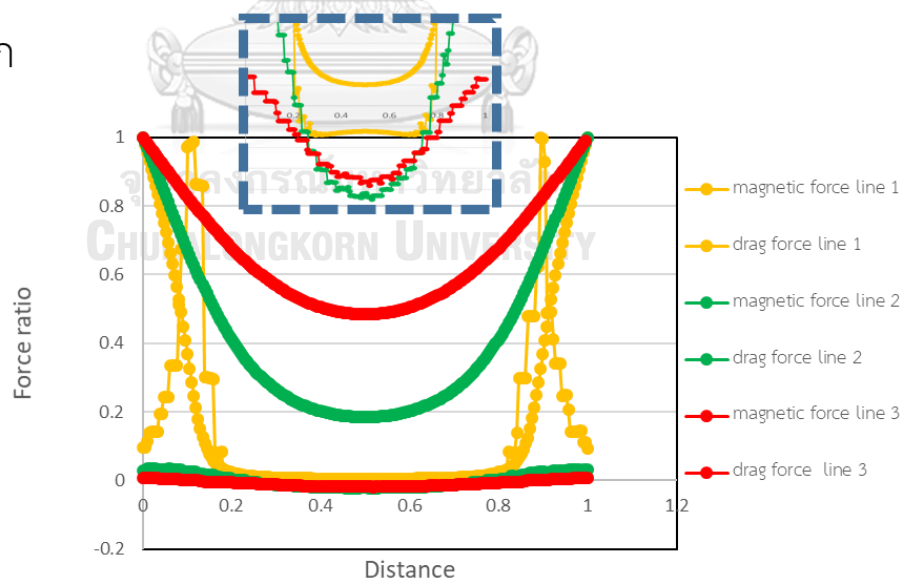
การวิเคราะห์ผลในขั้นต่อมาในงานวิจัยนี้ได้เลือกการวิเคราะห์โดยการเก็บข้อมูลตามแนวตั้ง Y-direction หรือเก็บข้อมูลขวางทางการไหล มีจุดประสงค์เพื่อนำมาเปรียบเทียบและแปรผลให้สอดคล้องหรือเป็นแนวทางในการทดลอง โดยกำหนดการเก็บข้อมูลจาก 0 ถึง 1 มีการเก็บข้อมูลต่ำกว่ามุมของโครงสร้างด้านล่างลงไป 30 ไมโครเมตร และเก็บข้อมูลเกินจากมุมด้านบนขึ้นไป 30 ไมโครเมตรเช่นเดียวกัน โดยทำการเปรียบเทียบทั้งแรงแมกนีโตเฟอริติกและแรงต้านการไหล Force ratio ซึ่งเป็นระยะเริ่มต้นที่ห่างจากรูปร่างนิกเกิล 10 ไมโครเมตรจากนั้นเก็บออกไปอีกสามชุดข้อมูล ดังรูปที่ 3.12 แล้วนำข้อมูลมาหารด้วยค่าสูงสุดของมุมแต่ละรูปร่างเพราะบริเวณตรงมุมมีแรงแมกนีโตเฟอริติกสูงที่สุด Force ratio

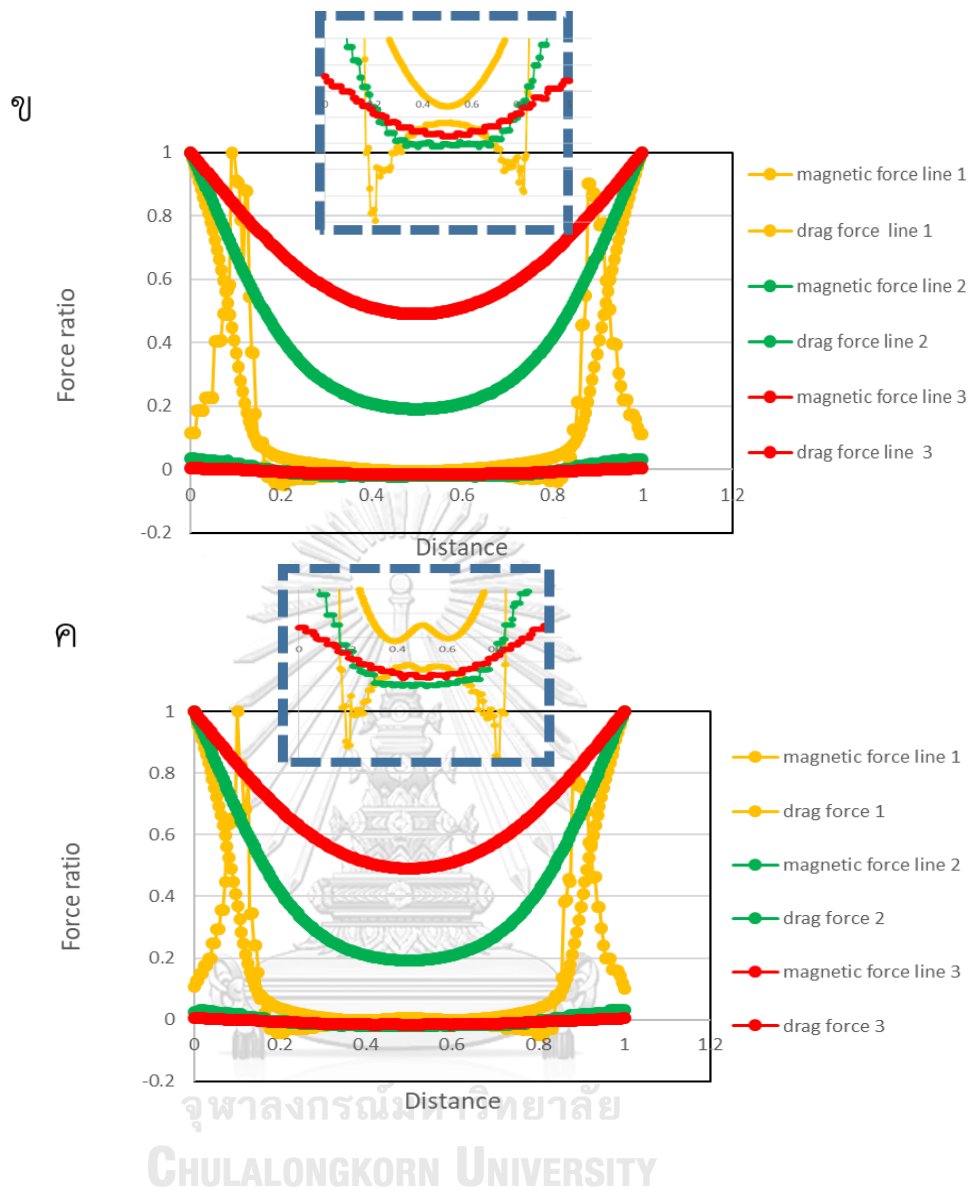


รูปที่ 3. 12 การเก็บข้อมูลตามแนวตั้งเพื่อนำไปเปรียบเทียบข้อมูลของสนามแม่เหล็กและสนามความเร็ว

ผลการเปรียบเทียบระหว่างแรงแมกนีโตเฟอริติกและแรงต้านการไหลในทิศทางแนวนอน ซึ่งมีการเก็บข้อมูลตามแนวตั้ง ในรูปร่างโครงสร้างสี่เหลี่ยมมีแรงแมกนีโตเฟอริติกที่สูงอยู่ที่บริเวณมุมของโครงสร้างนั้น (รูปที่3.13ก) แสดงถึงเมื่ออนุภาคหรือเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อเคลื่อนที่เข้ามาจะถูกดูดเข้าไปติดตามบริเวณมุมทั้งสองของรูปร่างสี่เหลี่ยมได้ แต่บริเวณด้านข้างของสี่เหลี่ยมอาจจะมีการอนุภาคหรือเซลล์ที่ติดเชื้อมาติดที่โครงสร้างได้น้อย และแรงต้านการไหลจะมีแรงต้านที่สูงเมื่อมีระยะที่ห่างออกไปจากโครงสร้าง จากนั้นพอขยับเข้าใกล้กับโครงสร้างแรงต้านการไหลจะมีค่าลดลง และจะมีแรงต้านการไหลสูงที่มุมของโครงสร้างรูปร่างสี่เหลี่ยม ต่อมาเป็นโครงสร้างเสาขนาดเล็กรูปรางวี (รูปที่3.13ข) พบว่าแรงแมกนีโตเฟอริติกรูปรางวีตำแหน่งการเก็บข้อมูลตามแนวตั้ง พบว่าเมื่ออนุภาคหรือเซลล์ที่ติดเชื้อเคลื่อนที่เข้ามาเกิดแรงดูดเข้าหาบริเวณมุมของโครงสร้างรูปรางวี และบริเวณช่วงตรงกลางของโครงสร้างยังเกิดแรงผลักที่น้อยกว่าทำให้มีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ผ่านในบริเวณนี้แล้ว อาจจะมีการเข้ามาติดกับโครงสร้างรูปรางวีและการเปรียบเทียบโครงสร้างนิกเกิลรูปรางดับเบิลยูที่เก็บข้อมูลตามแนวตั้งของโครงสร้าง พบว่าแรงแม่เหล็กที่แนวการเก็บข้อมูลมีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างรูปรางวีมีแรงแมกนีโตเฟอริติกที่สูงตามบริเวณมุมของโครงสร้างรูปดับเบิลยู ซึ่งมีแนวโน้มจะดึงดูดอนุภาคหรือเซลล์เข้ามาติดตามมุมของโครงสร้างได้และแรงต้านการไหลที่ค่อนข้างสูงแต่ช่วงบริเวณด้านหน้าส่วนเว้าของรูปรางดับเบิลยู (รูปที่3.13ค)

ก





รูปที่ 3. 13 แรงแมกนีโตเฟอริติกและแรงต้านการไหลในทิศทางตามแนวนอนของโครงสร้าง (เก็บข้อมูลตามแนวตั้ง) (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวีและ(ค) รูปร่างดัดเบิ้ลยู

3.7 สรุป

แรงแมกนีโตเฟอริติกเป็นแรงที่จะเกิดขึ้นกับอนุภาคที่มีความเป็นแม่เหล็กอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอแรงแม่เหล็กจึงถูกนำมาใช้ในการคัดแยกอนุภาคที่มีคุณสมบัติเป็นแรงแม่เหล็กได้

จากสนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับการไหลซึ่งมีการเก็บข้อมูลตามแนวนอนเส้นสามแนวคือแนวด้านล่าง ,กลาง และบน ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำทั้งสองแรงที่งานวิจัยนี้สนใจคือแรงแมกนีโตเฟอริติกและแรงต้านการไหลมาเปรียบเทียบในตำแหน่งเดียวกันทั้งสามรูปร่าง พบว่าใน

รูปร่างสี่เหลี่ยมที่แนวนอนเส้นกลางมีแนวโน้มของแรงแมกนีโตเฟอริติกในทิศทางเป็นบวกคือ สามารถมีแรงดูดให้อนุภาคหรือเซลล์เคลื่อนที่เข้าไปแต่เมื่อถึงด้านที่ติดโครงสร้างเสาขนาดเล็กแรงแมกนีโตเฟอริติกน้อยมากส่วนแนวเส้นเส้นบนที่เก็บข้อมูลของรูปร่างสี่เหลี่ยมมีแรงทางลบหรือแรงผลักที่มากกว่ารูปร่างอื่น ทำให้อนุภาคหรือเซลล์ที่เคลื่อนที่เข้ามาอาจจะถูกผลักออกไปได้มากกว่ารูปร่างอื่น ในรูปร่างของวีและรูปร่างดับเบิลยูมีในแนวเส้นกลางที่เก็บข้อมูลจากกราฟการเปรียบเทียบทั้งสองรูปร่างนี้มีแนวโน้มใกล้เคียงกันคือ มีแรงทางด้านลบหรือแรงผลักอยู่บ้าง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับรูปร่างสี่เหลี่ยมแล้วยังมีแรงแมกนีโตเฟอริติกทิศทางด้านลบน้อยกว่า แต่ในแนวเส้นบนพบว่าแรงแมกนีโตเฟอริติกทิศทางด้านลบน้อยกว่ารูปร่างสี่เหลี่ยมทำให้มีแนวโน้มของแรงผลักลดลงและยังมีแรงแมกนีโตเฟอริติกอยู่ตรงข้ามกับรูปร่างสี่เหลี่ยม เมื่อถึงติดกับโครงสร้างแรงแมกนีโตเฟอริติกน้อยมากกว่ารูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยู จากนั้นแนวเส้นล่างที่เก็บข้อมูลทั้งสามรูปร่างมีแนวโน้มใกล้เคียงกันเพราะแรงแมกนีโตเฟอริติกที่มุมของ แต่ละรูปร่างมีค่าที่สูงทำให้เกรเดียนต์ทิศทางเป็นบวกหรือแรงดูดส่งผลให้ที่มุมของทุกรูปร่างมีแนวโน้มที่จะทำให้อนุภาคพาราแมกเนติกหรือเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียเคลื่อนที่เข้ามาติดที่บริเวณมุมได้ และจากการเก็บข้อมูลตามแนวนอน ทำให้พบว่าเมื่ออนุภาคหรือเซลล์เม็ดเลือดแดงเคลื่อนที่เข้ามาตรงบริเวณมุมของโครงสร้างจะถูกดูดเข้ามาติด ทั้งนี้ยังส่งผลเข้าไปติดตามบริเวณด้านข้างของโครงสร้างได้และแรงต้านการไหลทั้งสามรูปร่างของโครงสร้างเสาขนาดเล็ก ลักษณะการกระจายตัวของแรงต้านการไหลไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งแรงต้านการไหลจะลดลงเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปยังบริเวณโครงสร้างเสาขนาดเล็ก ทั้งนี้ยังพบว่าในโครงสร้างรูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยูสามารถเพิ่มบริเวณที่มีแรงต้านการไหลที่ต่ำมากกว่าโครงสร้างรูปร่างสี่เหลี่ยมด้วย

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเสาขนาดเล็กจากรูปร่างสี่เหลี่ยมที่เกิดแรงแมกนีโตเฟอริติกทิศทางลบหรือแรงผลักที่สูง งานวิจัยนี้ได้เปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างเสาขนาดเล็กเพื่อลดแรงของแมกนีโตเฟอริติกทิศทางด้านลบให้ลดน้อยลง ในรูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยูทั้งนี้ยังสามารถเลื่อนตำแหน่งให้มีแรงแมกนีโตเฟอริติกที่สูงขึ้นและแรงต้านการไหลที่ต่ำลงไป ทำให้อาจจะมีความโน้มในการดักจับอนุภาคพาราแมกเนติกหรือเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียได้

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกทดลองกับทิศทางของการวางตัวของสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับการไหล เนื่องจากการวางตัวตั้งฉากกับการไหลนั้น ส่งผลให้โครงสร้างเสาขนาดเล็กรูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยูสร้างแรงแมกนีโตเฟอริติกบวกหรือแรงดูดที่สามารถดูดอนุภาคหรือเซลล์เข้าไปติดในบริเวณส่วนหัวของโครงสร้างได้ และในส่วนของทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ขนานกับการไหลนั้น ทำการเปรียบเทียบแล้ว พบว่าการวางตัวขนานกับการไหลนั้นส่งผลให้ภายในของโครงสร้างนั้นสร้างแรงแมกนีโตเฟอริติกลบหรือแรงผลักไม่ให้อนุภาคหรือเซลล์ไม่เข้ามาติดภายในโครงสร้างได้ ทำให้การวางตัวของสนามแม่เหล็กแบบขนานกับการไหลนั้น อาจจะทำให้การดักจับอนุภาคหรือเซลล์ได้ไม่ดี เป็นสาเหตุที่งานวิจัยนำวางตัวของสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตั้งฉากกับการไหลมาใช้ในการทดลอง ซึ่งจะสามารถ

สร้างแรงแมกนีโตเฟอริติกบวกรหรือแรงดูดได้มากกว่า ทั้งนี้ยังพบอีกว่าในโครงสร้างรูปร่างวีและรูปร่าง
ดับเบิลยูนั้นภายในส่วนเว้าของโครงสร้างนั้น จะมีแรงแมกนีโตเฟอริติกบวกรที่สูงพอที่จะสามารถดึงดูด
อนุภาคหรือเซลล์เข้าไปในส่วนเว้าของโครงสร้างรูปร่างและรูปร่างดับเบิลยูได้มากกว่าโครงสร้าง
รูปร่างสี่เหลี่ยม



บทที่ 4

กระบวนการสร้างรูปร่างนิกเกิลและการออกแบบระบบของไหลจุลภาค

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการสร้างรูปร่างนิกเกิลเพื่อให้เกิดเป็นโครงสร้างเสาขนาดเล็กสูงขึ้นมาซึ่งนิกเกิลที่สร้างได้จะถูกนำไปประกอบลงในระบบของของไหลจุลภาค ในเบื้องต้นจำเป็นที่จะต้องสร้างลวดลายที่ต้องการขึ้นมาก่อนโดยเริ่มจากการออกแบบลวดลายในโปรแกรมวาดแบบทางวิศวกรรม(Computer Aided Design) ซึ่งจะประกอบไปด้วยการเตรียมแผ่นทองแดง การเคลือบแผ่นฟิล์ม การฉายแสง การชุบนิกเกิล และการประกอบชุดทดลอง เพื่อเตรียมการทดลองเป็นขั้นต่อไป

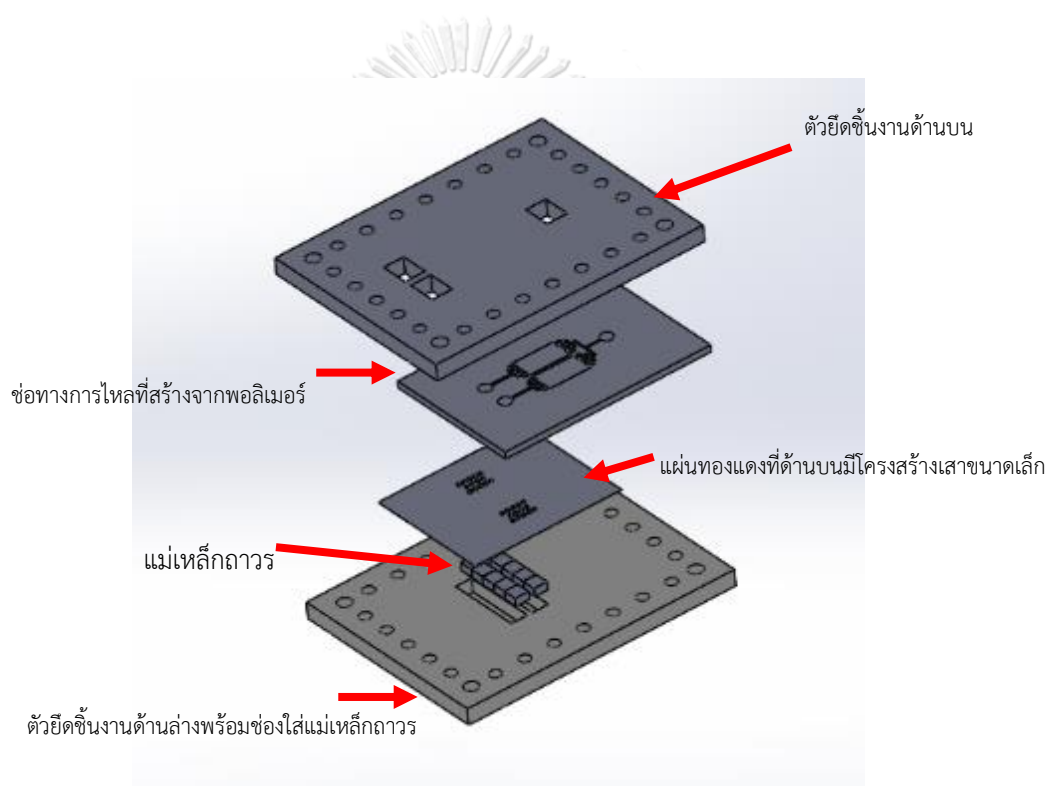
จากแนวคิดเบื้องต้นในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้กระจกสไลด์โดยการเคลือบวัสดุนำไฟฟ้า เช่น อลูมิเนียมแต่มีปัญหาในการสร้างคือ กระจกสไลด์โดยปกติทั่วไปมีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ซึ่งกระจกสไลด์นี้มีความหนามากเกินไปทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่จะเข้ามาเหนี่ยวนำกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กลดลง จึงเป็นเหตุผลให้ต้องหาวัสดุฐานรองแบบอื่น เช่น กระจกปิดสไลด์ ซึ่งมีความหนาที่ประมาณ 0.13 มิลลิเมตร หรือประมาณ 130 ไมโครเมตร ทำให้มีความเข้มสนามแม่เหล็กเพียงพอจึงตัดสินใจเลือกวัสดุฐานรองชิ้นใหม่จากนั้นจึงต้องนำกระจกปิดสไลด์ไปเคลือบวัสดุนำไฟฟ้าได้แก่ อลูมิเนียม เมื่อได้กระจกที่เคลือบด้วยวัสดุนำไฟฟ้าแล้วจากนั้นสามารถนำไปสร้างโครงสร้างเสาขนาดเล็กซ้อนทับด้านบน ได้โดยวิธีการชุบนิกเกิล (Electroplate) ซึ่งได้จัดวางรูปแบบเพื่อจะให้นิกเกิลเกาะขึ้นมาเป็นเสาขนาดเล็ก แต่ในที่นี้ก็ยังมีความยากเกี่ยวกับการสร้างเสาขนาดเล็กขึ้นบนแผ่นกระจกปิดสไลด์ ซึ่งเกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่ชุบโลหะส่งผลให้ชั้นที่เคลือบอลูมิเนียมไว้ เกิดการหลุดออกจากแผ่นกระจกปิดสไลด์ และไม่สามารถที่จะทำกระบวนการชุบโลหะให้สำเร็จได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เปลี่ยนวัสดุฐานรองเป็นแผ่นอลูมิเนียมที่มีความหนา 0.3 มิลลิเมตรโดยหลักการอื่นยังคงเหมือนเดิม เนื่องจากการเปลี่ยนวัสดุฐานรองทำให้ขั้นตอนการชุบโลหะไม่ได้มีปัญหาเกิดขึ้น จากการสังเกตทางกล้องจุลทรรศน์จะเห็นนิกเกิลเข้ามาติดเป็นเสาโครงสร้างขนาดเล็กบนรูปร่างที่เตรียมไว้ใน แต่ขั้นตอนสุดท้ายได้ล้างแผ่นฟิล์มบางออกแต่ยังคงโครงสร้างเสาขนาดเล็กไว้บนแผ่นอลูมิเนียม โดยการทดลองจริงโครงสร้างเสาขนาดเล็กมักจะหลุดออกไปตามแผ่นฟิล์มบางซึ่งทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่เหมาะสมในการจะนำมาทดลองในขั้นต่อไป

งานวิจัยนี้จึงได้เลือกแผ่นทองแดงที่มีความหนาประมาณ 0.1 มิลลิเมตรมาแทนแผ่นอลูมิเนียม ผลปรากฏว่าเมื่อถึงขั้นตอนการล้างแผ่นฟิล์มบางออกแล้วโครงสร้างเสาขนาดเล็กยังคงอยู่บนแผ่นทองแดงได้

4.1 ขั้นตอนการสร้างระบบของไหลจุลภาค

ในงานวิจัยนี้ได้ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักสำคัญได้แก่ ส่วนการสร้างโครงสร้างขนาดเล็กบนแผ่นทองแดง การสร้างช่องทางของไหลจุลภาค และ ส่วนยึดหนีบด้านบนและด้านล่างซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1 ขั้นตอนและวิธีการสร้างจะถูกอธิบายอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไปจากนี้

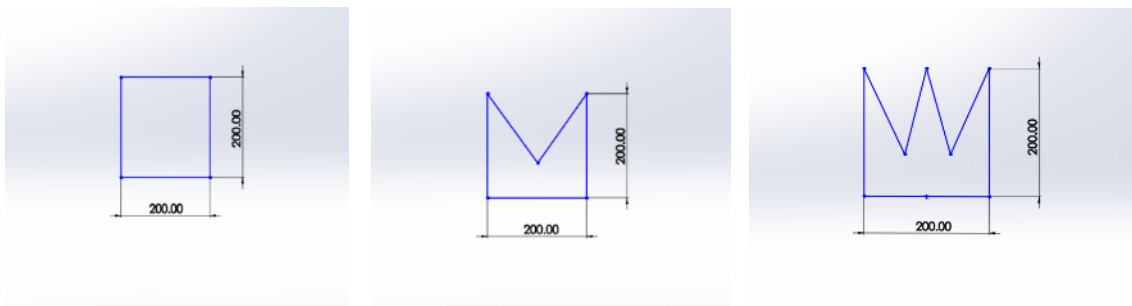


รูปที่4. 1 ส่วนประกอบของระบบของไหลจุลภาคเพื่อนำมาใช้ในงานวิจัย

4.2 การออกแบบลวดลายบนแผ่นหน้ากากพลาสติก

การออกแบบลวดลายเริ่มจากการออกแบบบนโปรแกรมวาดแบบสามมิติในคอมพิวเตอร์ Computer Aided Design (CAD) ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและออกแบบลวดลายไว้ 3 รูปร่างได้แก่ รูปร่างสี่เหลี่ยม, รูปร่างวี และรูปร่างดัดเบิ้ลยู โดยได้กำหนดขนาดไว้ 200x200 ไมโครเมตรดังรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงขนาดและรูปร่างที่ได้ทำการออกแบบไว้เพื่อนำไปปริ้นลงบนแผ่นใสพลาสติก จากนั้น

ส่งไฟล์ภาพที่ออกแบบไว้ก่อนหน้านี้ไปยังบริษัท CAD/Art Services, Inc เพื่อให้ปริ้นรูปร่างที่ออกแบบไว้ลงบนหน้ากากใสพลาสติกเมื่อทำการสั่งปริ้นเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้วดังรูปที่ 4.3



รูปที่4. 2 ลวดลายที่ออกแบบไว้ในโปรแกรมวาดแบบสามมิติกำหนดขนาดไว้ที่ 200x200 ไมโครเมตร รูปร่างสี่เหลี่ยม รูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยู

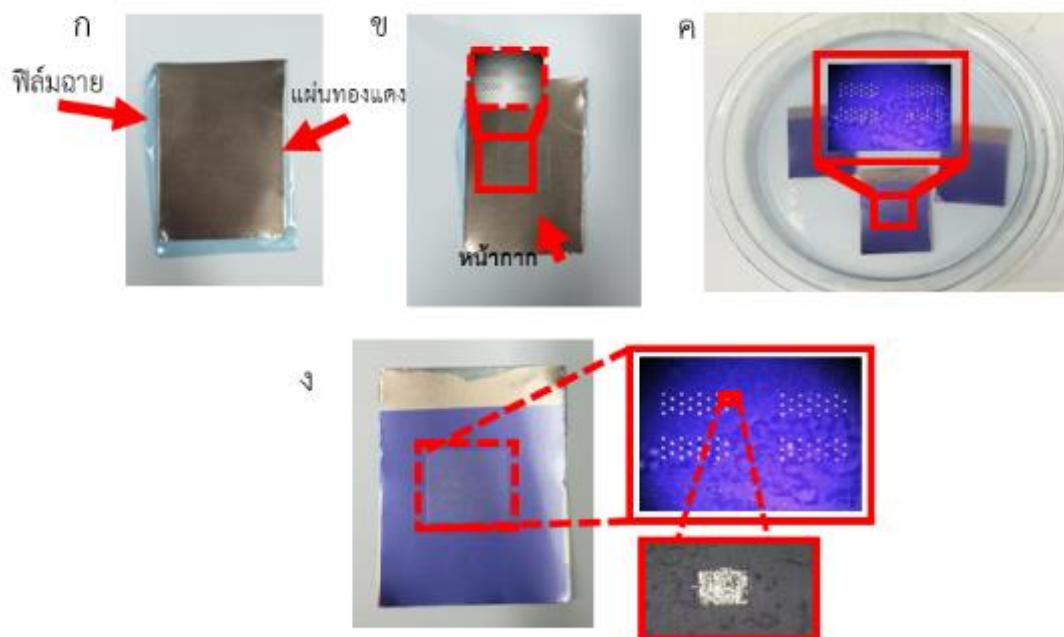


รูปที่4. 3 รูปร่างที่ปริ้นลงแผ่นใสพลาสติกเพื่อเตรียมสร้างเป็นหน้ากากในขั้นตอนทำการฉายแสง

4.2.1 การเคลือบแผ่นฟิล์มฉายแสงบนแผ่นทองแดง

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วัสดุฐานรองเป็นแผ่นทองแดงที่มีความหนาประมาณ 0.1 มิลลิเมตร หรือประมาณ 100 ไมโครเมตร โดยแผ่นทองแดงที่นำมาใช้ต้องมั่นใจว่าไม่ได้มีสารเคลือบกันสนิมไว้บนแผ่นเนื่องจากจะทำให้มีปัญหาในการทำกระบวนการชุบโลหะนิกเกิล โดยงานวิจัยนี้ได้นำแผ่นฟิล์มฉายแสงประเภทเนกาทีฟ(Photoresist negative) จากนั้นจึงตัดแผ่นทองแดงขนาด 30X50 มิลลิเมตร แล้วนำแผ่นฟิล์มฉายแสงมาติดลงบนแผ่นทองแดงที่ได้ตัดไว้ โดยนำเข้าเครื่องรีดความร้อนที่ตั้งอุณหภูมิไว้ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งมีข้อควรระวังในการติดแผ่นฟิล์มฉายแสงลงบนแผ่นทองแดง

คือต้องพยายามไม่ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นภายในแผ่น และรีดซ้ำแบบนี้ไป 4 รอบ ในแต่ละรอบใช้ระยะเวลาที่ห่างกัน 1 นาที (รูปที่ 4.4ก)



รูปที่4. 4 กระบวนการสร้างลวดลายบนแผ่นทองแดงด้วยการฉายแสงยูวีผ่านหน้ากากลวดลาย (ก) ฟิล์มฉายแสงติดบนแผ่นทองแดง (ข) หน้ากากฉายแสงวางไว้ด้านบนของฟิล์มฉายแสง (ค) แผ่นทองแดงที่นำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต และ (ง) แผ่นทองแดงหลังจากแช่สารละลายเสร็จแล้ว

4.2.2 การฉายแสง

การเคลือบฟิล์มฉายแสงบนแผ่นทองแดงแล้วจึงนำหน้ากากที่ปริ้นลงบนพลาสติกและแผ่นทองแดงที่เคลือบแผ่นฟิล์มฉายแสงมาประกบกัน (รูป 4.4ข) โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่อง Mask aligner เนื่องจากมีความเข้มในการฉายแสงมากพอที่จะทำให้เกิดการฉายแสงได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 35 วินาที ในการฉายแสงบนเครื่องฉายแสงยูวี เพื่อให้ฟิล์มฉายแสงที่โดนแสงยูวีนั้นมีความแข็งแรงกว่าส่วนที่ไม่โดนแสงยูวี เมื่อเสร็จจากการฉายแสงแล้วให้ดึงหน้ากากออกจากแผ่นทองแดง โดยจะสังเกตเห็นได้ว่ารูปร่างในส่วนที่ไม่โดนแสงยูวีจะมีสีที่อ่อนกว่าส่วนที่โดนแสงยูวี

4.2.3 การล้างฟิล์มฉายแสง

หลังจากฉายแสงยูวีบนแผ่นทองแดงในขั้นตอนก่อนหน้านี้อันแล้ว จากนั้นจึงได้เตรียมน้ำยาล้างด้วยสารโซเดียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนน้ำเปล่า 1 ลิตรต่อโซเดียมคาร์บอเนต 10 กรัม แล้วคนให้ละลายเข้ากัน จากนั้นเทลงในภาตแก้วแล้วนำชิ้นงานที่ฉายแสงยูวีเสร็จมาใส่ในน้ำยาล้างฟิล์มฉายแสง โดยแช่ทิ้งไว้ประมาณ 10 นาทีจนกระทั่งส่วนที่ไม่โดนแสงยูวีหลุดออกไป แล้วนำชิ้นงานขึ้นจากน้ำยาล้างไปล้างด้วยน้ำเปล่าและนำไปเป่าด้วยไนโตรเจนจนแห้งสนิท (รูปที่ 4.5ค)

4.3 กระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้า

หลังจากการเตรียมชิ้นงานที่ได้จากขั้นตอนการฉายแสงยูวีแล้ว นำชิ้นงานมาปลูกลงในภาตให้ลงมาติดกับแผ่นทองแดง โดยนิกเกิลจะมาติดตามรูปร่างทั้ง 3 รูปร่างได้แก่ รูปร่างสี่เหลี่ยม รูปร่างวี และรูปร่างดับเบิลยู ก่อนจะทำขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้าจะต้องนำชิ้นงานที่ฉายแสงยูวีแล้วไปตรวจสอบในกล้องจุลทรรศน์ว่าคราบของแผ่นฟิล์มบางได้ถูกล้างออกหมด (รูปที่ 4.5ง)

4.3.1 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับเตรียมฟิล์มบางฉายแสงยูวี

- แผ่นทองแดงความหนา 0.1 มิลลิเมตร
- แผ่นฟิล์มฉายแสงแบบเนกาทีฟที่มีความหนา 40 ไมโครเมตร
- หน้ากากสำหรับทำลวดลายบนแผ่นฟิล์มฉายแสง
- แท่งนิกเกิลขนาด 30x50 มิลลิเมตร
- ปีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
- แท่งแม่เหล็กสำหรับการกวนสาร
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
- สารละลายนิกเกิลเฮกซะหรือนิกเกิลซัลเฟต

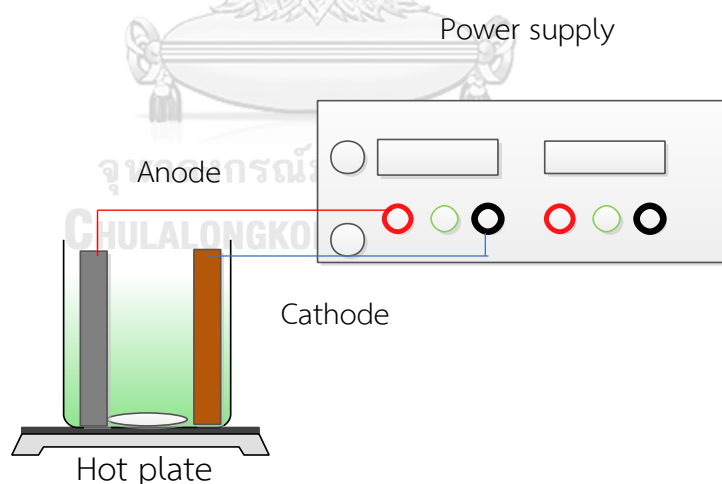
4.3.2 ข้อจำกัดในการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้า

เนื่องจากการก่อนขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้าต้องทำให้มั่นใจว่าคราบแผ่นฟิล์มบางล้างออกหมดแล้ว หากมีแผ่นฟิล์มบางหรือคราบของแผ่นฟิล์มบางหลงเหลืออยู่ภายในรูปร่างที่เว้นว่างไว้ อาจจะทำให้ นิกเกิลไม่สามารถเข้ามาติดได้เนื่องจากเศษของฟิล์มบางยังคงเหลืออยู่ ส่งผลให้การขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้าไม่ได้สาเหตุจากกระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านแผ่นฟิล์มบางเข้าไปได้และอีกปัจจัยของปัญหาในการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้าคือใช้กระแสไฟฟ้าที่มากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ จึง

จำเป็นต้องปรับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับขนาดของรูปร่างที่เตรียมไว้ ส่งผลให้ทำให้เกิดความร้อนที่สูงไปภายในแผ่นทองแดงเกิดการขาดของแผ่นฟิล์มบางทำให้ผลลัพธ์ของการขึ้นรูปผิดไปจากรูปร่างที่เตรียมไว้

4.3.3 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้า

เมื่อได้ชิ้นงานที่เตรียมพร้อมจะขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว จะนำเครื่องกำเนิดสัญญาณที่สามารถจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC current) มาต่อเข้ากับสายไฟ โดยการขึ้นรูปทางไฟฟ้าจะใช้ขั้วแคโทดหรือขั้วลบต่อเข้ากับแผ่นทองแดงและขั้วแอโนดหรือขั้วบวกต่อเข้ากับแท่งนิกเกิล ดังรูปที่ 4.5 โดยพารามิเตอร์ในงานวิจัยนี้มี 2 ส่วนคือ กระแสไฟฟ้าและเวลา ซึ่งความสำคัญของการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้าจะส่งผลโดยตรงต่อพื้นที่ที่เว้นว่างไว้ เพื่อให้แท่งนิกเกิลมาเกาะลงบนรูปร่างที่เตรียมไว้ โดยกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้คือ 0.01 แอมป์ ซึ่งต้องสอดคล้องกับการเลือกใช้เวลาในการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้าคือต้องใช้ระยะเวลา 45 นาที โดยทั้งสองตัวแปรทำให้เกิดชิ้นงานที่มีนิกเกิลเข้าไปเกาะลงบนรูปร่างที่จัดเตรียมไว้อย่างสมบูรณ์ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างของรูปร่างทั้ง 3 รูปร่างที่งานวิจัยต้องการ จึงเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้า



รูปที่ 4. 5 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองสำหรับกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้า



รูปที่ 4. 6 รูปร่างที่นิกเกิดติดอยู่บนแผ่นทองแดงหลังจากกระบวนการชุบโลหะนิกเกิดแล้วจึงเป็นโครงสร้างขนาดเล็ก รูปร่างสี่เหลี่ยม รูปร่างวีและรูปร่างดัดเบี้ยยู

4.3.4 การล้างแผ่นฟิล์มบางหลังจากกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้า

หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้า แล้วจะทำการล้างแผ่นฟิล์มบางออกจากแผ่นทองแดง ที่ด้านบนของแผ่นทองแดงจะมีนิกเกิดเข้าไปเกาะอยู่ภายในช่องว่างที่เตรียมไว้เพื่อให้ออกมาเป็นรูปร่างที่ต้องการ

4.3.4.1 อุปกรณ์สำหรับการล้างแผ่นฟิล์มบาง

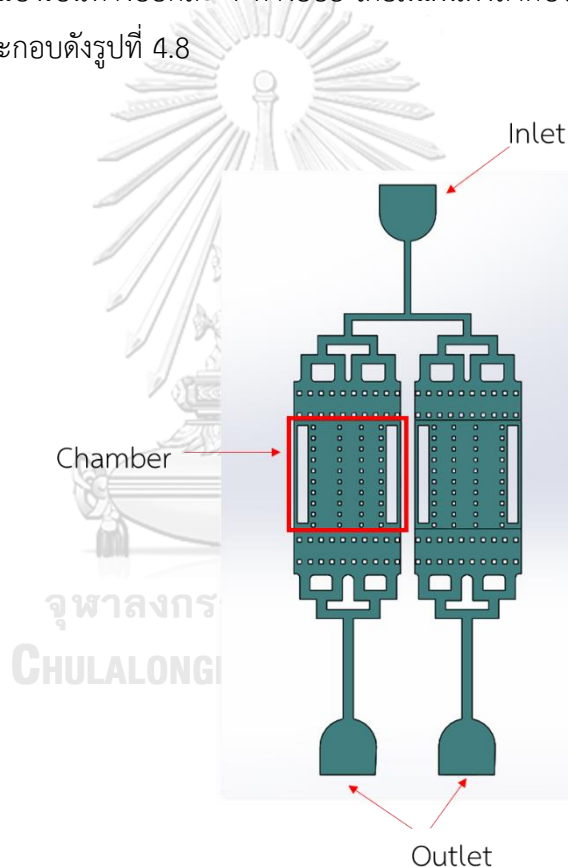
- อะซีโตน
- น้ำเปล่าหรือน้ำไม่มีประจุ
- ภาชนะโถแก้ว
- ผ้าขนหนู

4.3.4.2 วิธีการล้างแผ่นฟิล์ม

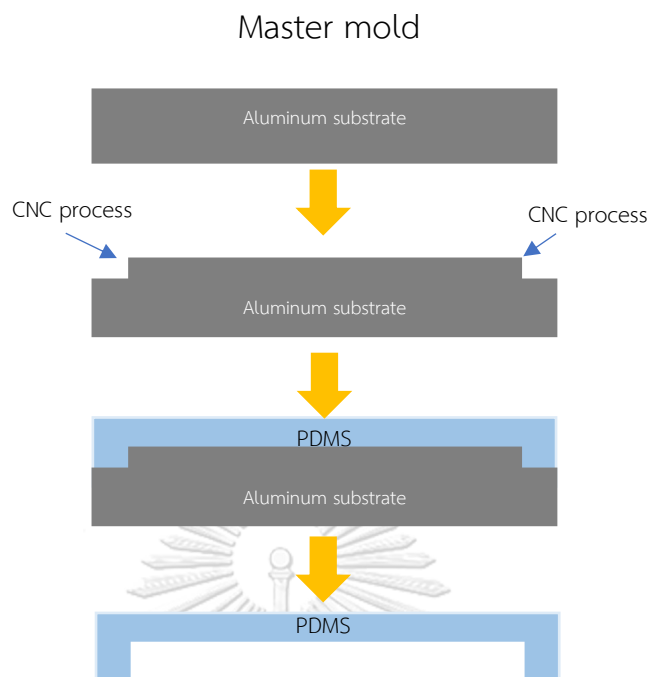
ทำการเทอะซีโตนลงในภาชนะโถแก้วประมาณ $\frac{1}{4}$ ของภาชนะโถแก้วแล้วนำแผ่นทองแดงที่มาจากขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้าใส่ลงไปในภาชนะโถแก้วที่มีอะซีโตนไว้ จากนั้นเอียงภาชนะไปมา เมื่อเวลาผ่านไปจะสังเกตเห็นได้ว่าแผ่นฟิล์มบางจะค่อยๆ ลอกออกจนเห็นโครงสร้างคร่าวๆ บนแผ่นทองแดงได้ ซึ่งสุดท้ายแล้วงานในวิจัยนี้จะได้แผ่นทองแดงที่มีโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่ทำมาจากวัสดุเฟอร์โรแมกนีติกคือนิกเกิล ก่อนจะนำแผ่นทองแดงไปใช้งาน จำเป็นที่ต้องทำความสะอาดอีกครั้ง โดยเทน้ำเปล่าหรือน้ำไม่มีประจุลงในภาชนะโถแก้วอีกใบ แล้วนำชิ้นงานลงไปจุ่มและล้างให้สะอาดจากนั้นนำชิ้นงานขึ้นมาและใช้ผ้าขนหนูเช็ดทำความสะอาด พร้อมนำแผ่นทองแดงที่มีโครงสร้างเสาขนาดเล็กรูปร่างต่าง ๆ ไปใช้งานได้

4.4 การสร้างระบบของไหลจุลภาค

การสร้างระบบของไหลจุลภาคในงานวิจัยนี้ต้องมีความต่อเนื่องจากการสร้างโครงสร้างนิกเกิลลงบนแผ่นทองแดงนั้น ดังนั้นจะต้องสร้างระบบของไหลจุลภาคให้เหมาะสมกันจึงจะสามารถประกอบออกมาเป็นระบบของไหลจุลภาคได้ การออกแบบในเบื้องต้นนั้นทำการออกแบบระบบของไหลจุลภาคจากโปรแกรมในการวาดแบบสามมิติดังรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าการออกแบบให้มีทางเข้าของของไหลเพียงทางเดียว และภายในช่องทางการไหลยังมีท่อแยก 8 ท่อแยกย่อย เพื่อช่วยให้เกิดการกระจายความเร็วของของไหลให้สามารถไหลออกไปให้เต็มพื้นที่หน้าตัดได้อย่างสม่ำเสมอ เมื่อของไหลไหลเข้ามาแล้วจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ทางแยกและจะมีท่อทางออกสองทางที่แบ่งกันอย่างชัดเจน โดยแต่ละทางออกถูกแบ่งเป็นทางออกละ 4 ทางย่อย โดยมีแผนผังลำดับชั้นการขึ้นรูปชิ้นงานจากพอลิเมอร์ของเหลวมาประกอบดังรูปที่ 4.8



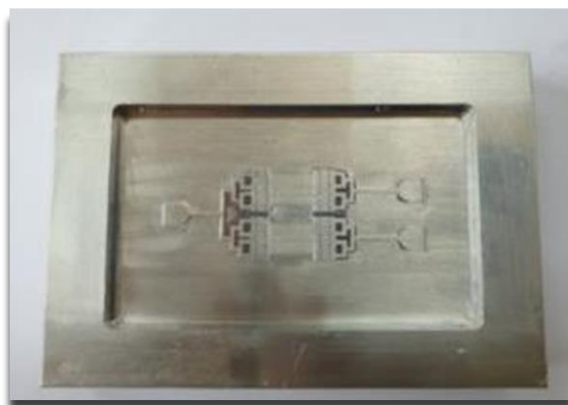
รูปที่ 4. 7 การออกแบบช่องทางการไหลจุลภาคเพื่อนำไปสร้างเป็นแม่พิมพ์



รูปที่ 4. 8 ขั้นตอนการขึ้นรูปช่องทางการไหลจุลภาคจากพอลิเมอร์ PDMS

4.4.1 การเตรียมแม่พิมพ์ของระบบของไหลจุลภาค

งานวิจัยนี้ได้เลือกขั้นตอนการทำแม่พิมพ์ด้วยการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมเพื่อสามารถผลิตชิ้นงานได้รวดเร็วและถูกต้องตามแบบที่วาดไว้ในหัวข้อที่ 4.9 วิธีนี้คือ Computer Numerical Control, (CNC) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ดอกกัดงาน CNC ของเครื่องอยู่ที่ 0.3 มิลลิเมตรหรือ 300 ไมโครเมตรและปรับเปลี่ยนดอกกัดไปตามพื้นที่ต่าง ๆ ที่มีความกว้างแตกต่างกันสุดท้ายจะได้ชิ้นงานออกมาดังรูปที่ 4.9



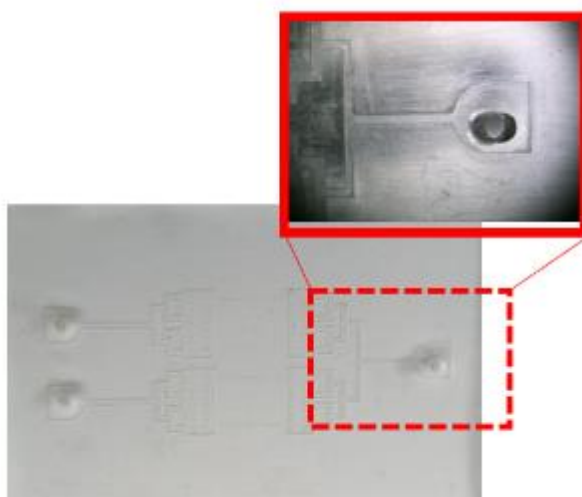
รูปที่ 4. 9 กระบวนการสร้างรูปร่างของแม่พิมพ์จากกระบวนการ CNC

4.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์ของเหลว Polydimethylsiloxane (PDMS)

การเตรียมพอลิเมอร์ PDMS และตัวเร่งปฏิกิริยา Curing Agent ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องใช้คู่กันเสมอ โดยใช้อัตราส่วนการตวงคือ 10 ส่วนของ PDMS และ 1 ส่วนของ Curing agent เทรวมกันไว้ในถ้วยพลาสติกเปล่าแล้วใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากันจากนั้นเทลงบนแม่พิมพ์จากขั้นตอนที่ 4.4.1 โดยเทลงแม่พิมพ์แต่ละครั้งใช้ปริมาตรประมาณ 20 กรัม

4.4.3 การขึ้นรูประบบของไหลจุลภาค

หลังจากสร้างแม่พิมพ์ขึ้นมาพอลิเมอร์ขึ้นมา และนำพอลิเมอร์ที่ผสมเข้ากันเทลงบนแม่พิมพ์ที่มีลวดลายเท จนกระทั่งให้พอลิเมอร์ถึงขอบด้านบนของแม่พิมพ์ ในขั้นตอนการเทลงไปในนั้นจะสังเกตเห็นฟองอากาศจำนวนมากเกิดขึ้นจากการคนพอลิเมอร์ให้เข้ากัน ซึ่งต้องกำจัดฟองอากาศนั้นออกไป โดยนำแม่พิมพ์ที่มีพอลิเมอร์เต็มในแม่พิมพ์นั้นใส่เข้าตู้สุญญากาศซึ่งเป็นระบบสุญญากาศเป็นเวลาประมาณ 30 นาที จากนั้นฟองอากาศจะหายไปหมด แล้วจึงนำแม่พิมพ์ไปให้ความร้อนประมาณ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 40 นาที เพื่อให้พอลิเมอร์แข็งตัวแล้วชิ้นงานจะสามารถแกะออกจากแม่พิมพ์ได้ สุดท้ายจึงนำชิ้นงานไปเจาะรูตามตำแหน่งที่ต้องการเพื่อต่อท่อสายยางลงไป รูปที่ 4.10

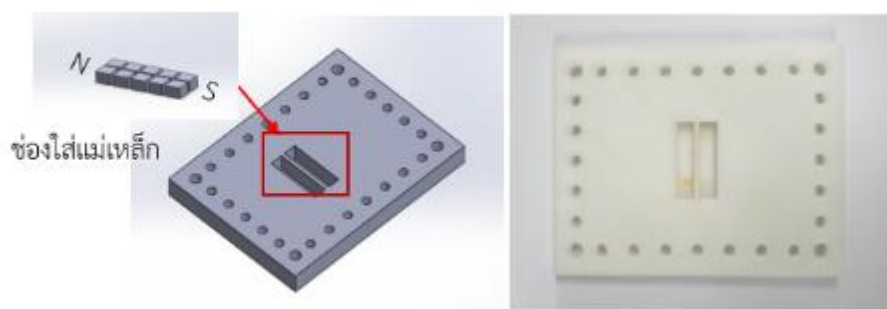


รูปที่ 4. 10 การหล่อแม่พิมพ์ด้วยพอลิเมอร์ PDMS และเจาะรูเพื่อสร้างช่องทางการไหลเพื่อขึ้นรูประบบของไหลจุลภาค

4.5 การสร้างส่วนยึดหนีบด้านบนและด้านล่าง

4.5.1 การสร้างส่วนฐานยึดหนีบด้านล่าง

ในการสร้างฐานด้านล่างนั้นเพื่อให้มีช่องใส่แม่เหล็กโดยจะถูกสร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติ ซึ่งต้องออกแบบหรือสร้างโครงสร้างตามที่ออกแบบไว้ในรูปของ CAD แล้วส่งไฟล์ต่อไปยังคำสั่งการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์สามมิติ แล้วเครื่องพิมพ์จะอาศัยการเติมเนื้อพอลิเมอร์พลาสติกลงไปทีละชั้นจนได้ชิ้นงานตามที่ออกแบบไว้ ทั้งนี้เครื่องพิมพ์สามมิติจะสามารถพิมพ์ลวดลายต่าง ๆ ที่มีขนาดหรือรายละเอียดได้อย่างชัดเจนในระดับหนึ่ง (ซึ่งขึ้นอยู่กับหัวพิมพ์) งานวิจัยนี้ได้เลือกกระบวนการเครื่องพิมพ์สามมิติเข้ามามีบทบาทในการสร้างฐานด้านล่างซึ่งมีขนาดความกว้างอยู่ที่ 75 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตรและความหนา 6 มิลลิเมตร โดยขนาดของแม่เหล็กถาวรที่งานวิจัยนี้เลือกมาใช้คือ 5x5x5 มิลลิเมตร จำนวนช่องละ 5 ก้อน รูปที่ 4.11

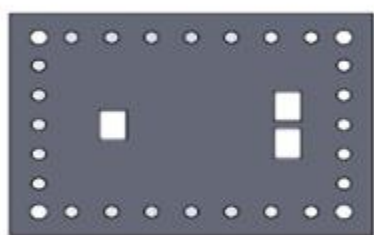


รูปที่ 4. 11 การสร้างฐานด้านล่างพร้อมทั้งช่องใส่แม่เหล็กถาวร (ซ้าย) การออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ขวา) ฐานด้านล่างสร้างจากการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

4.5.2 การสร้างส่วนยึดหนีบด้านบน

ส่วนประกอบสุดท้ายก่อนจะนำอุปกรณ์ทุกอย่างเข้ามารวมกันเป็นอุปกรณ์ที่เตรียมพร้อมสำหรับการทดลอง โดยต้องมีส่วนยึดหนีบด้านบน ซึ่งสร้างจากแผ่นอะคริลิกที่มีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยอาศัยการทำลวดลายให้เป็นไปตามที่ต้องการ ด้วยวิธีการเลเซอร์คัทหรือเป็นการใช้เลเซอร์ที่มีความเข้มสูงเข้าไปตัดแผ่นอะคริลิก ซึ่งมีพื้นฐานในการตัดแบบสองมิติ โดยทำการตัดรูให้สอดคล้องกับส่วนฐานด้านล่าง รูปที่ 4.12 เพื่อสำหรับใส่สกรูยึดระหว่างฐานด้านล่างกับส่วนประกอบอื่นเข้าด้วยกัน ซึ่งจะมีแผ่นอะคริลิกอยู่บนสุดช่วยกระจายแรงกดให้มีความสม่ำเสมอและยังส่งผลให้ของไหลที่ไหลเข้า

มาในระบบไม่มีการรั่วไหลของไปด้านนอก สุดท้ายแล้วนำอุปกรณ์จากขั้นตอนต่าง ๆ มาประกอบรวมกันโดยใช้สกรูยึดเข้าด้วยกันทำให้เกิดอุปกรณ์เตรียมพร้อม สำหรับการทดลองที่จะกล่าวต่อไป



รูปที่ 4. 12 ตัวยึดหนีบด้านบนของอุปกรณ์ที่ต้องใส่สกรูเข้าไป (ซ้าย) การออกแบบตัวยึดหนีบด้านบนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ขวา) ขึ้นงานเมื่อผ่านกระบวนการตัดด้วยเลเซอร์

4.6 อุปกรณ์สร้างแม่เหล็กไนโตรเพอริติก

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการสร้างสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของแรงแม่เหล็กไนโตรเพอริติกที่มาจากแม่เหล็กถาวรโดยมีขนาด $5 \times 5 \times 5$ มิลลิเมตร มีฟลักซ์แม่เหล็ก 0.4 เทสลา แม่เหล็กถาวรนี้สร้างมาจากวัสดุไนโอไดเมียม โดยมีการเรียงตัวของขั้วสนามแม่เหล็กที่ต่างกันวางตัวให้ติดกันแบบไม่มีช่องว่างซึ่งวางเหมือนกันเป็น 2 แถวๆละ 5 ก้อน โดยมีทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำตามหัวข้อที่ 3.4 โดยนำแม่เหล็กถาวรไปวางไว้ในช่องที่ถูกสร้างมาจากเครื่องพิมพ์สามมิติจากหัวข้อที่ 4.5.1

4.6.1 ข้อจำกัดในการสร้างแรงแม่เหล็กไนโตรเพอริติก

การแม่เหล็กถาวรไว้ด้านล่างและขนาดของสนามแม่เหล็กซึ่งที่ไม่สามารถไปเปลี่ยนแปลงได้นั้น เนื่องจากเป็นธรรมชาติของแรงแม่เหล็กแต่ละประเภท ซึ่งต้องเลือกความหนาที่เหมาะสมของชิ้นงาน โดยไม่ให้ความหนามากเกินไป เพื่อไม่ทำให้แรงแม่เหล็กไนโตรเพอริติกไปเหนี่ยวนำกับเป้าหมายที่ต้องการได้ไม่ดี

4.7 อุปกรณ์ในการควบคุมการไหล

การเตรียมอุปกรณ์เพื่อใช้ในการควบคุมการไหลของระบบของไหลจุลภาคนี้มีความสำคัญมาก ซึ่งต้องเลือกใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมกับงาน โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การยึดหนีบด้วยสกรู เนื่องจากมีแผ่นทองแดงอยู่ภายในระบบของไหลจุลภาคการใช้สกรูจึงเหมาะสมมากกว่า

4.7.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองควบคุมของไหล

1. เครื่องปั๊มดิจิตอล
2. สายยางซิลิโคนยี่ห้อ Cole-Parmer
3. เข็มฉีดยาขนาด 10 มิลลิลิตร
4. คอนเนคเตอร์ที่ช่วยต่อระหว่างสายยางสองเส้น

4.7.2 ข้อจำกัดของอุปกรณ์ในการควบคุมการไหล

การเลือกใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมเพื่อไม่เกิดการรั่วซึมของของไหลที่ผ่านเข้ามาในระบบ แต่หากใช้อัตราการไหลที่มากเกินไปอาจจะทำให้เกิดการรั่วได้ และหากอัตราการไหลต่ำเกินไปจะทำให้อนุภาคที่ไหลเข้าไปในระบบตกค้างในอุปกรณ์และใช้เวลานานเกินไปในการทดลอง

4.8 การเตรียมตัวอย่างและติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบ

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบของไหลจุลภาคเพื่อคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อ โดยจะนำอนุภาคพาราแมกเนติกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 ไมโครเมตร ซึ่งจะถูกนำมาเป็นตัวแทนของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กสูงกว่าเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรีย และใช้ออนุภาคเม็ดพลาสติกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 ไมโครเมตรเพื่อใช้เป็นตัวแทนของเซลล์ที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรีย ซึ่งการใช้อนุภาคพาราแมกเนติกเข้ามาเป็นตัวแทนเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจะทดสอบและพิสูจน์หลักการคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรีย รวมไปถึงลดปัจจัยเสี่ยงที่อยู่นอกเหนือการควบคุมเช่น เซลล์เม็ดเลือดแดงที่มีการติดเชื้อที่มีระยะการติดเชื้อแตกต่างกัน เป็นต้น โดยในขั้นตอนสุดท้ายนี้จำเป็นต้องนำเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียจริงเข้ามาทดสอบเพื่อตอบวัตถุประสงค์ที่งานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมุติฐานได้

4.8.1 การเตรียมตัวอย่างสารของอนุภาคพาราแมกเนติก

ตัวอย่างสารของอนุภาคแม่เหล็กถูกเตรียมโดยเริ่มจากเติมน้ำปราศจากประจุ 10 มิลลิลิตร และใช้ปิเปตต่อนอนุภาคพาราแมกเนติกขนาด 5 ไมโครเมตรปริมาตร 20 ไมโครลิตร จะทำให้ได้ความเข้มข้น 1.8×10^6 อนุภาคต่อมิลลิลิตร และเติมสารละลายลดแรงตึงผิว Tween-20 4เปอร์เซ็นต์ ปริมาตรต่อปริมาตร ทำให้ได้สารตัวอย่างที่มีจำนวนถึง 10 มิลลิลิตร โดยงานวิจัยนี้ได้ระบุความเข้มข้นก่อนจะฉีดเข้าสู่ระบบไว้ให้เป็นกลุ่มควบคุมให้มีค่า 100เปอร์เซ็นต์

4.8.2 การเตรียมตัวอย่างของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียจากหนูทดลอง

ตัวอย่างของเซลล์เริ่มจากการนำตัวอย่างเลือดที่เก็บจากหนูทดลองที่ถูกเพาะเชื้อด้วยพาหะของโรคมาลาเรีย โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือดของหนูทดลองซึ่งมาจากการเพาะเชื้ออยู่ในวันที่ 2 วันและ 5 วัน จากนั้นเลือดจะถูกเติมสารละลายเสมือนเลือด 10 มิลลิลิตร แล้วใช้ปิเปตตูดตัวอย่างเลือด 3 ไมโครลิตรขึ้นมาจะทำให้ได้ความเข้มข้น 2.6×10^6 อนุภาคต่อมิลลิลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นก่อนจะเริ่มการทดลองเป็นกลุ่มควบคุมให้มีค่า 100เปอร์เซ็นต์

4.8.3 การเตรียมตัวของเซลล์เม็ดเลือดแดงมาลาเรียจากเลือดคน

ขั้นตอนการตัวอย่างนั้นเกิดจากความร่วมมือกันระหว่างทางโรงพยาบาลราชวิถีและนิสิตปริญญาเอกของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทางโรงพยาบาลราชวิถีได้ทำการเลี้ยงเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียไว้ และตรวจสอบตัวอย่างเลือดที่เก็บมานั้นให้ได้เซลล์เม็ดเลือดแดงที่มีระยะการติดเชื้อที่มากที่สุด ซึ่งทางโรงพยาบาลได้ทำการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อมาลาเรียในเบื้องต้นแล้ว ด้วยวิธีการคัดแยกโดยอาศัยแรงแม่เหล็กเฟอร์ริกจากนั้นนำเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียออกจากระบบคัดแยกโดยการฉีดสารอาหารเลี้ยงเซลล์ที่ติดมาลาเรียให้ออกมาจากระบบมาเก็บไว้ในหลอดทดลอง เพื่อนำมาใช้ในการทดลองต่อไปทั้งนี้งานวิจัยนี้ได้ไปขอแบ่งเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียในคนจากนิสิตปริญญาเอกของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ตัวอย่างเลือดที่ติดเชื้อมาลาเรียที่ได้ประมาณ 10 ไมโครลิตรซึ่งอยู่ในอาหารเลี้ยงเซลล์

เนื่องจากในสารตัวอย่างมีสารอาหารเลี้ยงเซลล์ผสมมา จึงต้องล้างสารอาหารออกไปก่อนที่จะเริ่มทำการทดลอง มิเช่นนั้นจะทำให้คุณสมบัติของเซลล์แตกต่างกันเกินไป โดยต้องนำไปปั่น

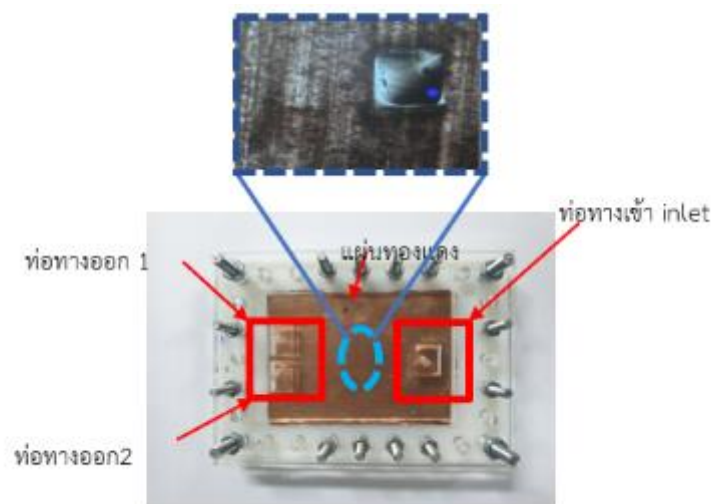
เหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงแยกเซลล์แยกออกจากสารอาหารที่ตกตะกอนลงไปอยู่ด้านล่างของหลอดทดลอง จากนั้นใช้ปิเปตดูดเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียขึ้นมา ซึ่งการใช้ปิเปตดูดเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียขึ้นมาจะมีสารอาหารเลี้ยงเซลล์ติดขึ้นมาโดยดูดขึ้นมาแล้วไปปล่อยลงในสารเสมือนเลือด 1 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าเบาๆ ให้เซลล์กระจายไปทั่วหลอดทดลอง จากนั้นปั่นเหวี่ยงอีก 1 ครั้ง ด้วยความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นใช้ปิเปตดูดเซลล์ไปใส่ในหลอดทดลองที่เตรียมสารเสมือนเลือดไว้ 10 มิลลิลิตร แล้วนับความเข้มข้นก่อนการทดลองซึ่งจะอยู่ที่ประมาณ 1×10^6 อนุภาคต่อมิลลิลิตร เป็นอันเสร็จสิ้นการเตรียมสารตัวอย่าง

4.9 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเตรียมทดสอบประสิทธิภาพของระบบ

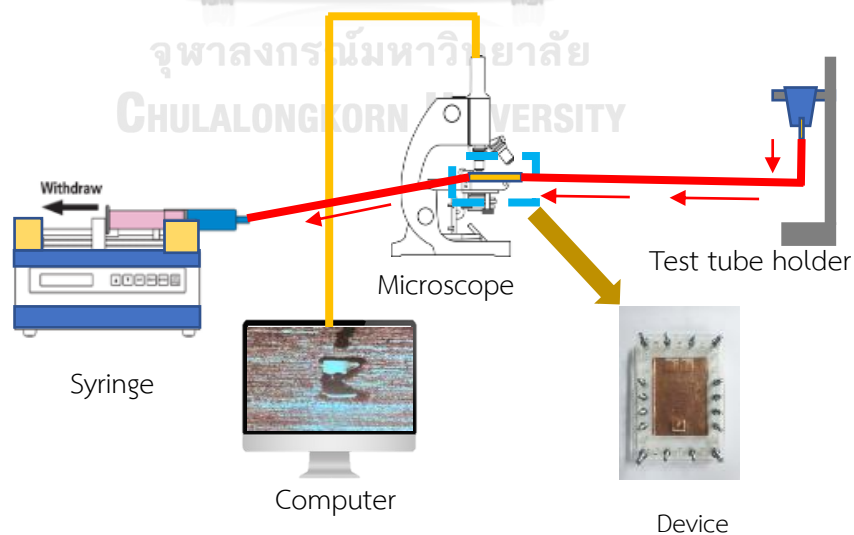
การติดตั้งอุปกรณ์เป็นขั้นตอนที่ต้องนำอุปกรณ์หลายส่วนมาประกอบกันให้เป็นระบบของไหลแบบจุลภาค โดยเริ่มจากนำแม่เหล็กถาวรลงไปในฐานด้านล่างที่ถูกสร้างมาจากเครื่องพิมพ์สามมิติ จากนั้นนำแผ่นทองแดงที่ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟฟ้าโดยในแผ่นทองแดงจะมีโครงสร้างเสาขนาดเล็กอยู่ จำเป็นต้องระมัดระวังอย่าให้ของแข็งหรือของมีคมไปโดนบนด้านบนแผ่นทองแดง มิเช่นนั้นจะทำให้โครงสร้างเสาขนาดเล็กเสียหายหรือหลุดออกไปจากแผ่นทองแดงส่งผลให้การทดลองอาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ต่อไปนำช่องทางการไหลจุลภาคที่ถูกขึ้นรูปด้วย PDMS วางบนแผ่นทองแดง โดยวางให้โครงสร้างเสาขนาดเล็กอยู่บริเวณตรงช่องกลางของช่องทางการไหลจุลภาค และนำท่อสายยางมาต่อเข้าไปกับรูที่ถูกเจาะบริเวณทางเข้าและทางออก สุดท้ายนำแผ่นอะคริลิกที่เจาะรูเปิดช่องว่างไว้แค่บริเวณทางเข้าและทางออก มาวางประกบไว้ด้านบนสุดแล้วใส่สกรูเพื่อหนีบให้เข้าด้วยกันจากด้านบนสู่ด้านล่าง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วซึมในขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 4.13 ถัดไปก่อนการทดลองทุกครั้งต้องฉีบน้ำในระบบของไหลจุลภาคก่อน แล้วจึงนำอุปกรณ์ไปใส่ในตู้สุญญากาศเพื่อให้น้ำเข้าไปแทนที่ฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ ทำให้การทดลองไม่มีฟองอากาศไปขวางในช่องทางการไหล ซึ่งถ้าในระบบมีฟองอากาศจะทำให้การไหลไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในระบบทำให้เกิดความผิดพลาดในการทดลอง

ขั้นตอนต่อไปนำตัวอย่างอนุภาคพาราแมกเนติกที่ถูกเตรียมไว้ในหัวข้อที่ 4.7.1 มาทดลองกับอนุภาคพาราแมกเนติกโดยนำสารอนุภาคตัวอย่างไปเทไว้ในหลอดทดลองที่ตั้งไว้แนวตั้ง ซึ่งช่วยลดการตกตะกอนและทำให้อนุภาคไหลเข้ามาในอุปกรณ์ได้ง่าย รวมถึงไม่อุดตันในช่องทางการไหล

จุลภาคขณะการทดลองของอนุภาคแล้วนำท่อสายยางไปต่อเข้ากับบริเวณทางเข้าเมื่ออนุภาคหรือเซลล์เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปอุปกรณ์แล้วโดยการทดลองจะถูกสังเกตภายใต้กล้องจุลทรรศน์ตลอดช่องทางการไหลจากทางเข้าไปยังทางออก ซึ่งถูกแบ่งออกเป็นสองช่องแยกกันบริเวณทางออกจะมีหลอดเก็บตัวอย่าง 2 หลอด ถูกวางลือคเข้ากับตัวเครื่องปั๊มดิจิทัลซึ่งคำสั่งที่ถูกป้อนเข้าไปคือการดูด Withdraw และมีแผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4. 13 การประกอบอุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันเพื่อเตรียมพร้อมทดลองสำหรับทั้งอนุภาคพาราแมกเนติกและเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรีย



รูปที่ 4. 14 แผนภาพการติดตั้งระบบของไหลจุลภาคเพื่อทดลองกับอนุภาคพาราแมกเนติก

4.10 สรุป

ระบบของไหลจุลภาคที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักได้แก่ ส่วนการสร้างโครงสร้างขนาดเล็กบนแผ่นทองแดง การสร้างช่องทางของการไหลจุลภาค และส่วนยึดหนีบด้านบนและด้านล่าง เพื่อยึดส่วนต่าง ๆ ติดไว้ด้วยกันโดยใช้สกรูยึดให้เข้ากัน โดยแต่ละชั้นตอนก่อนจะนำมาประกอบกันจะถูกสร้างมาจากกระบวนการที่แตกต่างกันตามที่กล่าวมา

ก่อนการทดลองทุกครั้ง จะต้องนำอุปกรณ์ไปเข้าสู่สุญญากาศเพื่อให้น้ำเข้ามาแทนที่อากาศซึ่งต้องใช้สุญญากาศที่มีความดันค่อนข้างสูง มิเช่นนั้นจะทำให้ฟองอากาศภายในระบบไม่ออกไปและจะทำให้เกิดการเสียเวลาได้ และก่อนการทดลองต้องมีความระมัดระวังในการต่อสายยางเข้ากับอุปกรณ์ เพื่อให้ไม่เกิดฟองอากาศอีก ซึ่งในงานวิจัยนี้มีความระมัดระวังเรื่องฟองอากาศเป็นอย่างมาก

การทดลองได้ตั้งค่าให้ปั๊มดิจิทัลเป็นการดูดเอาอนุภาคเข้ามาเก็บในหลอดทดลอง ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งจะต้องทำภายใต้กล้องจุลทรรศน์ โดยกล้องจุลทรรศน์ซึ่งเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ เพื่อสังเกตและบันทึกรูปภาพรวมไปถึงการบันทึกภาพเคลื่อนไหวหรือปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในการทดลอง

การเตรียมสารอนุภาคพาราแมกเนติกก่อนจะนำเข้าสู่อุปกรณ์จำเป็นต้องนำหาความเข้มข้นก่อนทุกครั้ง และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดักจับอนุภาคพาราแมกเนติกระหว่างก่อนเข้าอุปกรณ์และออกจากอุปกรณ์ได้อย่างถูกต้องที่สุด รวมไปถึงเตรียมการติดตั้งอุปกรณ์ให้เรียบร้อยทุกครั้งก่อนเริ่มการทดลอง

บทที่ 5

ผลการทดลอง

การทดลองประสิทธิภาพของระบบของไหลจุลภาคได้ดำเนินการทดลองกับอนุภาคพาราแมกเนติกเป็นจำนวนมากเพื่อลดปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้เช่น ระยะการติดเชื่อมมาลาเรีย เป็นต้น ซึ่งอาจจะเกิดกับการทดลองเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียได้ ซึ่งสุดท้ายแล้วในงานวิจัยนี้ต้องใช้เซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียจริง โดยการทดลองนี้มีเลือกใช้รูปร่างของโครงสร้างเสาขนาดเล็กอยู่ 3 รูปร่างได้แก่ รูปร่างสี่เหลี่ยม รูปร่างวี และรูปร่างดัดเบิ้ลยู เรียงตัวสลับไปมา โดยมีความสูงของโครงสร้างเสาขนาดเล็กอยู่ที่ประมาณ 30 ไมโครเมตร โดยทางเข้าของอุปกรณ์มีช่องทางแยกฝั่งละ 4 ท่อย่อยก่อนที่จะไหลเข้าสู่ช่องทางการไหลหลัก ซึ่งมีโครงสร้างเสาขนาดเล็กวางเรียงตัวอยู่ภายในระบบของไหลจุลภาคและทางด้านทางออกของระบบของไหลจุลภาคมีช่องทางแยกมีลักษณะกระจายความเร็วแบบเดียวกับบริเวณทางเข้า เพื่อให้การไหลภายในช่องทางการไหลจุลภาคนั้นมีกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งทางออกจะมีหลอดฉีดยาเชื่อมต่อที่ทางออกอยู่สองอัน เพื่อเก็บตัวอย่างทั้งอนุภาคหรือเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียที่บริเวณทางออกมาวิเคราะห์ แต่อย่างไรก็ตามได้เริ่มทดลองกับอนุภาคพาราแมกเนติกที่มีขนาด 5 ไมโครเมตร และแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ การสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกที่เคลื่อนที่เข้าไปเกาะติดกับแต่ละรูปร่าง และการเก็บตัวอย่างที่บริเวณทางออกเพื่อหาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคพาราแมกเนติกของแต่ละรูปร่าง

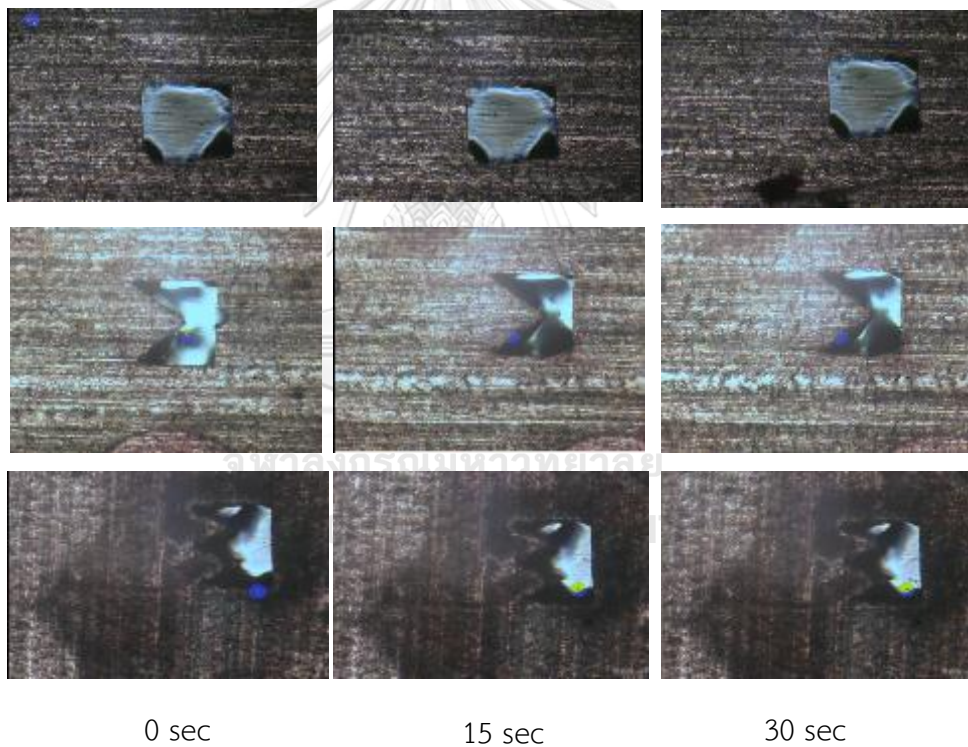
5.1 การสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติก

การทดลองจากการสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกเข้าไปเกาะติดกับแต่ละรูปร่าง โดยได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบในกรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวรและมีแม่เหล็กถาวรซึ่งเลือกใช้อัตราการไหลที่ 0.04 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นอัตราการไหลที่ของการทดลองในเบื้องต้น ในขั้นตอนนี้จะมีการบันทึกวิดีโอและตัดภาพเป็นภาพนิ่ง ซึ่งจะสามารถบอกความแตกต่างได้

5.1.1 การสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกกรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวร

การสังเกตในกรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวรเข้ามาเป็นแหล่งกำเนิด แรงแมกนีโตเฟอร์ติกทำให้ไม่เกิดการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่เป็นวัสดุจากเฟอร์โรแมกเนติก อนุภาคพาราแมกเนติกเมื่อไหลเข้าไปชนกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กภายในอุปกรณ์ก็จะไม่เกิดปรากฏการณ์ใด ๆ เมื่ออนุภาคพาราแมกเนติกพุ่งไปชนสุดท้ายก็จะหลุดออกไป จะสังเกตเห็นได้ชัดในโครงสร้างเสา

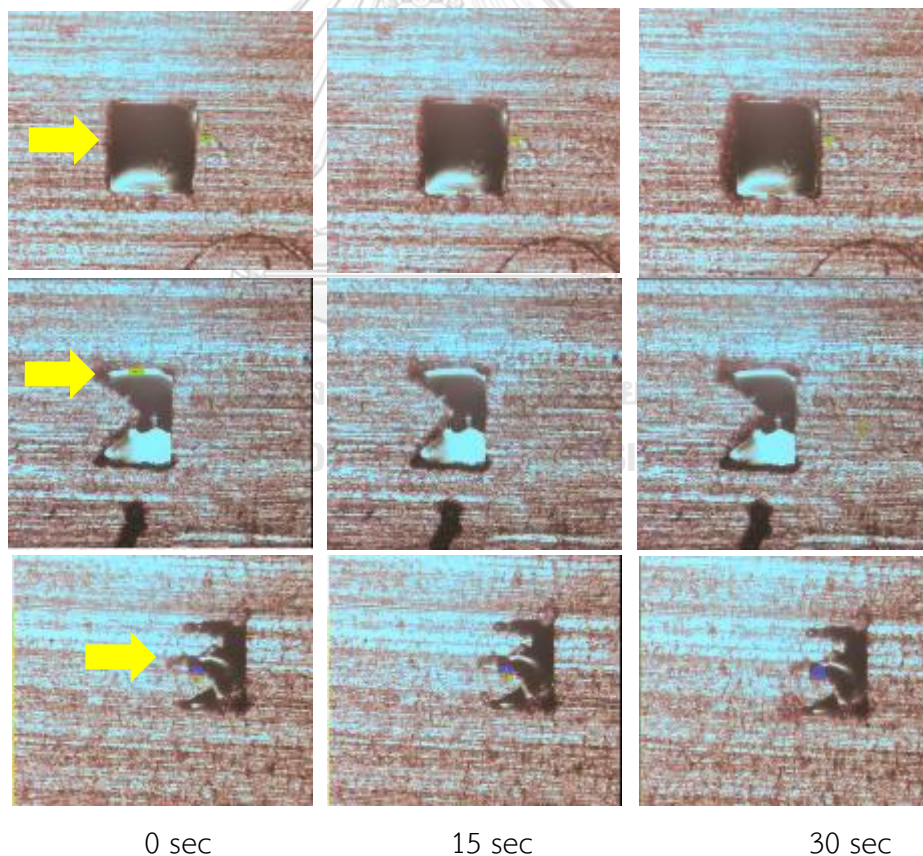
ขนาดเล็กของรูปร่างสี่เหลี่ยมจะชัดเจนที่สุด แต่ทว่ารูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยูเมื่อมีอนุภาคพาราแมกเนติกไหลเข้าไปชนกับโครงสร้างก็มีส่วนที่หลุดเหมือนกันและจะมีส่วนที่ไปค้างภายในส่วนเว้าอยู่บ้างเล็กน้อย โดยรวมการติดแบบนี้ไม่ได้ถูกติดด้วยแรงแมกนีโตเฟอริติก ซึ่งถ้าเพิ่มอัตราการไหลให้สูงขึ้นและสังเกตในบริเวณที่มีส่วนเว้าภายในโครงสร้างเสาขนาดเล็กของรูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยูอนุภาคพาราแมกเนติกจะหลุดออกไปตามอัตราการไหลที่สูงขึ้นซึ่งสามารถสังเกตตามรูปที่ 5.1 จะสังเกตเห็นว่ามีบริเวณสีดำที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างเสาขนาดเล็กเกิดจากความสูงของโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่มีความสูงที่ไม่สม่ำเสมอแล้วการสังเกตผ่านกล้องจุลทรรศน์จำเป็นต้องโฟกัสผิวด้านล่างของชิ้นงานทำให้เกิดบริเวณภาพที่มีสีดำเกิดขึ้นภายในการทดลองซึ่งความเป็นจริงแล้วรูปร่างของโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่อยู่ภายในอุปกรณ์นั้นมีความสมบูรณ์แล้ว



รูปที่ 5. 1 การเคลื่อนของอนุภาคพาราแมกเนติกกรณีไม่มีแม่เหล็กถาวรภายในระบบของโครงสร้างเสาขนาดเล็ก รูปร่างสี่เหลี่ยม รูปร่างวี และรูปร่างดับเบิลยู

5.1.2 การสังเกตการณ์เคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกกรณีที่มีแม่เหล็กถาวร

การสังเกตการณ์เคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกในกรณีที่มีแม่เหล็กถาวรมาเหนี่ยวนำกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่สร้างมาจากวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก โดยการทดลองนี้ได้เริ่มจากการใช้อัตราการไหลที่ 0.04 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นสังเกตทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกที่เคลื่อนที่เข้าไปเกาะติดกับโครงสร้างเสาขนาดเล็ก ซึ่งต้องบันทึกภาพเคลื่อนไหวของลักษณะการเคลื่อนที่แต่ละรูปร่างไว้ ในภาพรวมส่วนใหญ่เมื่อมีการใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในระบบทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กกับอนุภาคพาราแมกเนติกในการเคลื่อนที่เมื่ออนุภาคพาราแมกเนติกจะเข้ามาติดกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กในบริเวณมุมของเสาโครงสร้าง เนื่องจากบริเวณมุมของเสาโครงสร้างจะมีเกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กที่สูงกว่าบริเวณอื่นทำให้อนุภาคมาติดที่มุมมากกว่าซึ่งจะมีลักษณะแบบนี้เหมือนกันทั้งสามรูปร่างตามรูปที่ 5.2



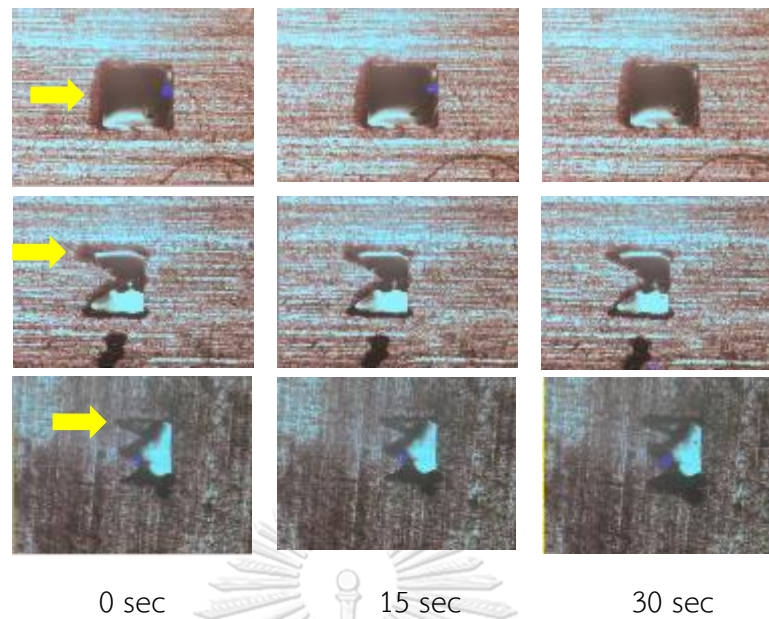
รูปที่ 5. 2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกจากซ้ายไปขวาเคลื่อนที่เข้าไปติดกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 0.04 ไปสู่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาที

5.1.3 การทดลองเพิ่มอัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีและ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที

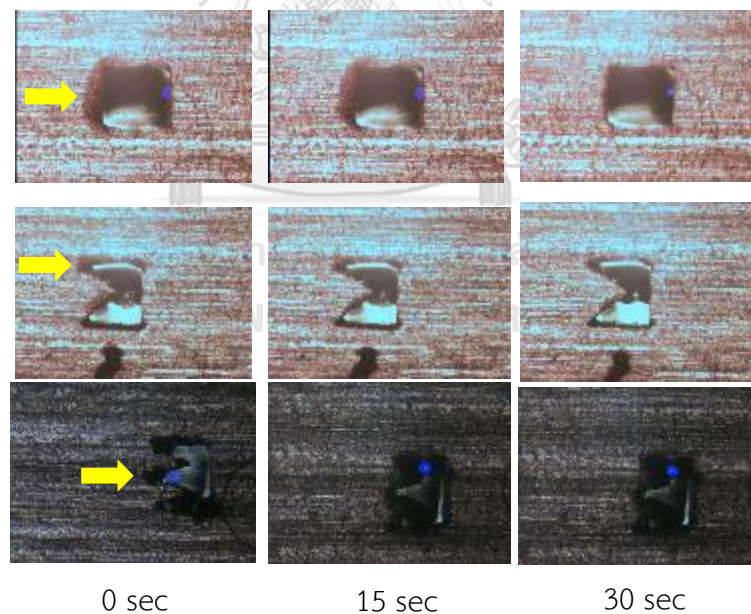
เนื่องจากการทดลองในงานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บอนุภาคพาราแมกเนติกที่ทางออกมานับในอุปกรณ์การนับ Hemocytometer ซึ่งใช้อัตราการไหลที่ 0.04 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ผลของการทดลองในช่วงต้นเห็นได้ชัดว่าอัตราการไหลค่อนข้างต่ำ ทำให้อนุภาคพาราแมกเนติกออกมามีทางออกของแต่ละช่องน้อยเกินไป เป็นเหตุให้ต้องเพิ่มอัตราการไหลสูงขึ้นเป็น 5 เท่า และ 10 เท่า โดยมีอัตราการไหลที่ 0.2 และ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับซึ่งการทดลองแรกจะสังเกตจากการบันทึกภาพในขณะที่ทดลองและจะรายงานผลการทดลองการนับอนุภาคในหัวข้อถัดไป

การทดลองเบื้องต้นในกรณีที่เพิ่มอัตราการไหลขึ้นไปนั้น เริ่มการทดลองใช้อัตราการไหลที่ 0.04 มิลลิลิตรต่อนาทีเข้าไปในระบบก่อนเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้อนุภาคพาราแมกเนติกเข้าไปติดกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กภายในอุปกรณ์ก่อนซึ่งจะให้เห็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกที่ไปติดในโครงสร้างเสาแต่ละรูปร่าง จากนั้นเพิ่มอัตราการไหลไปที่ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 2 นาที โดยสุดท้ายนำสารตัวอย่างที่ช่องทางออกของอุปกรณ์มานับจำนวนอนุภาคที่หลุดออกมาจากการดักจับ ในกรณีที่เพิ่มอัตราการไหลที่ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที รูปที่ 5.3 ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปรวมแล้ว 7 นาทีจึงสามารถเก็บตัวอย่างออกมาเก็บในหลอดทดลองได้ และอีกกรณีของการทดลองมีลักษณะการทดลองที่เหมือนกันคือใช้อัตราการไหลที่ 0.04 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเพิ่มอัตราการไหลไปที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 1 นาที รูปที่ 5.4 ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปรวมแล้ว 6 นาทีจึงสามารถเก็บตัวอย่างออกมาเก็บในหลอดทดลองได้ซึ่งทั้งสองกรณีจะใช้ปริมาตรในการทดลองอยู่ที่ 1 มิลลิลิตรเท่ากัน

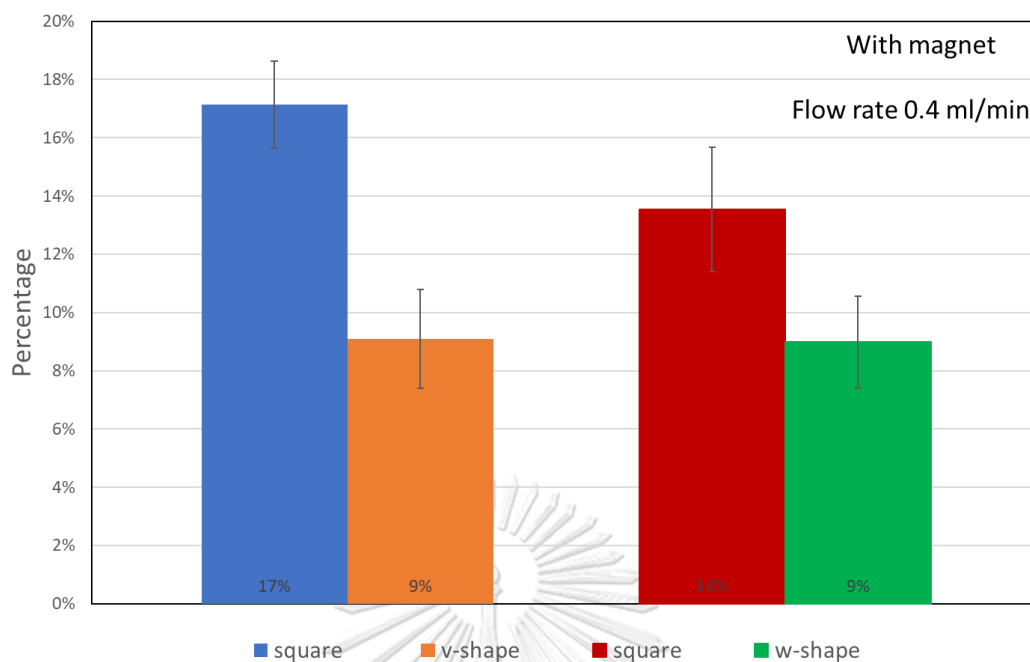
สังเกตจากการทดลองเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลขึ้นไปที่ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที มีอนุภาคพาราแมกเนติกเคลื่อนที่เข้ามาในโครงสร้างเสาขนาดเล็กเพิ่มขึ้นในบริเวณด้านข้างของรูปร่างสี่เหลี่ยม ส่วนรูปร่างวีและรูปร่างดัดเบิ้ลจะมีอนุภาคพาราแมกเนติกเข้าไปติดในส่วนเว้าของโครงสร้างมากขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลขึ้นไปที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที สังเกตเห็นได้ชัดว่าอนุภาคพาราแมกเนติกที่มาติดในก่อนหน้านี้เมื่อถูกความเร็วของไหลที่สูงขึ้นทำให้อนุภาคพาราแมกเนติกหลุดออกไปยังช่องทางออกของอุปกรณ์โดยรูปร่างสี่เหลี่ยมจะเห็นการหลุดของอนุภาคพาราแมกเนติกได้ชัดเจน แต่รูปร่างวีและรูปร่างดัดเบิ้ลเมื่อเพิ่มอัตราการไหลแล้วอนุภาคพาราแมกเนติกที่อยู่ในบริเวณส่วนเว้าของโครงสร้างจะยังมีอนุภาคพาราแมกเนติกติดอยู่ เนื่องจากความเร็วที่อยู่ในบริเวณส่วนเว้า นั้นต่ำมาก และเพิ่มความเร็วของอัตราการไหลไปอีกทำให้ทิศทางการไหลไหลออกไปยังนอกบริเวณของโครงสร้างเสาขนาดเล็กไปอยู่ดีแต่สามารถสร้างการรบกวนการไหลในส่วนเว้าได้ดีมากกว่า



รูปที่ 5. 3 การทดลองอัตราการไหลที่ 0.2 มิลลิลิตรต่อวินาทีเป็นเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 30 วินาทีเพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกในโครงสร้างเสารูปร่างต่าง ๆ



รูปที่ 5. 4 การทดลองอัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อวินาทีเป็นเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 30 วินาทีเพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกในโครงสร้างเสารูปร่างต่าง ๆ



รูปที่ 5. 5 การแสดงผลการเก็บข้อมูลในการทดลองครั้งแรกที่อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาที กรณีที่มีแม่เหล็ก

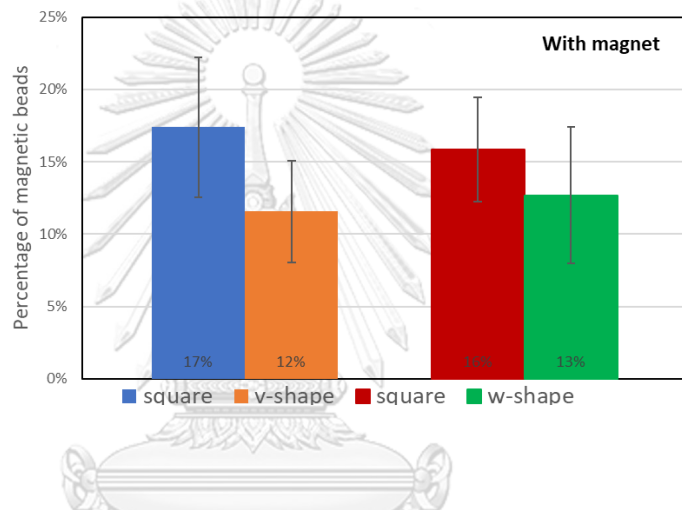
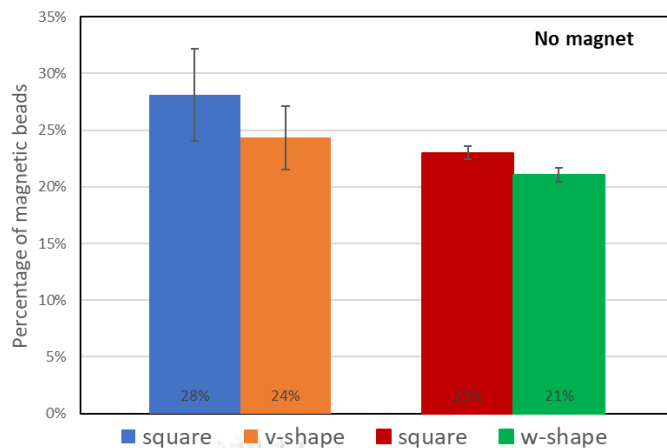
การเก็บข้อมูลในงานวิจัยนี้ได้เลือกเก็บอนุภาคหรือเซลล์ที่ช่องทางออกของอุปกรณ์มานับในอุปกรณ์การนับฮีโมไซโตมิเตอร์ เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของรูปร่างโครงสร้างของแต่ละรูปร่างจึงยกตัวอย่างการเก็บข้อมูลใน รูปที่ 5.5 ที่กรณีที่ใช้แม่เหล็กถาวรในอัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อ นาที ซึ่งเป็นการทดลองในครั้งแรก จะพบว่าค่าความน่าเชื่อถือของกราฟนี้ยังต่ำ อยู่เนื่องจากปัจจัยในการทดลองเช่นอนุภาคพาราแมกเนติกไปค้างตามท่อสายยางและในอุปกรณ์การทดลองยังเหมือนเดิม จึงส่งผลให้ได้ทำการทดลองซ้ำอีก 6 ครั้งทำให้ค่าความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อการอภิปรายผลได้

การทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพการคัดแยกอนุภาคพาราแมกเนติกที่มีขนาด 5 ไมโครเมตร โดยเริ่มจากการใช้อัตราการไหลที่ 0.04 มิลลิลิตรต่อนาทีเข้าไปในอุปกรณ์เป็นเวลา 5 นาที การทดลองแสดงให้เห็นว่ากรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวรจะไม่เกิดการสร้างแรงแมกนีโตเฟอร์ริติก ส่งผลให้ไม่เกิดการเหนี่ยวนำกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่สร้างมาจากวัสดุเฟอร์โรแมกนีติกทำให้อนุภาคพาราแมกเนติกไม่ได้เคลื่อนที่ไปเกาะกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กภายในอุปกรณ์ ทำให้ในกรณีของไม่มีแม่เหล็กถาวรอนุภาคพาราแมกเนติกหลุดออกมา 25 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณและในกรณีที่มีแม่เหล็กถาวรทำให้เกิดแรงแมกนีโตเฟอร์ริติกกระทำ พบว่าสัดส่วนของอนุภาคพาราแมกเนติกถูกดักจับไว้ภายในอุปกรณ์สามารถดักจับอนุภาคพาราแมกเนติกที่ได้ 16 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงสัดส่วนของ

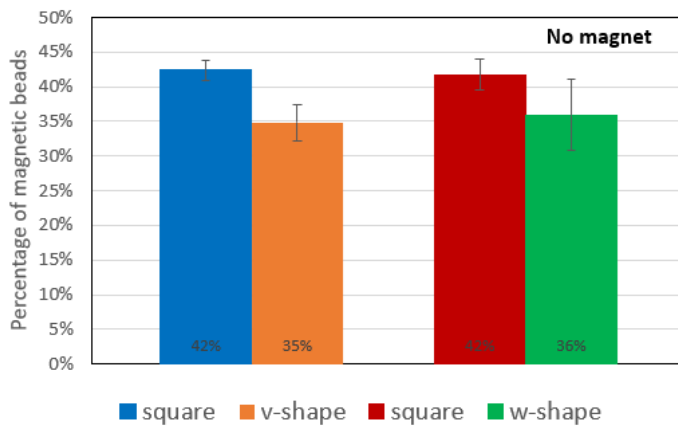
อนุภาคพาราแมกเนติกที่หลุดออกมา (รูปที่ 5.6 ก) แต่ในการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกนั้น เมื่อมีการเคลื่อนที่เข้าไปในส่วนที่เว้าของรูปีและรูปดัดเบิ้ลยู เมื่อเข้าไปแล้วอนุภาคพาราแมกเนติกจะติดค้างอยู่ด้านในโครงสร้างเป็นจำนวนมากถึง 75 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณเนื่องจากภายในของโครงสร้างมีความเร็วที่ต่ำมากซึ่งเรียกได้ว่าเป็นการดักจับที่มีผลในส่วนของรูปร่างด้วยแต่ไม่ได้ถูกดักจับด้วยแรงแมกนีโตเฟอริติกและเมื่อหยุดการทดลองทำให้อนุภาคพาราแมกเนติกยังคงค้างอยู่ในอุปกรณ์เยอะมาก จากการทดลองเห็นว่ากรณีที่ไม่มีแรงแมกนีโตเฟอริติกจะมีการหลุดของอนุภาคพาราแมกเนติกเยอะกว่ามีแรงแมกนีโตเฟอริติก แต่ส่วนที่หายไปยังคงค้างอยู่ในอุปกรณ์เป็นส่วนใหญ่และเมื่อมีใส่แรงแมกนีโตเฟอริติกเข้าไปในระบบทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของโครงสร้างเสาขนาดเล็กและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรทำให้เกิดการดักจับอนุภาคพาราแมกเนติกติดไว้ที่โครงสร้างเสาขนาดเล็กส่งผลให้การหลุดออกมายังช่องทางออกของอุปกรณ์อนุภาคพาราแมกเนติกลดลงไปอีก และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปร่างที่สามารถดักจับไว้ได้ดีคือรูปร่างวีและรูปร่างดัดเบิ้ลยูส่วนรูปร่างสี่เหลี่ยมนั้นอนุภาคพาราแมกเนติกหลุดออกมาเป็นจำนวนมากกว่า ซึ่งการทดลองนี้ได้ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 6 ครั้ง

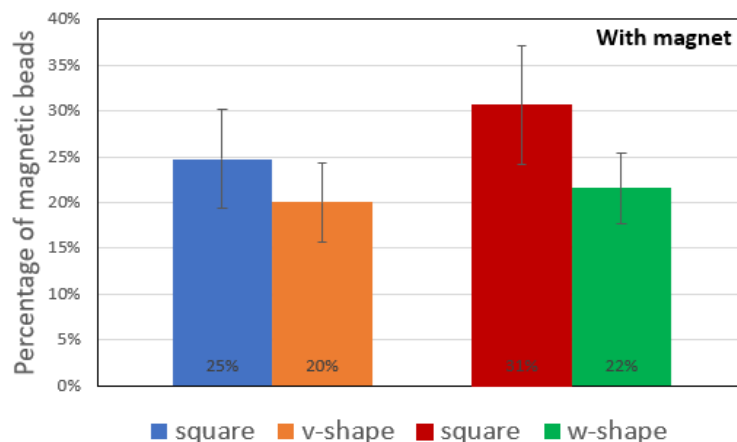
การทดลองต่อมาเริ่มจากการใช้อัตราการไหลที่ 0.04 มิลลิลิตรต่อนาทีเหมือนกับหัวข้อก่อนหน้านี้นี้แต่ในหัวข้อนี้ใช้อัตราการไหลที่ 0.8 เพิ่มขึ้นเป็น 20 เท่าของอัตราการไหลตั้งต้น ซึ่งปัญหาคือการตกค้างของอนุภาคไว้ในระบบมากเกินไป ทำให้ต้องเพิ่มอัตราการไหลที่สูงขึ้นไป อย่างไรก็ตามการทดลองยังมีกระบวนการเหมือนเดิม โดยนับจำนวนอนุภาคพาราแมกเนติกจากการทดลองเมื่อไม่มีแรงแมกนีโตเฟอริติกเข้ามาอนุภาคพาราแมกเนติกจะไม่ติดกับโครงสร้างเสาขนาดเล็ก เว้นแต่ว่ามีอนุภาคพาราแมกเนติกไหลเข้าไปอยู่ในบริเวณส่วนเว้าของโครงสร้างเป็นผลให้เกิดการดักจับโดยรูปร่าง และเมื่อมีการใส่แรงแมกนีโตเฟอริติกเข้าไปทำให้เกิดอนุภาคพาราแมกเนติกเคลื่อนที่เข้าไปเกาะกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกได้ แต่เมื่ออัตราการไหลที่สูงขึ้นทำให้อนุภาคพาราแมกเนติกเกาะติดกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กได้ลดลง เนื่องจากความเร็วของการไหลสูงมากกว่าแรงแมกนีโตเฟอริติก ทำให้ดักจับอนุภาคพาราแมกเนติกได้ค่อนข้างต่ำ จึงทำให้อนุภาคพาราแมกเนติกหลุดออกมายังช่องทางออกของอุปกรณ์มากกว่าในอัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีแสดง (รูปที่ 5.6 ข) เมื่อเปรียบเทียบกับ (รูปที่ 5.6 ก) เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลที่สูงขึ้นจำนวนของอนุภาคที่ไหลออกมาในกรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวรและกรณีที่มีแม่เหล็กถาวรจะเพิ่มขึ้นไปด้วยโดยแนวโน้มยังคงเป็นรูปร่างวีและรูปร่างดัดเบิ้ลยูที่สามารถดักจับอนุภาคพาราแมกเนติกมากกว่ารูปร่างสี่เหลี่ยม ทั้งนี้การทดลองในกรณีที่ใช้อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาทีได้ทำการทดลองทั้งหมด 6 ครั้งเช่นเดียวกัน

n



ni

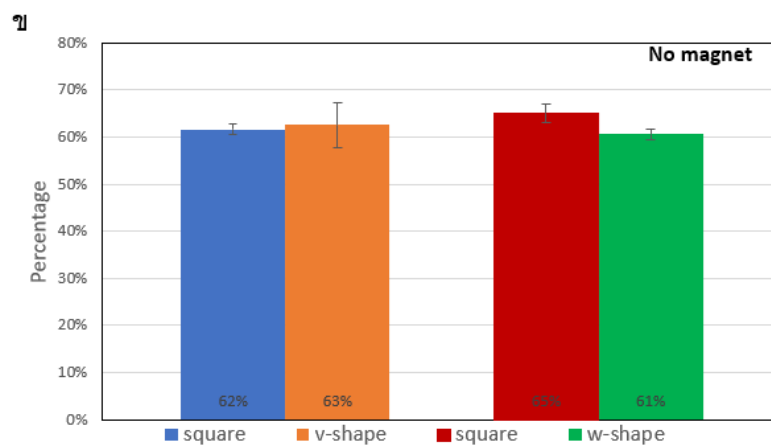
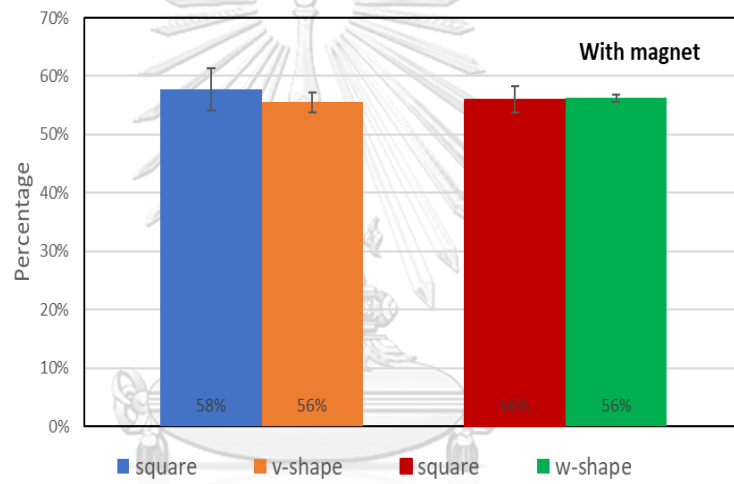
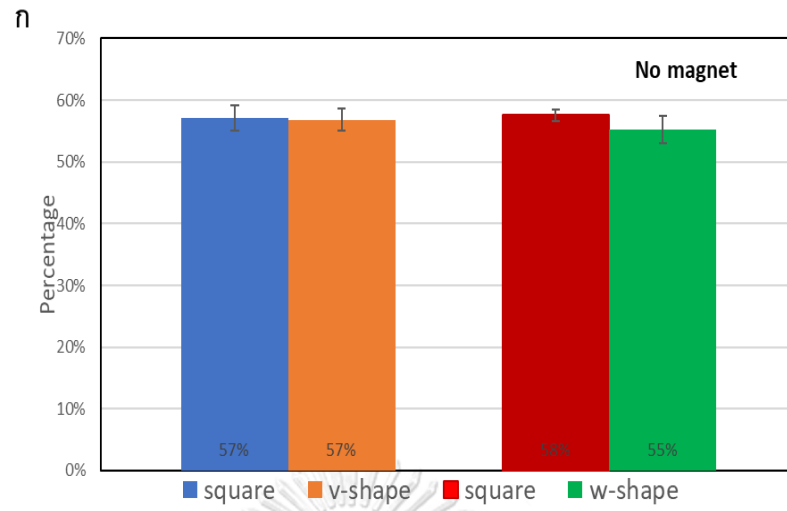


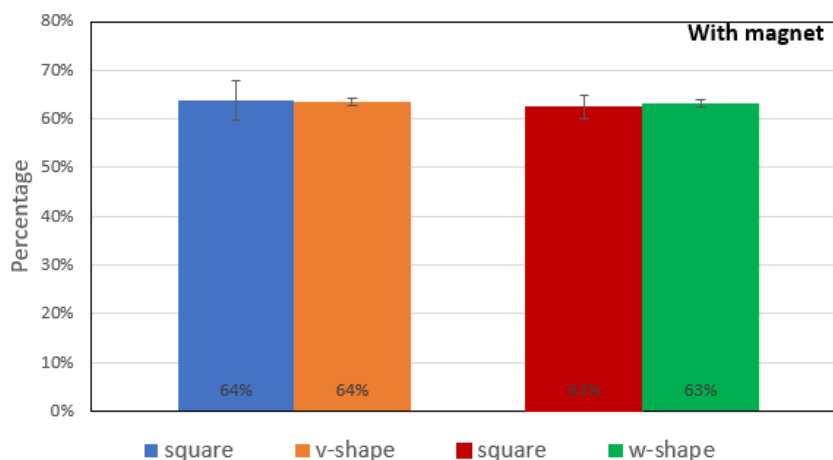


รูปที่ 5. 6 แผนภาพแสดงจำนวนอนุภาคพาราแมกเนติกที่ช่องทางออกของอุปกรณ์ (ก) อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีและ(ข) อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที

5.1.4 การทดลองของอนุภาคพลาสติกที่มีขนาด 10 ไมโครเมตร

การทดลองนี้นำอนุภาคเม็ดพลาสติกมาใช้ในการทดลองซึ่งมีขนาด 10 ไมโครเมตร การทดลองนี้แบ่งออกเป็นกรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวรและมีแม่เหล็กถาวรซึ่งใช้อัตราการไหลเดิม จะสังเกตจากการทดลองที่จะมีหรือไม่มีแม่เหล็กถาวรในระบบหรือไม่ อนุภาคเม็ดพลาสติกจะไม่ได้ส่งผลต่อแรงแมกนีโตเฟอริติกที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากไม่ได้มีคุณสมบัติของแม่เหล็กแต่การทดลองนี้ทำขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบซึ่งเป็นตัวแทนของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรีย โดยข้อมูลจะแสดงจำนวนของอนุภาคเม็ดพลาสติกที่ไหลออกมาจากระบบ (รูปที่ 5.7ก) แสดงให้เห็นจำนวนอนุภาคที่ออกจากระบบที่อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีทั้งสามรูปร่างของโครงสร้างเสาขนาดเล็กมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ทั้งในกรณีที่มีแม่เหล็กถาวรและไม่มีแม่เหล็กถาวรและ (รูปที่ 5.7ข) แสดงให้เห็นจำนวนอนุภาคที่ออกจากระบบที่อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งมีอัตราการไหลที่สูงขึ้นยังทำให้อนุภาคเม็ดพลาสติกหลุดออกมายังช่องทางออกมากขึ้นเป็นแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน

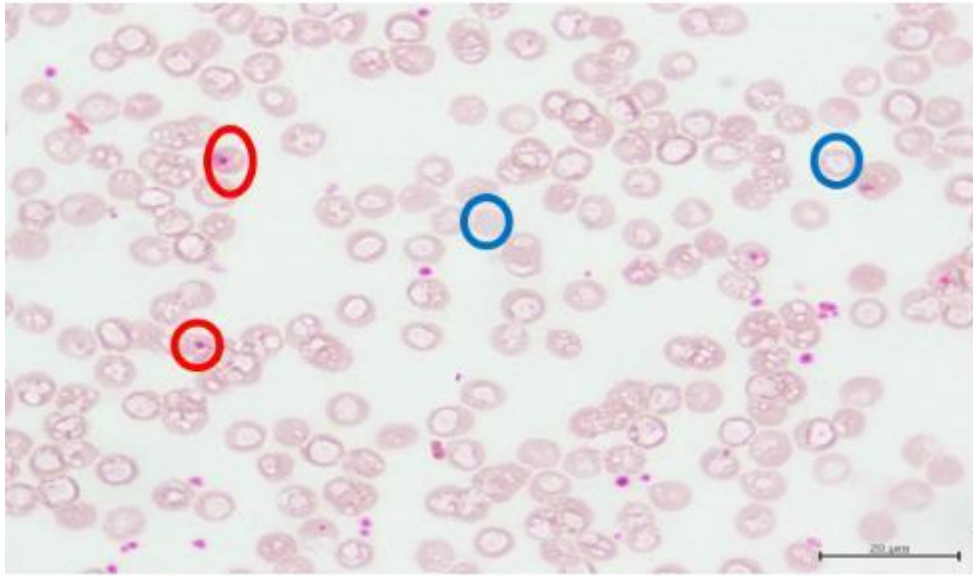




รูปที่ 5. 7 แผนภาพแสดงจำนวนอนุภาคพลาสติกที่ไหลออกจากระบบ (ก) อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีและ (ข) อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที

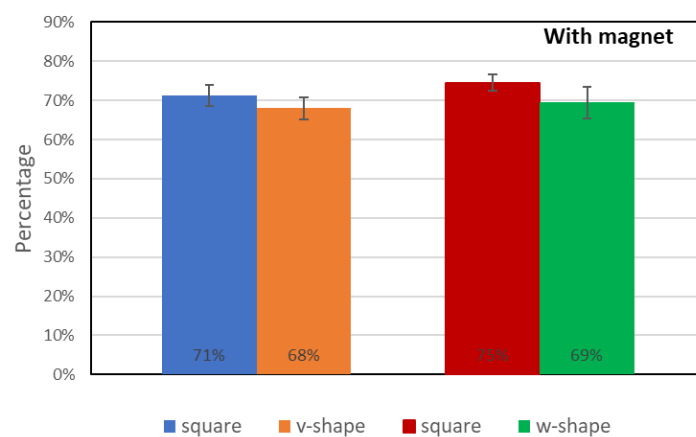
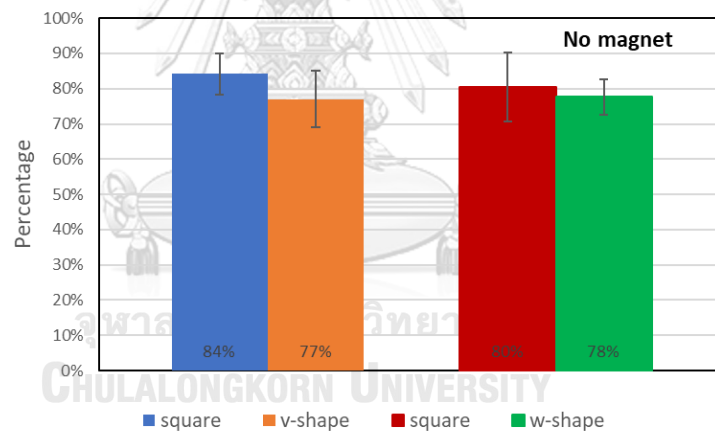
5.2 การทดลองกับเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียจากหนูทดลองโดยมีระยะเวลาติดเชื้อที่ 2 วัน

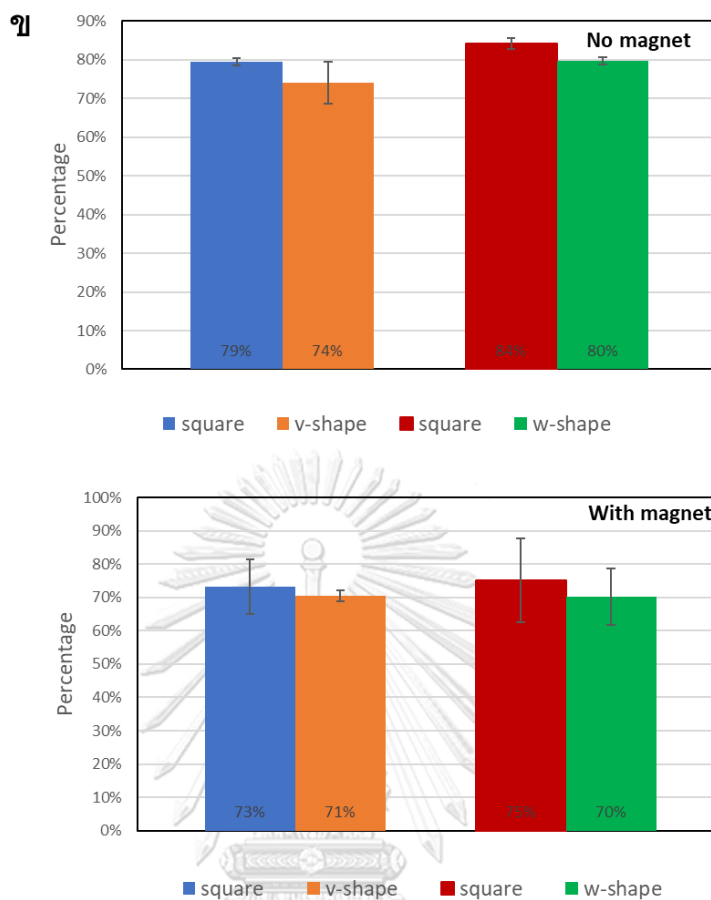
การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบของไหลจุลภาคในการคัดแยกเซลล์มาลาเรียที่ติดเชื้อมาลาเรียนั้น ต้องเตรียมเซลล์ที่มีการฉีดเข้าไปในตัวหนูทดลองเป็นเวลา 2 วันนำมาตรวจความเข้มข้นของการติดเชื้ออาศัยวิธีการย้อมสีเลือด (Giemsa stain) รูปที่ 5.8 ภาพไตกล้องจุลทรรศน์ใช้กำลังขยายที่ 100 เท่า เห็นได้ชัดเจนว่าการติดเชื้อมาลาเรียในระยะเวลา 2 วันจากนั้นมีการติดเชืื่อน้อยมากอยู่ที่ประมาณ 1.5เปอร์เซ็นต์ ทำการทดลองที่มีลักษณะคล้ายกับการทดลองกับอนุภาคพาราแมกเนติก ซึ่งมีการติดตั้งการทดลองไว้ในหัวข้อที่ 4.8 โดยการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 กรณีได้แก่ ไม่มีแม่เหล็กถาวรตั้งนั้นในกรณีนี้จะมีเซลล์ที่ติดเชื้อและไม่ติดเชื้อหลุดออกมาในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน เพราะไม่มีแรงแมกนีโตเฟอริติกเข้าไปช่วยในการคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื้อออกจากเซลล์ที่ไม่ติดเชื้อ แต่จะมีเซลล์ที่ค้างอยู่ในอุปกรณ์และมีเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียบางส่วนไปติดอยู่กับโครงสร้างเสาขนาดเล็กเป็นผลมาจากความไม่สม่ำเสมอของผิวโครงสร้างเสาขนาดเล็ก และกรณีมีแม่เหล็กถาวรเพื่อทำให้เกิดแรงแมกนีโตเฟอริติกเข้าไปช่วยในการคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื้อออกจากเซลล์ที่ไม่ติดเชื้อซึ่งจะนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกัน โดยเลือดที่ติดเชื้อมาลาเรียจะถูกดึงเลือดออกจากหัวใจของสัตว์ทดลองซึ่งได้เชื้อมาเป็นปริมาตร 1 มิลลิลิตร ในตัวอย่างเลือดนั้นมีทั้งเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรีย เซลล์ที่ไม่ติดเชื้อมาลาเรีย เซลล์เม็ดเลือดขาว และเกล็ดเลือด เป็นต้น



รูปที่ 5. 8 การประเมินอัตราส่วนของเซลล์ที่ติดเชื้อและไม่ติดเชื้อในระยะเวลาการติดเชื้อ 2 วันเซลล์ในวงกลมสีแดงและสีน้ำเงินคือเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียและเซลล์ที่ไม่ติดเชื้อมาลาเรียตามลำดับ

ก





รูปที่ 5. 9 แผนภาพแสดงจำนวนเซลล์ที่หลุดออกของอุปกรณ์ระยะการติดเชื้อ 2 วัน (ก) อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีและ(ข) อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.1 การทดลองที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีในเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียเป็นระยะเวลา 2 วัน

การทดลองของเซลล์มาลาเรียที่มีระยะการติดเชื้อ 2 วันยังถูกแบ่งย่อยอีกในเรื่องการของปรับเปลี่ยนอัตราการไหล เนื่องจากถ้าใช้อัตราการไหลที่ต่ำมากเกินไปจะทำให้เซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียค้างอยู่ในอุปกรณ์มากเกินไป และยังส่งผลทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการนับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียที่ช่องทางออกของอุปกรณ์การทดลองเริ่มจากใช้อัตราการไหลที่ 0.04 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที และปรับอัตราการไหลไปที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาที จากการทดลองเห็นได้ชัดว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลขึ้นไป แล้วทำให้เซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียไหลไปยังช่องทางออกของอุปกรณ์ได้มากขึ้น แต่ก็ยังมีการตกค้างอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งในกรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวร เซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียจะเคลื่อนที่ออกมาเป็นจำนวนมากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียจะหลุดออกมาถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และกรณีที่มีแม่เหล็กถาวรจะเกิดแรงแม่เหล็กไนโตรเฟอริติก

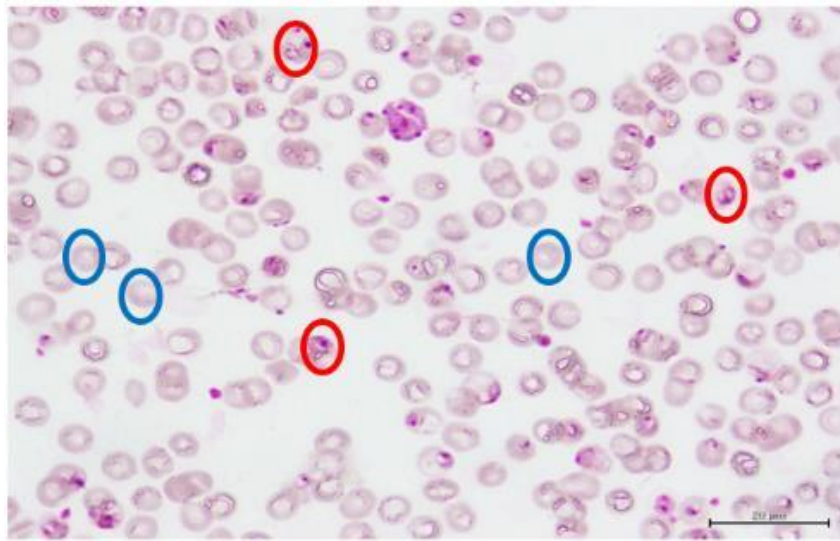
แต่ในตัวอย่างเลือดนี้มีการติดเชื้อของมาลาเรียน้อยมากทำให้แถบจะไม่สามารถดักจับเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียได้เลยในเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียมีระยะฟักตัว 2 วัน เห็นได้จากเปอร์เซ็นต์ของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียที่หลุดออกมายังช่องทางออกในกรณีที่มีแม่เหล็กถาวรถึงประมาณ 78 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความใกล้เคียงกับกรณีไม่มีแม่เหล็กซึ่งสัดส่วน (รูปที่ 5.9ก) ในระยะการติดเชื้อมาลาเรียที่ 2 วัน ยังไม่อาจจะบอกถึงประสิทธิภาพของรูปร่างที่สามารถดักจับได้เพราะระยะการติดเชื้อที่น้อยมาก ทำให้เซลล์หลุดออกมาเป็นจำนวนมากกว่าที่จะถูกดักจับไว้

5.2.2 การทดลองที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาทีในเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียเป็นระยะเวลา 2 วัน

การทดลองกับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียที่มีระยะการติดเชื้อ 2 วัน ใช้อัตราไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการทดลองที่เหมือนกันกับการทดลองของอนุภาคพาราแมกเนติก จากการทดลองกับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นไปนั้นทำให้เซลล์มาลาเรียเคลื่อนที่ออกจากอุปกรณ์เป็นจำนวนมาก รวมไปถึงเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียติดตามโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างนั้นหลุดออกมาด้วย เนื่องจากอัตราการไหลที่สูงมาก (รูปที่ 5.9ข) แสดงให้เห็นถึงจำนวนของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียนับได้จากช่องทางออกของอุปกรณ์ ซึ่งในกรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวรในอุปกรณ์เห็นได้ชัดว่าเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียออกมาเป็นจำนวนมาก และกรณีที่มีแม่เหล็กถาวร เซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียยังไม่ติดในอุปกรณ์การดักจับ ซึ่งยังมีจำนวนใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีแม่เหล็กด้วย เนื่องจากหัวข้อก่อนหน้านี้ใช้เลือดชนิดเดียวกันที่ตรวจสอบแล้วว่าการติดเชื้อของมาลาเรียน้อยมากส่งผลให้ทั้งกรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวรและมีแม่เหล็กถาวร เซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียหลุดออกมาเป็นจำนวนที่ใกล้เคียงกันทั้งสองกรณีเพราะระยะของการติดเชื้อมาลาเรียที่ต่ำ

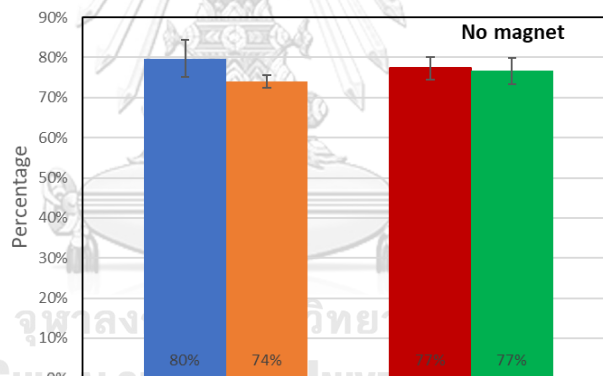
5.3 การทดลองกับเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียจากหนูทดลองโดยมีระยะการติดเชื้อที่ 5 วัน

การทดลองกับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียมีระยะการติดเชื้อ 5 วันนั้น เมื่อรับเลือดแล้วนำไปประเมินการติดเชื้อโดยใช้วิธีการย้อมสีเหมือนเดิมดังรูปที่ 5.10 พบว่าในระยะที่ติดเชื้อ 5 วันมีการติดเชื้ออยู่ที่ประมาณ 8.5 เปอร์เซ็นต์ มีการเพิ่มขึ้นของจำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียเพิ่มขึ้นมากกว่าระยะการติดเชื้อที่ 2 วัน ไม่มากเท่าที่ควร โดยการทดลองนี้ยังแบ่งออกเป็นกรณีที่มีและไม่มีแม่เหล็กถาวร

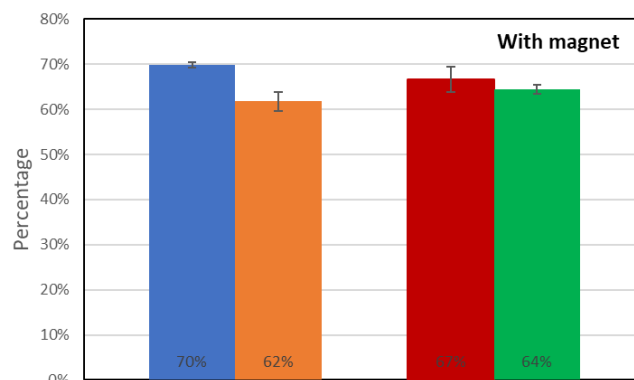


รูปที่ 5. 10 การประเมินอัตราส่วนของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้และเซลล์เม็ดเลือดแดงไม่ติดเชื้
 ระยะการติดเชื้ 5 วันเซลล์ในวงกลมสีแดงและสีน้ำเงินคือเซลล์ที่ติดเชื้มาลาเรียและเซลล์ที่ไม่ติด
 เชื้มาลาเรียตามลำดับ

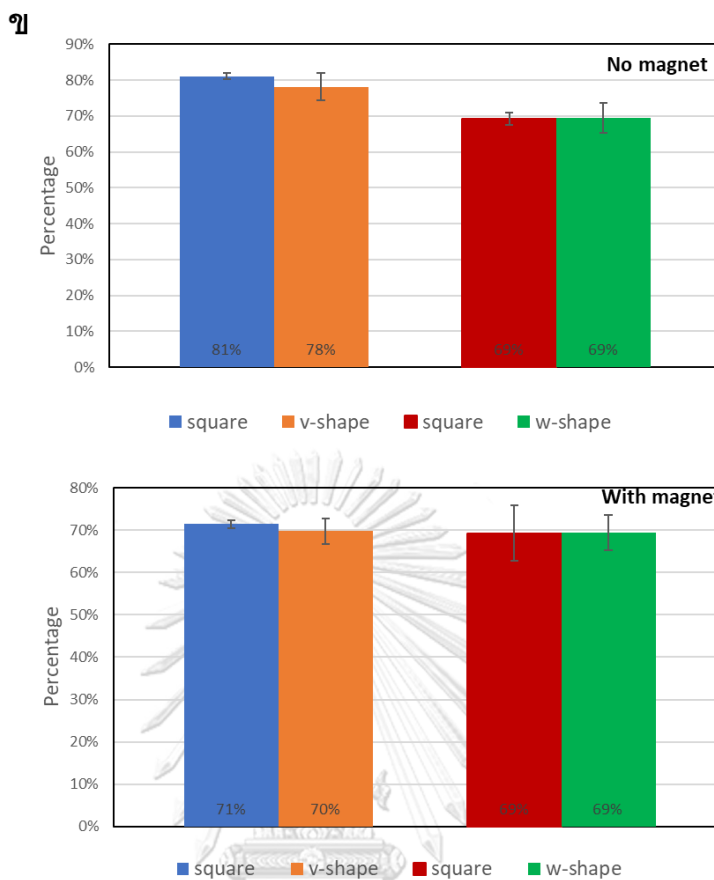
ก



■ square ■ v-shape ■ square ■ w-shape



■ square ■ v-shape ■ square ■ w-shape



รูปที่ 5. 11 แผนภาพแสดงจำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียหลุดออกจากอุปกรณ์ที่ระยะการติดเชื้อ 5 วัน (ก) อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีและ(ข) อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.3.1 การทดลองที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีในเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียเป็นระยะเวลา 5 วัน

การทดลองในเงื่อนไขใช้อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งการทดลองยังถูกแบ่งออกเป็นกรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวรทำให้การเคลื่อนที่ของเซลล์ทั้งที่ติดเชื้อ และไม่ติดเชื้อไหลออกไปยังช่องทางออกของอุปกรณ์ และกรณีที่มีแม่เหล็กถาวรทำให้เกิดแรงแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปค้ำแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์ที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรีย (รูปที่ 5.11ก) แสดงให้เห็นว่าจำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียกรณีไม่มีแม่เหล็กถาวรเซลล์ที่ได้จากการนับจะมีทั้งเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียและเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรียออกมาพร้อมกัน เห็นได้ชัดว่ามีเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียบางส่วนค้างอยู่ในอุปกรณ์ ซึ่งปรากฏการณ์แบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่องานวิจัยนี้หยุดการทำงานของเครื่องปั๊มดิจิตอลหลังจากหยุดการทำงานของเครื่อง ซึ่งเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติด

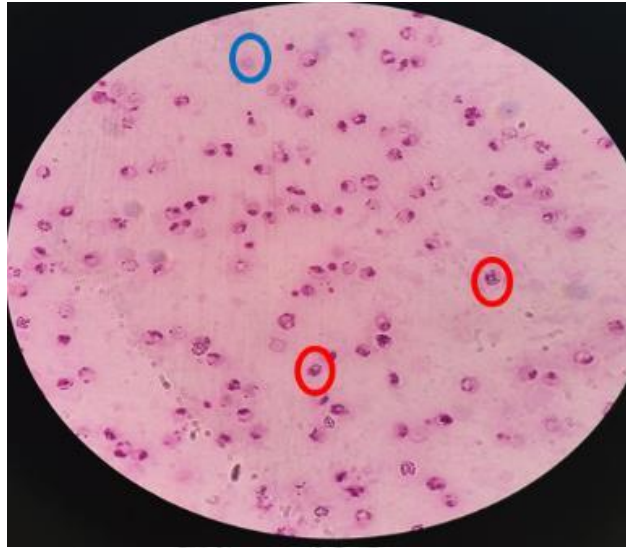
เชื่อมาลาเรียที่อยู่ภายในอุปกรณ์จะหยุด และค้างอยู่ภายในตามท่อทางเข้าอุปกรณ์และภายในตัวของช่องทางการไหลด้วย ทั้งนี้เมื่อทดลองในกรณีที่มีแม่เหล็กถาวรจะเกิดแรงแรงแม่เหล็กไนโตเฟอร์ริกขึ้นในระบบทำให้ไปส่งผลต่อการคัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมาลาเรีย ซึ่งในระยะเวลาการติดเชื้อที่ 5 วันเห็นได้ชัดว่าเมื่อมีแรงแรงแม่เหล็กไนโตเฟอร์ริกกระทำจำนวนของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมาลาเรียหลุดออกมายังช่องทางออกของอุปกรณ์ยังสูงอยู่ ซึ่งทั้งสองกรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวรและมีแม่เหล็กถาวรมีจำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมาลาเรียไหลออกมาที่ใกล้เคียงกันอยู่ แต่ยังมีการค้างของเซลล์ภายในอุปกรณ์

5.3.2 การทดลองที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาทีในเซลล์ที่ติดเชื่อมาลาเรียเป็นระยะเวลา 5 วัน

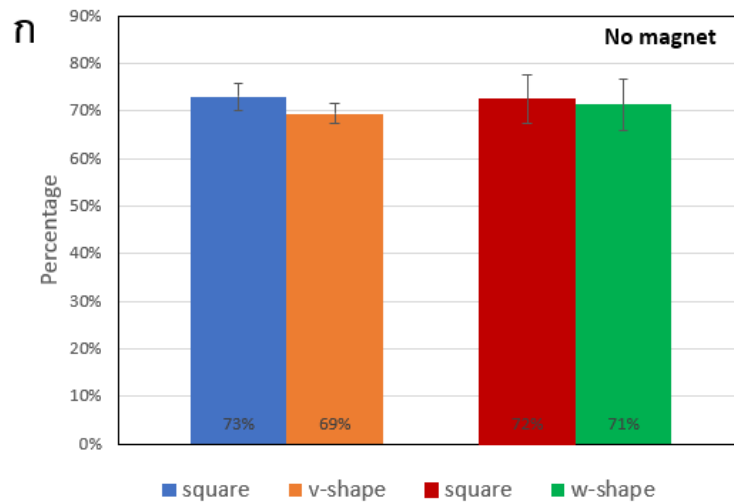
การทดลองเพิ่มอัตราการไหลไปที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที การทดลองใช้อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที (รูปที่ 5.11ข) แสดงให้เห็นถึงกรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวร เมื่อเพิ่มอัตราการที่สูงขึ้นทำให้การเคลื่อนที่ของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมาลาเรียหลุดออกมายังช่องทางออกสูงมากขึ้น และจากการทดลองก่อนหน้ามีเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมาลาเรียบางส่วนไปติดตามโครงสร้างเสาขนาดเล็กเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของผิวโครงสร้างเมื่อมาถึงการใช้อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาทีทำให้เซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมาลาเรียหลุดออกมามาก บางส่วนจากที่อนุภาคติดค้างอยู่ตามโครงสร้างเสาขนาดเล็กเมื่อเพิ่มอัตราการไหลที่สูงขึ้นทำให้ลดเซลล์ที่หลุดออกมามากขึ้น และกรณีมีแม่เหล็กถาวรจะทำให้เกิดเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมาลาเรียบางส่วนเข้าไปติดตามโครงสร้างเสาขนาดเล็กซึ่งเกิดขึ้นด้านในส่วนเว้าของโครงสร้างเสาขนาดเล็กในรูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยู แต่เนื่องจากระยะเวลาการติดเชื่อมาลาเรียที่ยังไม่มากทำให้เซลล์หลุดออกจากการดักจับภายในอุปกรณ์ของงานวิจัยนี้ และยังไม่สามารถสรุปประสิทธิภาพของรูปร่างโครงสร้างเสาขนาดเล็กได้เนื่องจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมาลาเรียยังต่ำเกินไป

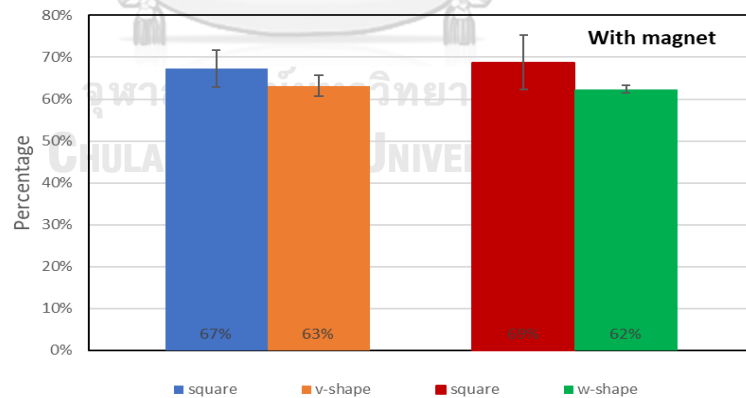
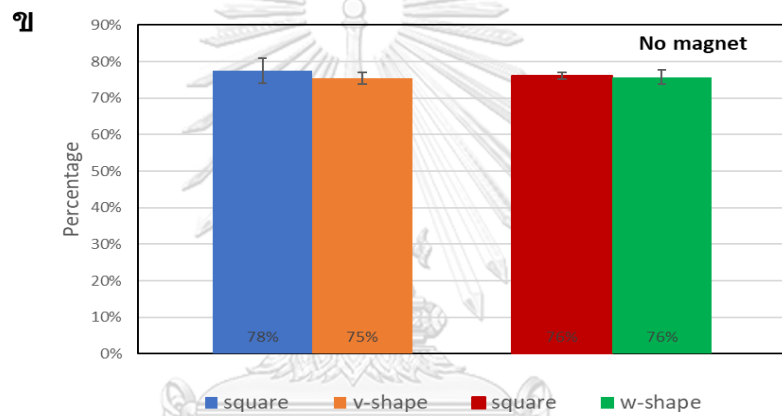
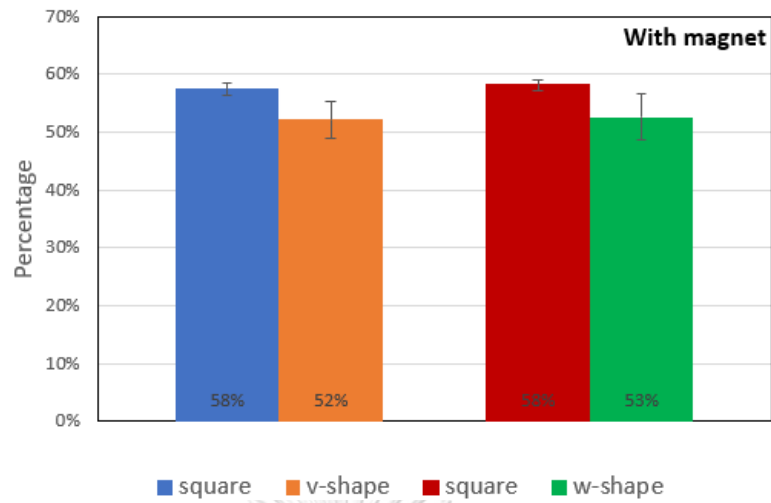
5.4 การทดลองกับเซลล์ที่ติดเชื่อมาลาเรียจากหนูทดลองโดยมีระยะเวลาการติดเชื้อที่ 7 วัน

การทดลองกับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมาลาเรียมีระยะเวลาการติดเชื้อ 7 วันนั้นเมื่อรับเลือดมาแล้วนำไปประเมินการติดเชื้อ โดยใช้วิธีการย้อมสีเหมือนเดิม รูปที่ 5.11 พบว่าในระยะเวลาที่ติดเชื้อ 7 วันมีการติดเชื้ออยู่ที่ประมาณ 86 เปอร์เซ็นต์ มีการเพิ่มขึ้นของจำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมาลาเรียเพิ่มขึ้นมากกว่าระยะเวลาการติดเชื้อที่ 2 และ 5 วันเป็นอย่างมาก



รูปที่ 5. 12 การประเมินอัตราส่วนของเซลล์ที่ติดเชื้อและไม่ติดเชื้อในระยะการติดเชื้อ 7 วันเซลล์ในวงกลมสีแดงและสีน้ำเงินคือเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียและเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อมาลาเรียตามลำดับ





รูปที่ 5. 13 แผนภาพแสดงจำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาเรียหลุดออกจากอุปกรณ์ที่ระยะการติดเชื่อ 7 วัน (ก) อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีและ(ข) อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที

5.4.1 การทดลองที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีในเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียเป็นระยะเวลา 7 วัน

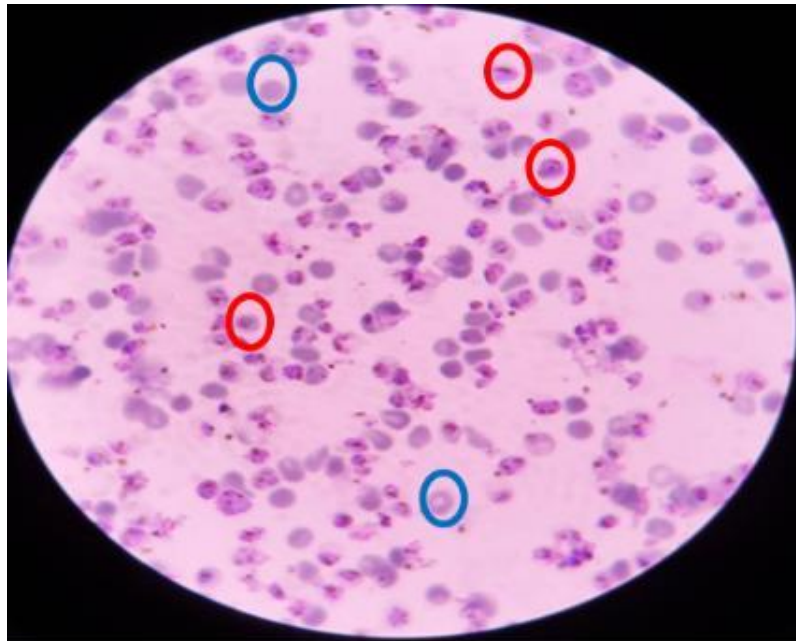
การทดลองใช้อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาที (รูปที่ 5.13ก) แสดงตัวอย่างเลือดที่มีการติดเชื้อของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียสูงมากพอสมควร ในกรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวรจะไม่เกิดแรงแมกนีโตเฟอริติกทำให้เซลล์หลุดออกมาไปยังช่องทางออกเป็นจำนวนมาก และบางส่วนยังคงค้างอยู่ในตามท่อทางเข้าอุปกรณ์ และภายในตัวของช่องทางไหลและกรณีที่มีแม่เหล็กถาวรทำให้เกิดแรงแมกนีโตเฟอริติกเกิดการเหนี่ยวนำให้เซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียเข้ามาติดกับโครงสร้างเสาขนาดเล็ก และยังแสดงให้เห็นว่าจากการทดลองจากตัวอย่างเลือดหนูนั้การทดลองที่มีระยะเวลาการติดเชื้อที่ 2 และ 5 วันมีการดักจับไว้ตามโครงสร้างเสาขนาดเล็กน้อยมาก ส่วนระยะเวลาการติดเชื้อที่ 7 วันมีจำนวนเซลล์ติดเชื้อมาลาเรียหลุดออกมาไปยังช่องทางออกของอุปกรณ์ได้น้อยกว่าพบว่าเป็นกรณีที่แม่เหล็กถาวรเกิดแรงแมกนีโตเฟอริติกเปอร์เซ็นต์ที่เซลล์มาลาเรียหลุดออกมาอยู่ที่ 58 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณโดยรูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยูมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันส่วนรูปร่างสี่เหลี่ยมมีเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียหลุดออกเป็นจำนวนมากกว่า

5.4.2 การทดลองที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาทีในเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียเป็นระยะเวลา 7 วัน

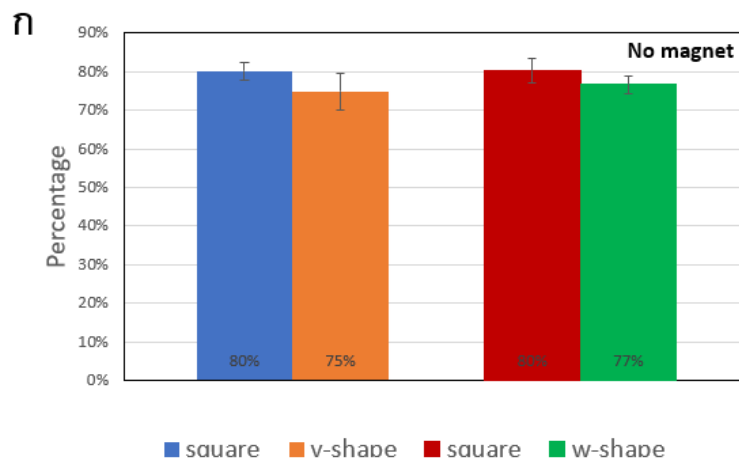
การทดลองในเรื่องนี้ใช้อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาทีเนื่องจากอัตราการไหลที่สูงทำให้จำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียหลุดออกมาทางช่องทางออกของอุปกรณ์เยอะกว่าการใช้อัตราการไหลที่ต่ำทั้งนี้ส่วนที่หายไปยังคงติดอยู่ตามท่อทางเข้าอุปกรณ์และภายในตัวของช่องทางไหล (รูปที่ 5.13ข)

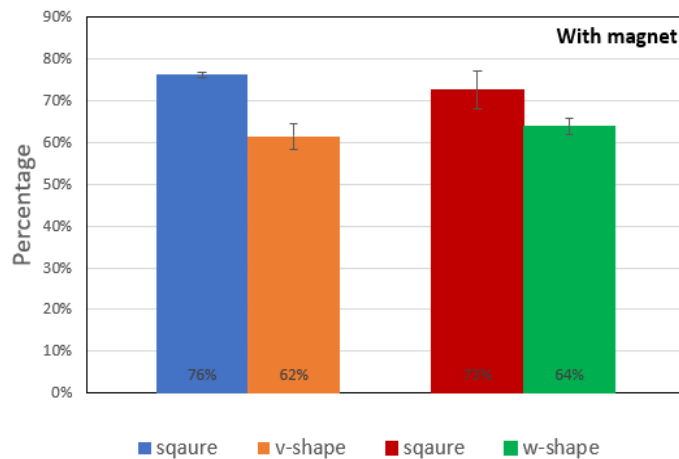
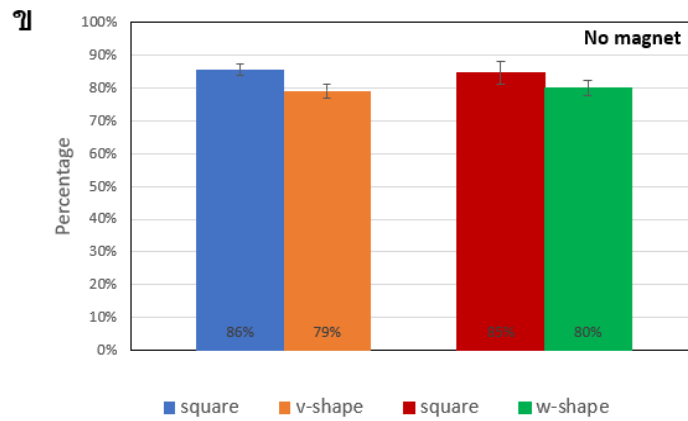
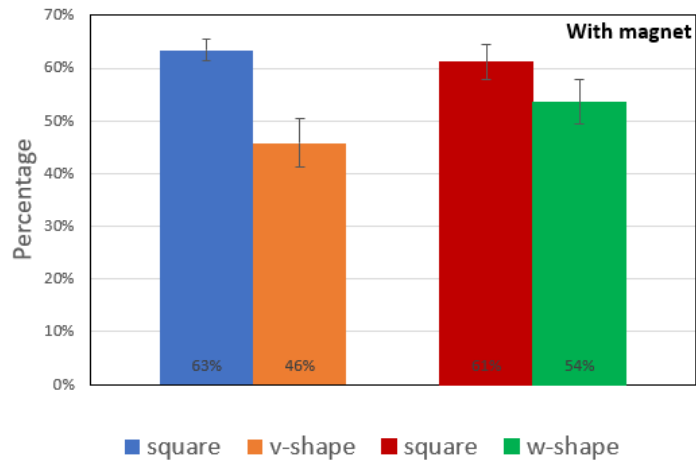
5.5 การทดลองกับเซลล์ที่ติดเชื้อมาลาเรียจากคน

การทดลองกับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียในคนต้องเตรียมสารตัวอย่าง ซึ่งกล่าวในหัวข้อที่ 4.7.3 เมื่อได้สารตัวอย่างพร้อมที่จะทำการทดลองแล้วนำเลือดบางส่วนไปตรวจสอบ โดยวิธีการย้อมสี (Giemsa stain) เพื่อประเมินการติดเชื้อของเซลล์มาลาเรีย ซึ่งผลการประเมินเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียมีจำนวนการติดเชื้ออยู่ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 5.14 เห็นได้ชัดว่ามีความหนาแน่นของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้ออยู่มาก ซึ่งข้อดีของเลือดในการทดลองนี้ถูกเลี้ยงเซลล์ให้อยู่ในระยะเวลาการติดเชื้อที่มากพอสมควรถึงจะนำมาคัดแยกได้ อย่างไรก็ตามปริมาณเลือดที่มีอยู่จำกัดทำให้สามารถทดลองได้เพียงแค่ครั้งเดียว



รูปที่ 5. 14 การประเมินอัตราส่วนของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาและเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อในคนในวงกลมสีแดงและสีน้ำเงินคือเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาและเซลล์เม็ดเลือดขาวตามลำดับ





รูปที่ 5. 15 แผนภาพแสดงจำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียหลุดออกจากอุปกรณ์ที่ระยะการติดเชื้อในคน (ก) อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีและ(ข) อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที

5.5.1 การทดลองที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีในเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียในคน

การทดลองในเงื่อนไขที่เซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียในคนจากการประเมินในการย้อมสีแล้วเห็นได้ชัดว่ามีเปอร์เซ็นต์การติดเชื้อที่สูงพอสมควร ดังนั้นถูกนำมาทดลองในรูปร่างของโครงสร้างเสาคขนาดเล็กรูปสี่เหลี่ยม รูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยู ซึ่งในการทดลองนี้ใช้อัตราการไหลที่ 0.04 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาทีและเพิ่มอัตราการไหลขึ้นมาที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 2 นาที แล้วนำมานับที่ช่องทางออกของอุปกรณ์ โดยเก็บผลทั้งสามรูปร่าง ซึ่งมีจำนวนการนับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียที่ออกมาทางช่องทางออกของอุปกรณ์ (รูปที่ 5.15ก) พบว่ากรณีที่ไม่ม่แม่เหล็กถาวรในระบบส่งผลให้เซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียเคลื่อนที่ออกมามาก ซึ่งทั้งสามรูปร่างมีความสอดคล้องกันและกรณีที่มีแม่เหล็กถาวรเห็นได้ชัดว่าเกิดแรงแมกนีโตเฟอร์ติกขึ้นทำให้สามารถดักจับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียติดไว้กับรูปร่างต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นการเคลื่อนที่ออกมายังช่องทางออกลดน้อยลง เนื่องจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมีความหนาแน่นอยู่จำนวนมากทำให้เซลล์ไปเกาะติดด้วยแรงแมกนีโตเฟอร์ติกได้ค่อนข้างดี โดยรูปร่างของโครงสร้างเสาคขนาดเล็กที่เซลล์สามารถดักจับให้เซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียติดอยู่ในโครงสร้างเสาค ส่งผลให้เซลล์เม็ดเลือดแดงหลุดออกมายังช่องทางออกของอุปกรณ์น้อยลง ซึ่งรูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยูมีประสิทธิภาพการดักจับได้ 46 เปอร์เซ็นต์และ 54 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สามารถดักได้ดีกว่ารูปร่างสี่เหลี่ยมที่มีเปอร์เซ็นต์การดักจับอยู่ที่ 63 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีการตกค้างอยู่ในระบบเป็นจำนวนมาก

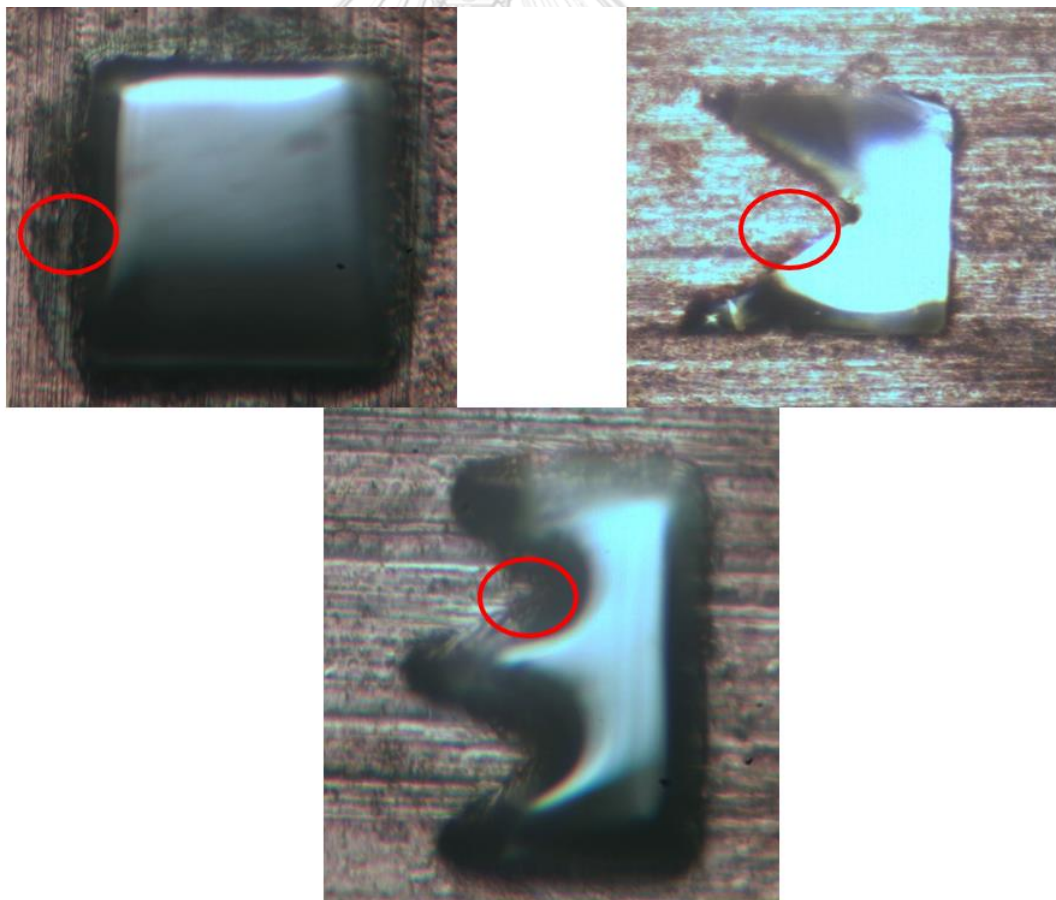
5.5.2 การทดลองที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาทีในเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียในคน

การทดลองนี้ใช้อัตราการไหลที่ 0.04 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาทีและเพิ่มอัตราการไหลขึ้นมาที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 1 นาที แล้วนำมานับที่ช่องทางออกของอุปกรณ์ โดยเก็บผลในรูปร่างทั้งสามรูปร่าง ซึ่งจำนวนการนับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ออกมาทางช่องทางออกของอุปกรณ์ (รูปที่ 5.15ข) มีจำนวนมากขึ้น

ในการทดลองการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อมมาลาเรียนั้น ขณะทำการทดลองนั้นจะสังเกตการเคลื่อนที่ของเซลล์ที่เคลื่อนที่เข้ามาติดกับโครงสร้างเสาคขนาดเล็กได้ยากมาก เนื่องจากเซลล์เม็ดเลือดแดงนั้นมีความใสมากกว่าอนุภาคพาราแมกเนติกและเซลล์เม็ดเลือดแดงเคลื่อนที่เข้ามาเป็นจำนวนมากซ้อนกันยิ่งทำให้สังเกตได้ยากขึ้นกว่าเดิมดังนั้นการวิจัยนี้ได้เลือกวิธีเมื่อทำการทดลองเสร็จสิ้น แล้วถอดอุปกรณ์ด้านบนคืออะคิลิกออก ขั้นตอนการถอดต้องมีความระมัดระวังพอสมควรไม่ให้ช่องทางการไหลด้านในเคลื่อนหลุดออกมา

เช่นนั้นจะทำให้เซลล์ที่เข้าไปเกาะติดกับโครงสร้างเสาแล้วหลุดไปยังบริเวณอื่น พอถอดอะคลิก ด้านบนออกแล้วนำอุปกรณ์ไปส่องใต้กล้องจุลทรรศน์เพื่อหาการเซลล์ที่ไปเกาะติดตามโครงสร้างเสา บริเวณต่าง ๆ ซึ่งแสดง รูปที่ 5.16 ซึ่งจะสังเกตในกรณีที่มีแม่เหล็กถาวรในระบบเท่านั้นซึ่งหมายถึงว่า โครงสร้างเสาขนาดเล็กในรูปร่างต่างๆถูกเหนี่ยวนำด้วยแรงแม่เหล็ก ดังนั้นแม่เหล็กถาวรยังอยู่ใน ระบบก็ยังมีแรงแมกนีโตเฟอร์ติกช่วยให้เกิดการติดกับเซลล์ที่ติดเข้าไปในระบบได้

จากการสังเกตใน รูปที่ 5.16 พบว่ารูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยู เซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเข้ามาแลเรียเข้าไปติดไว้ในส่วนบริเวณที่เป็นส่วนเว้าด้านในของรูปร่างอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะแตกต่างจากรูปร่างสี่เหลี่ยมที่จะติดอยู่ตามผิวด้านนอกของโครงสร้างเนื่องจากตามขอบของรูปร่างสี่เหลี่ยมจะมีแรงทางการไหลที่สูงกว่าแรงแมกนีโตเฟอร์ติก ซึ่งจะแตกต่างจากรูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยู บริเวณส่วนเว้านั้นมีแรงการไหลที่ต่ำแต่ยังมีแรงแมกนีโตเฟอร์ติกอยู่บ้างทำให้เห็นเซลล์เข้าไปติดในบริเวณ ส่วนเว้าได้



รูปที่ 5. 16 เซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเข้ามาแลเรียเคลื่อนที่เข้าไปติดตามโครงสร้างเสาในรูปร่างสี่เหลี่ยม รูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยู

5.6 สรุป

การทดลองเบื้องต้นเพื่อทดสอบระบบของไหลจุลภาคของงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการคัดแยก โดยอาศัยแรงแรงแม่เหล็กเพื่อดีกรีการแยกเหนี่ยวนำกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่ทำมาจากวัสดุเฟอร์ไรต์ โดยอาศัยแรงแรงแม่เหล็กเพื่อดีกรีการแยกเหนี่ยวนำกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่ทำมาจากวัสดุเฟอร์ไรต์ ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดอนุภาคพาราแมกเนติกเข้ามาติดกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กทั้งสามรูปร่างได้

การทดลองกับอนุภาคพาราแมกเนติกได้ดำเนินการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 6 ครั้งแบ่งออกเป็นสองกรณีศึกษาคือใช้อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีและ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที แต่ละกรณีถูกแบ่งย่อยเพื่อจะศึกษาถึงเงื่อนไขที่ไม่มีแม่เหล็กถาวรและมีแม่เหล็กถาวร ซึ่งการทดลองกรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวรนั้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกเคลื่อนที่ออกมาจากระบบมีจำนวนไม่มากนักเนื่องจากผลของรูปร่างที่ผิวของโครงสร้างเสานั้นมีความไม่สม่ำเสมอ ทำให้อนุภาคพาราแมกเนติกลงไปติดตามผิวหยาบนั้น ซึ่งเมื่อใช้อัตราการไหลที่สูงขึ้นไป อนุภาคพาราแมกเนติกจะหลุดออกไปด้วย และกรณีที่มีแม่เหล็กถาวรในระบบนั้นทำให้เกิดการแรงแม่เหล็กเพื่อดีกรีการดูดอนุภาคพาราแมกเนติกดูดติดกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กไว้ ทำให้ช่องทางออกของอุปกรณ์มีอนุภาคพาราแมกเนติกเคลื่อนที่ออกมาน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีแม่เหล็ก แต่ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากอนุภาคพาราแมกเนติกค้างในระบบและตามบริเวณช่องทางขาเข้าเป็นจำนวนมาก

การทดลองเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียในหนูทดลอง การทดลองแบ่งเป็นระยะการติดเชื้อที่ 2, 5 และ 7 วัน กรณีศึกษาการใช้อัตราการไหลที่เหมือนกับการทดลองอนุภาคพาราแมกเนติกรวมไปถึงศึกษากรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวรและมีแม่เหล็กถาวร จากการทดลองทำให้รู้ว่าเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ระยะการติดเชื้อที่ 2 วัน และ 5 วัน ส่งผลต่อการดักจับของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากความหนาแน่นของเซลล์ที่ติดเชื้อยังไม่มากพอ และระยะการติดเชื่อมมาลาเรียยังไม่สูงมากทำให้เซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียนั้นเคลื่อนที่ออกมาทางช่องทางออกของอุปกรณ์เป็นจำนวนมากรวมไปถึงยังค้างอยู่ในระบบเป็นจำนวนมาก ผลการทดลองที่ระยะการติดเชื้อที่ 7 วัน พบว่าโครงสร้างรูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยูมีแนวโน้มในการดักจับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียมาติดกับโครงสร้างได้ดีกว่ารูปร่างสี่เหลี่ยมเนื่องจากระยะการติดเชื้อที่สูง

การทดลองของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียในคน ซึ่งเป็นการเพาะเลี้ยงเซลล์ให้ติดเชื่อมมาลาเรียทำให้มีการติดเชื้อที่ระยะค่อนข้างสูงได้ง่าย การทดลองพบว่าความสามารถในการดักจับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียโครงสร้างรูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยูมีประสิทธิภาพในการดักจับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียได้มากกว่าโครงสร้างรูปร่างสี่เหลี่ยม

บทที่ 6

สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการตัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรีย โดยใช้แม่เหล็กถาวรและเพิ่มโครงสร้างเสาขนาดเล็กเข้ามาในระบบตัดแยกเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรีย ซึ่งใช้แม่เหล็กถาวรจะทำให้เกิดแรงแมกนีโตเฟอร์ติกเข้ามามีบทบาทในการตัดแยก โดยอาศัยคุณสมบัติของเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียมาช่วยในการตัดแยกออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อ และอาศัยระบบของไหลจุลภาคเข้ามาประกอบกันเป็นช่องทางการไหลขนาดเล็กที่สร้างจาก PDMS ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์เม็ดเลือดแดง

การจำลองทางคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมสร้างเป็นส่วนของการจำลองสนามแม่เหล็กในรูปร่างสี่เหลี่ยม รูปร่างวี และรูปร่างดัดเบิ้ลยูเพื่อศึกษาและเก็บผลการจำลองในตำแหน่งต่าง ๆ ตามโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่ทำมาจากนิกเกิลและสร้างการจำลองของการไหลในโครงสร้างรูปร่างสี่เหลี่ยม รูปร่างวีและรูปร่างดัดเบิ้ลยู เพื่อนำมาเปรียบเทียบหาตำแหน่งที่มีความเร็วของการไหลที่ต่ำ แต่มีแรงแมกนีโตเฟอร์ติกที่สูงจากการจำลองพบว่าบริเวณมุมตามโครงสร้างเสาขนาดเล็กจะมีแรงแมกนีโตเฟอร์ติกที่สูง แต่รูปร่างวีและรูปร่างดัดเบิ้ลยูซึ่งมีบริเวณส่วนที่เว้าด้านในของโครงสร้างมีแรงแมกนีโตเฟอร์ติกอยู่ด้านในทำให้เพิ่มพื้นที่ที่จะทำให้เซลล์หรืออนุภาคพาราแมกเนติกเคลื่อนที่เข้าไปและยังคงติดในโครงสร้างด้วยแรงแมกนีโตเฟอร์ติก รวมไปถึงในบริเวณนั้นยังมีแรงของการไหลที่ต่ำไปด้วย งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แม่เหล็กถาวรที่ทำมาจากนีโอไดเมียมขนาด 5x5x5 มิลลิเมตรวางเรียงตัวติดกัน 5 ก้อน จากนั้นเลือกใช้อัตราการไหลที่บริเวณทางเข้า 0.04 มิลลิเมตรต่อนาที่ เลือกใช้น้ำเป็นของไหลในการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามก็ตามการจำลองในโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์นั้นเป็นการช่วยให้มองภาพรวมและบอกถึงการศึกษาเบื้องต้นหรือแนวทางในขั้นตอนก่อนทดลองจริง โดยสรุปผลการจำลองการเปรียบเทียบแรงแมกนีโตเฟอร์ติกกับแรงต้านการไหล พบว่าเสาโครงสร้างรูปร่างวีและรูปร่างดัดเบิ้ลยูสามารถลดแรงแมกนีโตเฟอร์ติกทิศทางลบหรือแรงผลักได้ ขณะที่โครงสร้างรูปร่างสี่เหลี่ยมมีแรงผลักมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องนำผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองต่อไป

การทดลองกับอนุภาคพาราแมกเนติกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ไมโครเมตร เพื่อจะศึกษาและสังเกตทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปใกล้กับโครงสร้างเสาขนาดเล็กทั้งในกรณีที่ไม่ม่แม่เหล็กถาวรและกรณีที่มีแม่เหล็กถาวร โดยเก็บรูปภาพและบันทึกวิดีโอให้ชัดเจนที่สุด โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคพาราแมกเนติกในกรณี

ที่ไม่มีแม่เหล็กถาวร อนุภาคพาราแมกเนติกจะเคลื่อนที่ผ่านออกจากโครงสร้างเสาออกไปและมีบางส่วนเท่านั้นเคลื่อนที่ไปติดกับโครงสร้างเสาขนาดเล็ก เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของผิวโครงสร้างเสาขนาดเล็ก ทำให้มีอนุภาคพาราแมกเนติกบางส่วนเข้าไปติดไว้ สำหรับกรณีที่มีแม่เหล็กถาวรซึ่งจะทำให้เกิดแรงแมกนีโตเฟอริติกขึ้นภายในระบบทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่ทำมาจากเฟอร์โรแมกเนติกทำให้อนุภาคพาราแมกเนติกเคลื่อนที่เข้ามาติดกับโครงสร้างเสาขนาดเล็ก ซึ่งจะสอดคล้องกับการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ บริเวณส่วนมุมตามโครงสร้างเสาขนาดเล็กในรูปร่างต่าง ๆ มีแรงแมกนีโตเฟอริติกที่สูงทำให้อนุภาคพาราแมกเนติกเคลื่อนที่เข้าไปติดในบริเวณมุมตามโครงสร้างต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน

การทดลองกับอนุภาคพาราแมกเนติกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ไมโครเมตร นำมาใช้ทดลองเพราะมีขนาดที่ใกล้เคียงกับเซลล์เม็ดเลือดแดงเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในเบื้องต้นด้วยอัตราการไหลเริ่มต้นที่ 0.04 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นเพิ่มอัตราการไหลไปที่ 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวรนั้นไม่เกิดแรงแมกนีโตเฟอริติก อนุภาคพาราแมกเนติกนั้นจะไม่เข้ามาติดกับโครงสร้างเสาขนาดเล็ก และกรณีที่มีแม่เหล็กถาวรเกิดแรงแมกนีโตเฟอริติกทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกับโครงสร้างเสาขนาดเล็กที่ทำมาจากเฟอร์โรแมกเนติกเหนี่ยวนำอนุภาคพาราแมกเนติกให้เข้ามาติดกับโครงสร้างได้การติดของอนุภาคพาราแมกเนติกในอัตราการไหลที่ต่ำสามารถดักจับ แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลขึ้นทำให้บริเวณด้านมุมตามโครงสร้างต่าง ๆ อนุภาคหลุดออกไป แต่ในบริเวณส่วนเว้าของรูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยู ส่วนรูปร่างสี่เหลี่ยมในอนุภาคพาราแมกเนติกหลุดออกไปเป็นจำนวนมากว่า อย่างไรก็ตามการทดลองนี้เมื่อหยุดใช้ปั๊มดีจิตอลทำให้อนุภาคพาราแมกเนติกค้างอยู่ในระบบของไหลจุลภาคเป็นจำนวนมาก

การทดลองกับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียงานวิจัยนี้ทำการทดลองกับเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียที่มีระยะการติดเชื้อที่ 2 , 5 และ 7 วัน มีเปอร์เซ็นต์การติดเชื้ออยู่ที่ 1.5, 8.5 และ 86 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียในคนซึ่งเป็นการเพาะเลี้ยงเซลล์ให้ติดเชื่อมมาลาเรียให้มีการติดเชื้อที่สูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ใช้อัตราการไหลเริ่มต้นที่ 0.04 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นเพิ่มอัตราการไหลไปที่ 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที

การทดลองกับเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียทั้งที่ติดเชื้อในหนูทดลองและติดเชื้อในคน พบว่ารูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยูมีแนวโน้มในการดักจับให้ทั้งอนุภาคพาราแมกเนติกและเซลล์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียมาติดกับโครงสร้างได้ดีกว่ารูปร่างสี่เหลี่ยม ซึ่งสามารถบอกได้ว่าการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ที่พบว่ารูปสี่เหลี่ยมจะมีแรงแมกนีโตเฟอริติกทิศทางลบสูงกว่ารูปร่างอื่น สอดคล้องกับผลการทดลอง ทำให้ประสิทธิภาพการดักจับโครงสร้างรูปร่างสี่เหลี่ยมทำได้ไม่ด้อยดีเมื่อเทียบกับรูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยูที่มีแรงแมกนีโตเฟอริติกทิศทางลบน้อยกว่า และระยะเวลาติดเชื่อมาลาเรียมีความสำคัญมาก ในการคัดแยกของการทดลอง ยังมีระยะเวลาติดเชื่อมาลาเรียที่สูง จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการคัดแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมาลาเรียออกจากเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื่อมาลาเรีย อย่างไรก็ตามการทดลองนี้ยังมีปัญหาของเซลล์ค้างอยู่ในอุปกรณ์เป็นจำนวนมาก ซึ่งค้างตามบริเวณช่องทางเข้าของอุปกรณ์และในท่อสายยางของอุปกรณ์ และการทดลองกับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมาลาเรียในคนมีระยะเวลาติดเชื่อมาลาเรียค่อนข้างสูง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในเบื้องต้นใช้อัตราการไหลเริ่มต้นที่ 0.04 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นเพิ่มอัตราการไหลไปที่ 0.4 และ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที การทดลองทำให้เห็นว่ากรณีที่ไม่มีแม่เหล็กถาวรเซลล์จะเคลื่อนที่ออกมาที่ช่องทางออกเป็นจำนวนมากและส่วนกรณีที่มีแม่เหล็กถาวร ส่งผลให้โครงสร้างรูปร่างวีและรูปร่างดับเบิลยูดักจับเซลล์ที่ติดเชื่อมาลาเรียในคนได้มากกว่าโครงสร้างรูปร่างสี่เหลี่ยม แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีปัญหาการค้างในระบบเป็นจำนวนมากเช่นกัน

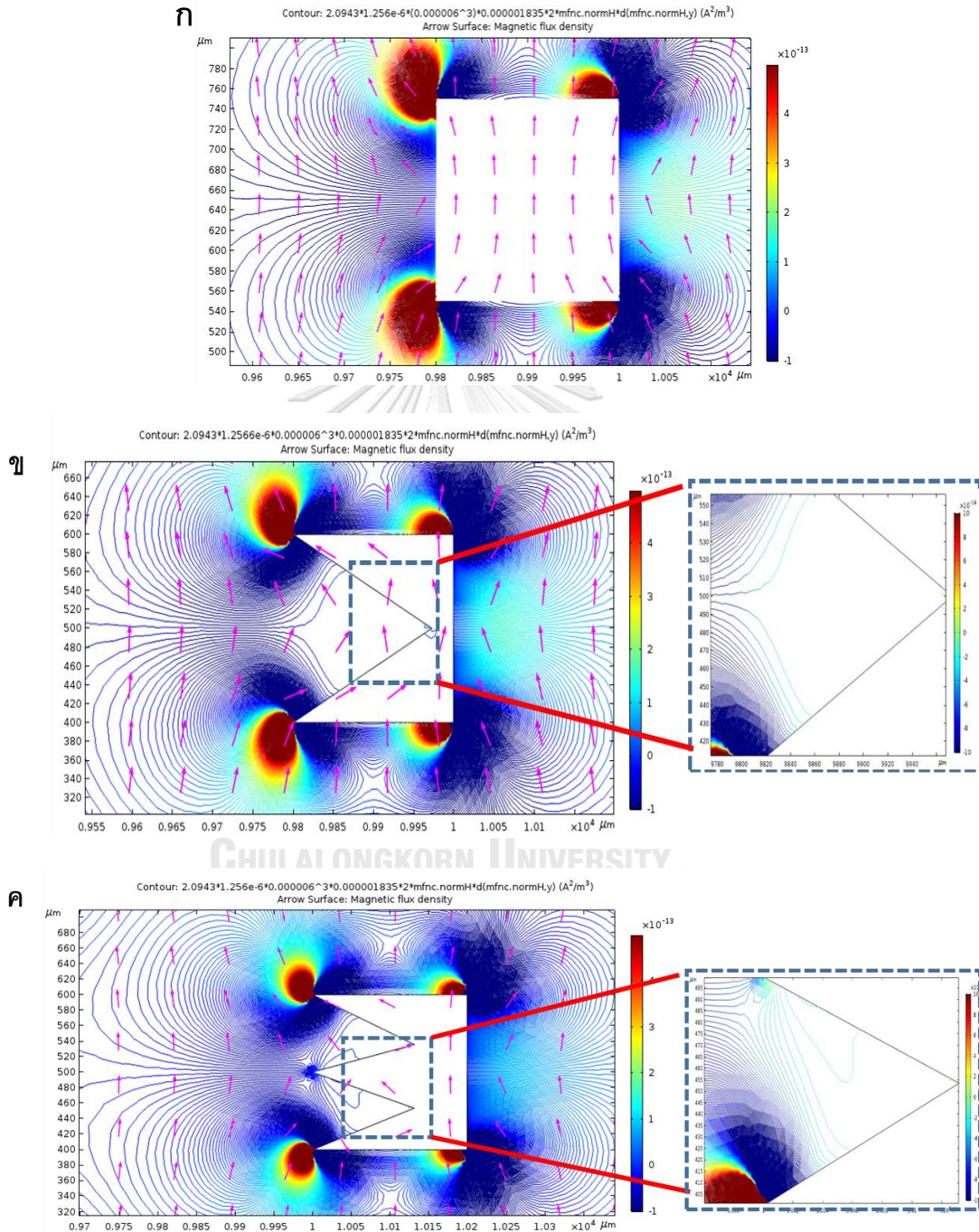
ภาคผนวก



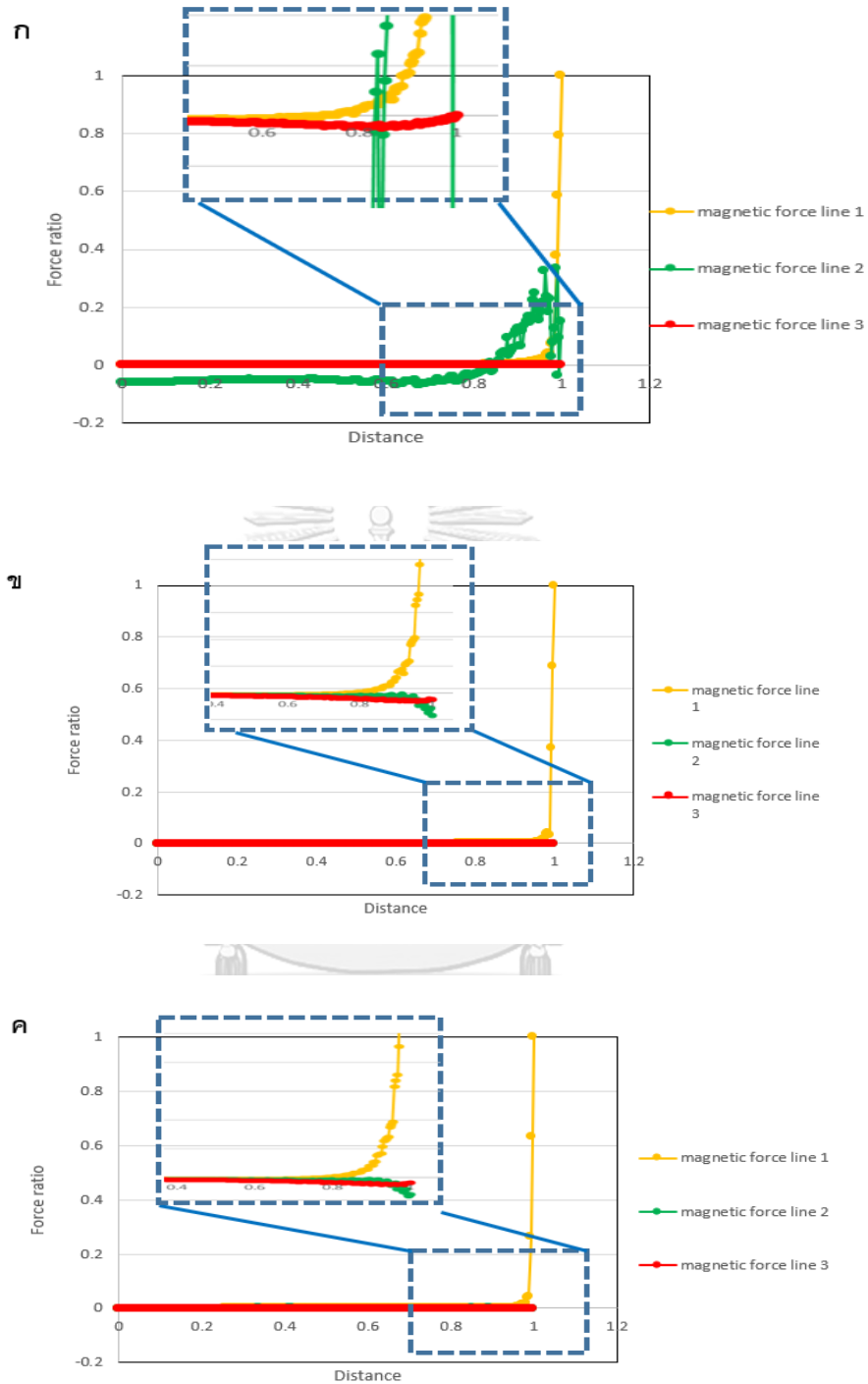
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ผลการเปรียบเทียบแรงแม่เหล็กเมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับการไหล



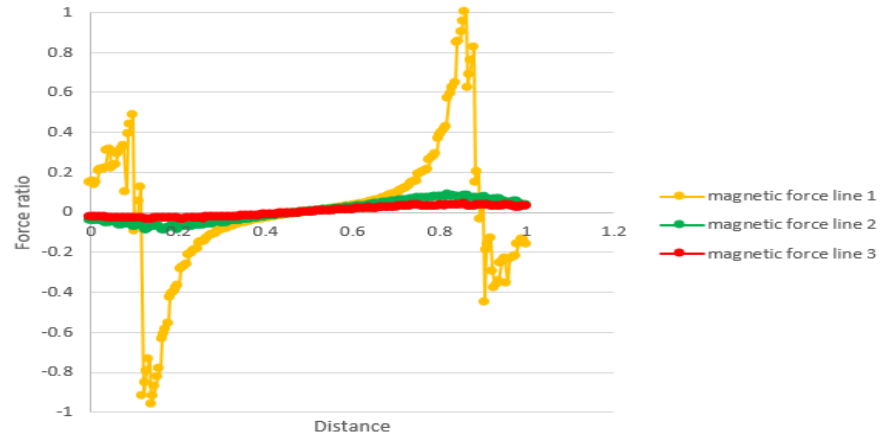
รูปที่ ก1 การจำลองสนามแม่เหล็กรูปร่างโครงสร้างเสาขนาดเล็ที่มีทิศทางของสนามแม่เหล็กแนวตั้ง
(ก) รูปสี่เหลี่ยม (ข) รูปวี และ (ค) รูปดัดเบิ้ลยู



รูปที่ ก2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงแมกนีโตเฟอริติกในทิศทางตามแนวตั้งของโครงสร้าง(เก็บข้อมูลตามแนวนอน) (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวี และ (ค) รูปร่างดัดเบิ้ลยู

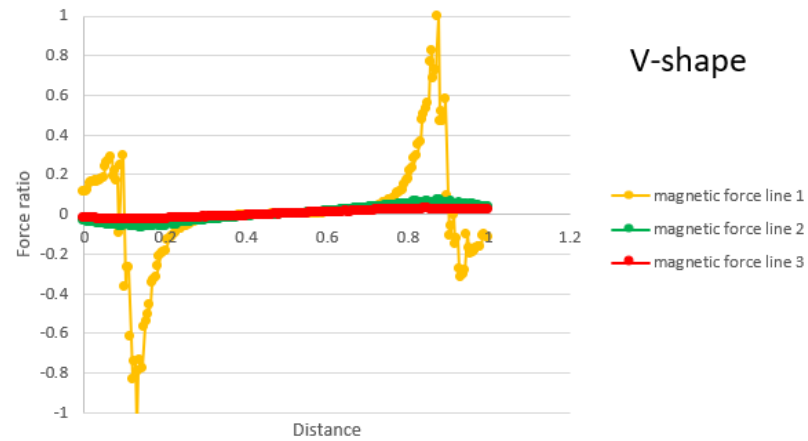
ก

Square shape



ข

V-shape



ค

W -shape

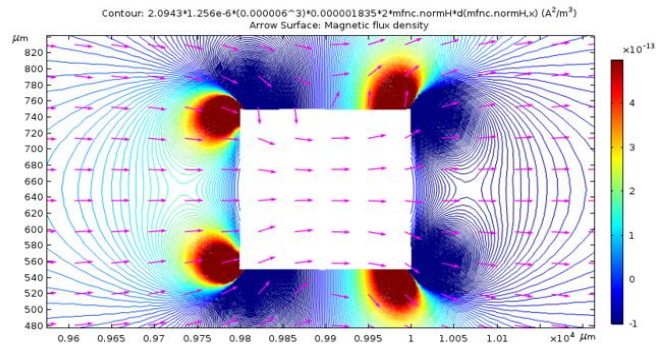


รูปที่ 3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงแมกนีโตเฟอริติกในทิศทางตามแนวตั้งของโครงสร้าง(เก็บข้อมูลตามแนวตั้ง) (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวี และ (ค) รูปร่างดับเบิลยู

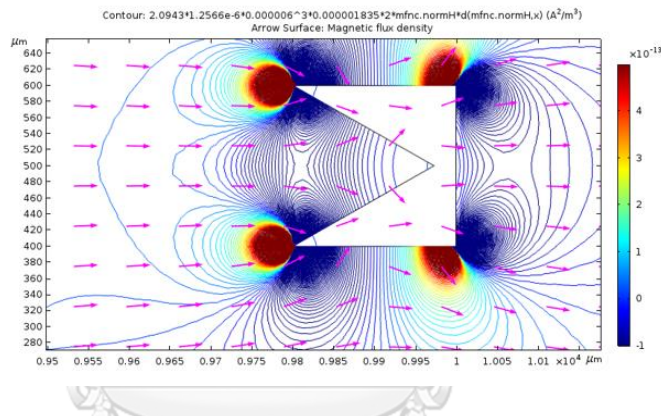
ภาคผนวก ข

ผลการเปรียบเทียบแรงแม่เหล็กเมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางตามการไหล

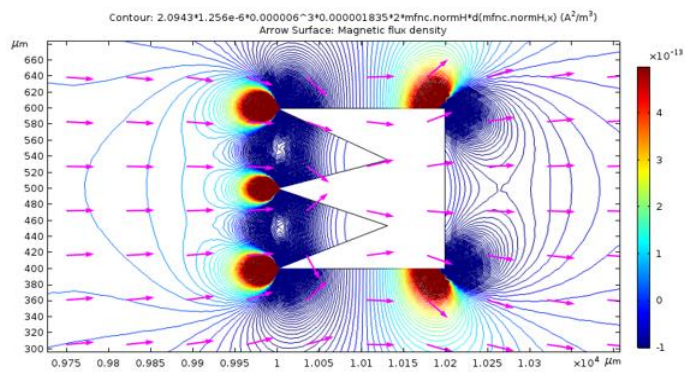
ก



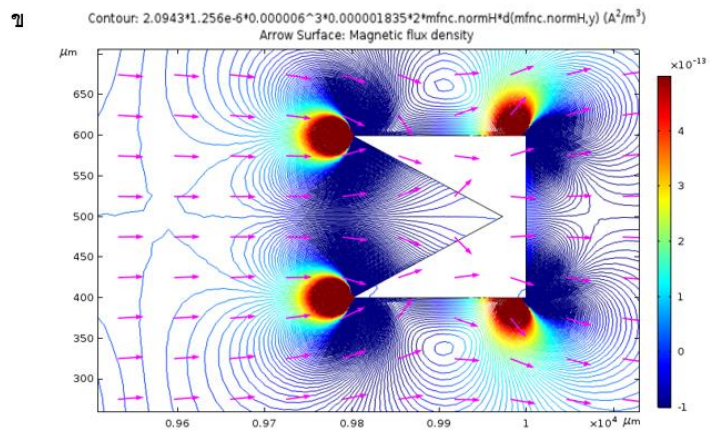
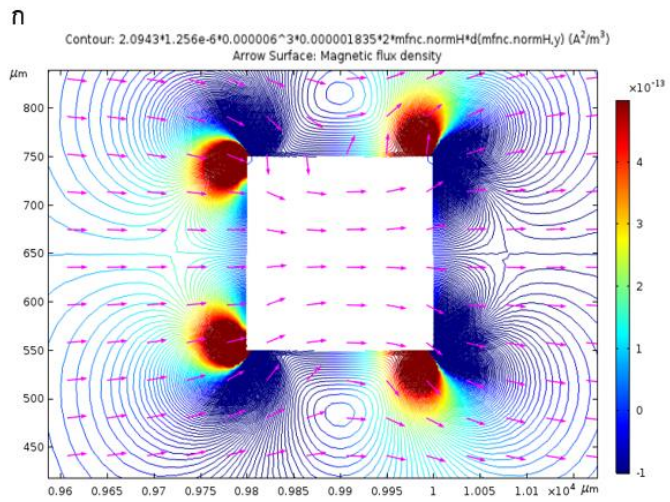
ข



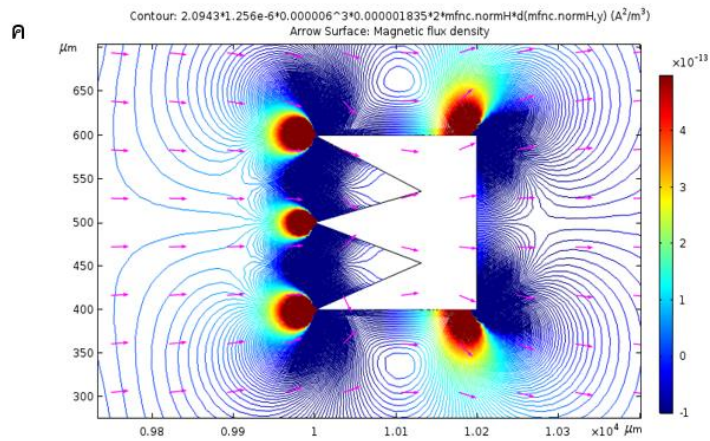
ค



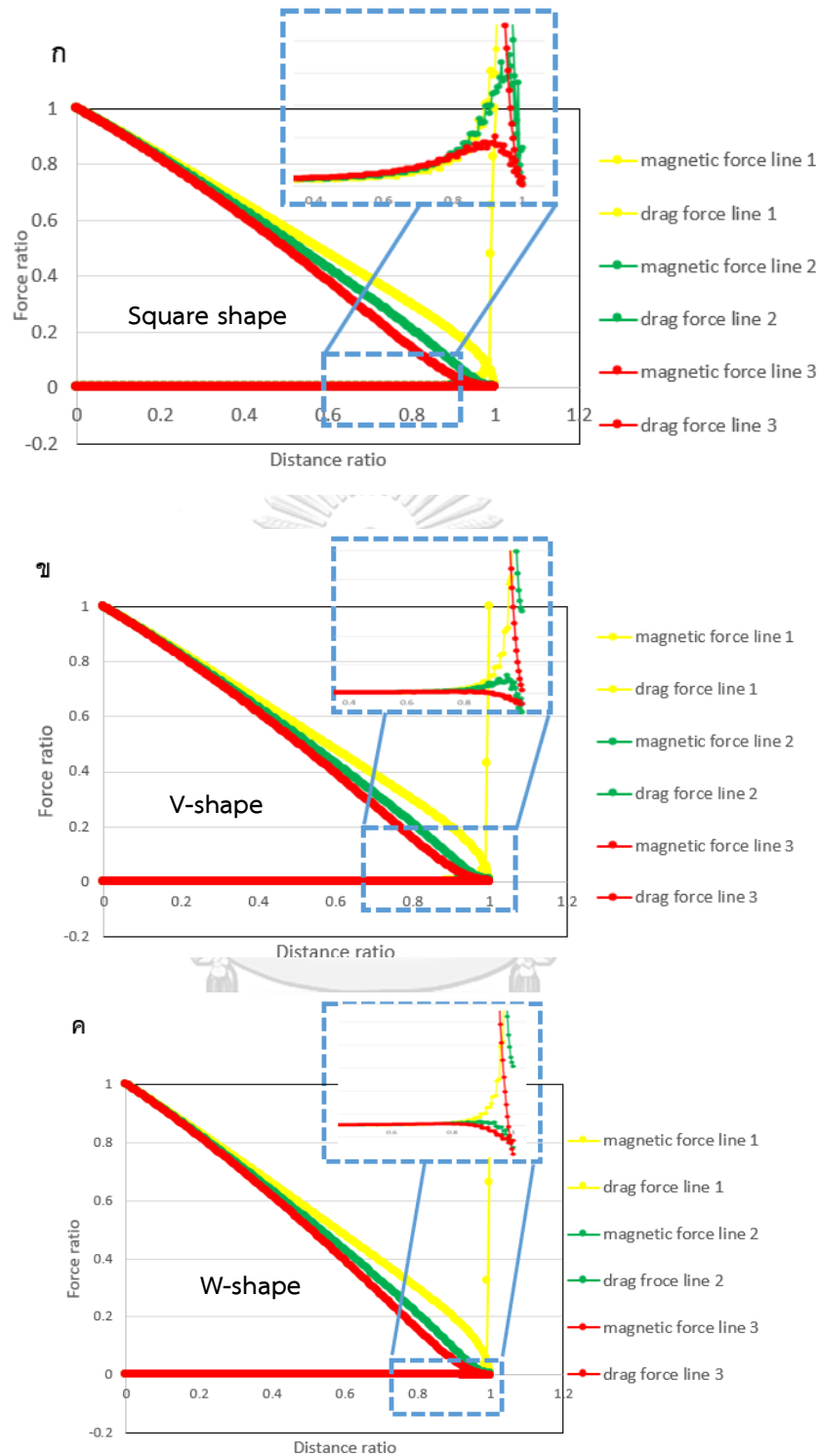
รูปที่ ข1 การจำลองสนามแม่เหล็กรูปร่างโครงสร้างเสาขนาดเล็กรวมทิศทางของสนามแม่เหล็กแรง
 แนวนอน (ก) รูปสี่เหลี่ยม (ข) รูปวี และ (ค) รูปดัดเบิ้ลยู



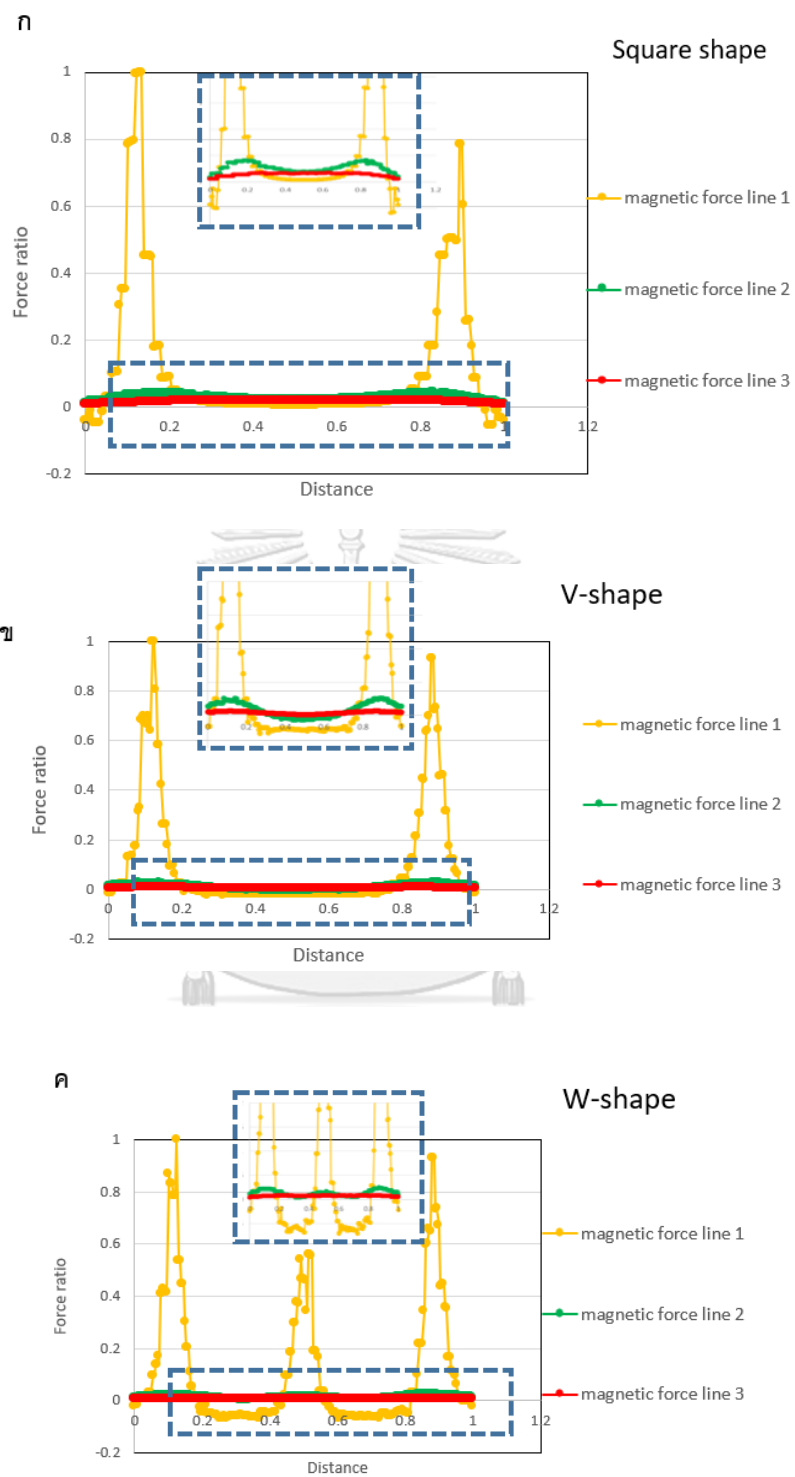
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



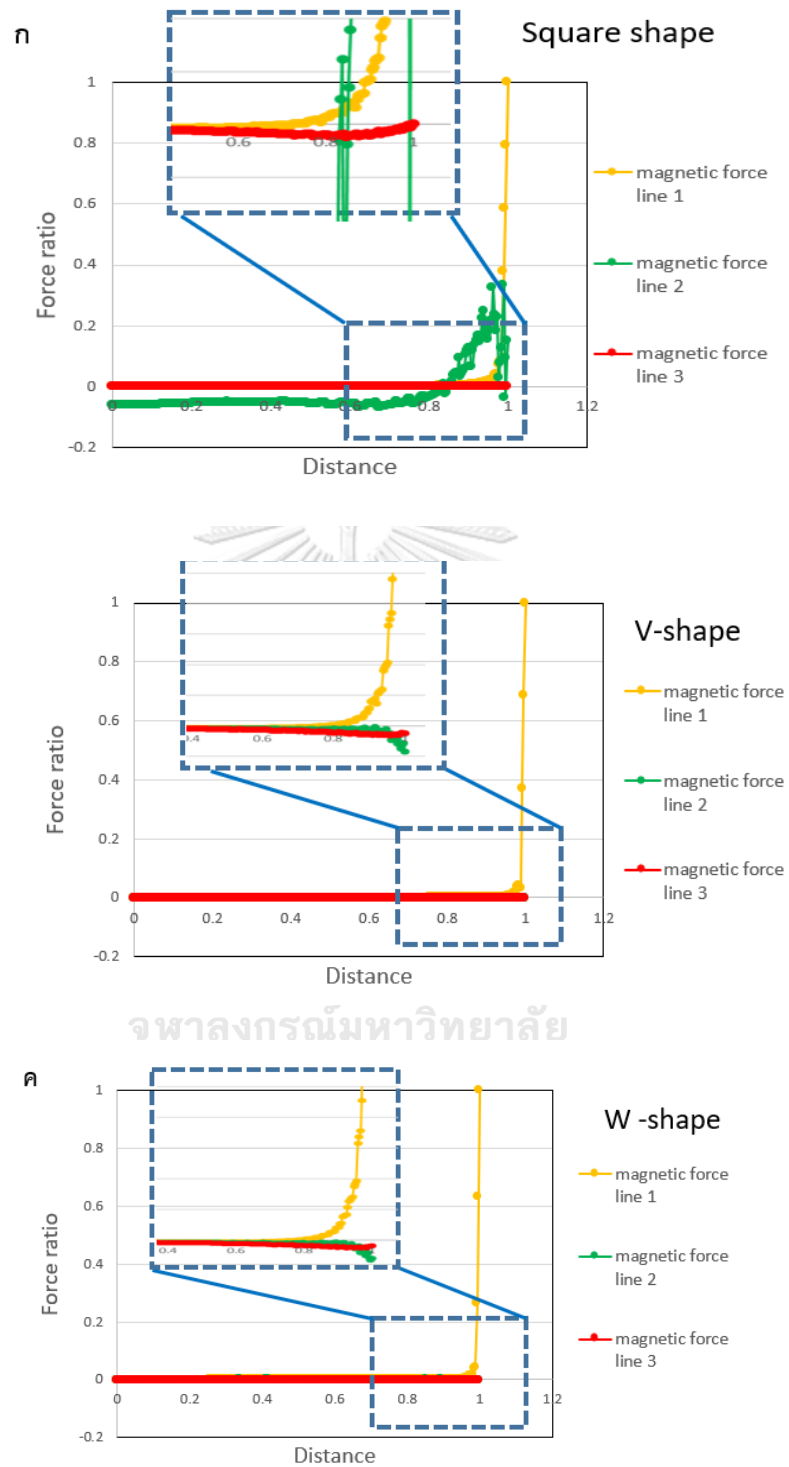
รูปที่ ข2 การจำลองสนามแม่เหล็กรูปร่างโครงสร้างเสาขนาดเล็กมีทิศทางของสนามแม่เหล็กแรง
 แนวตั้ง (ก) รูปสี่เหลี่ยม (ข) รูปรี และ (ค) รูปดัดเบิ้ลยู



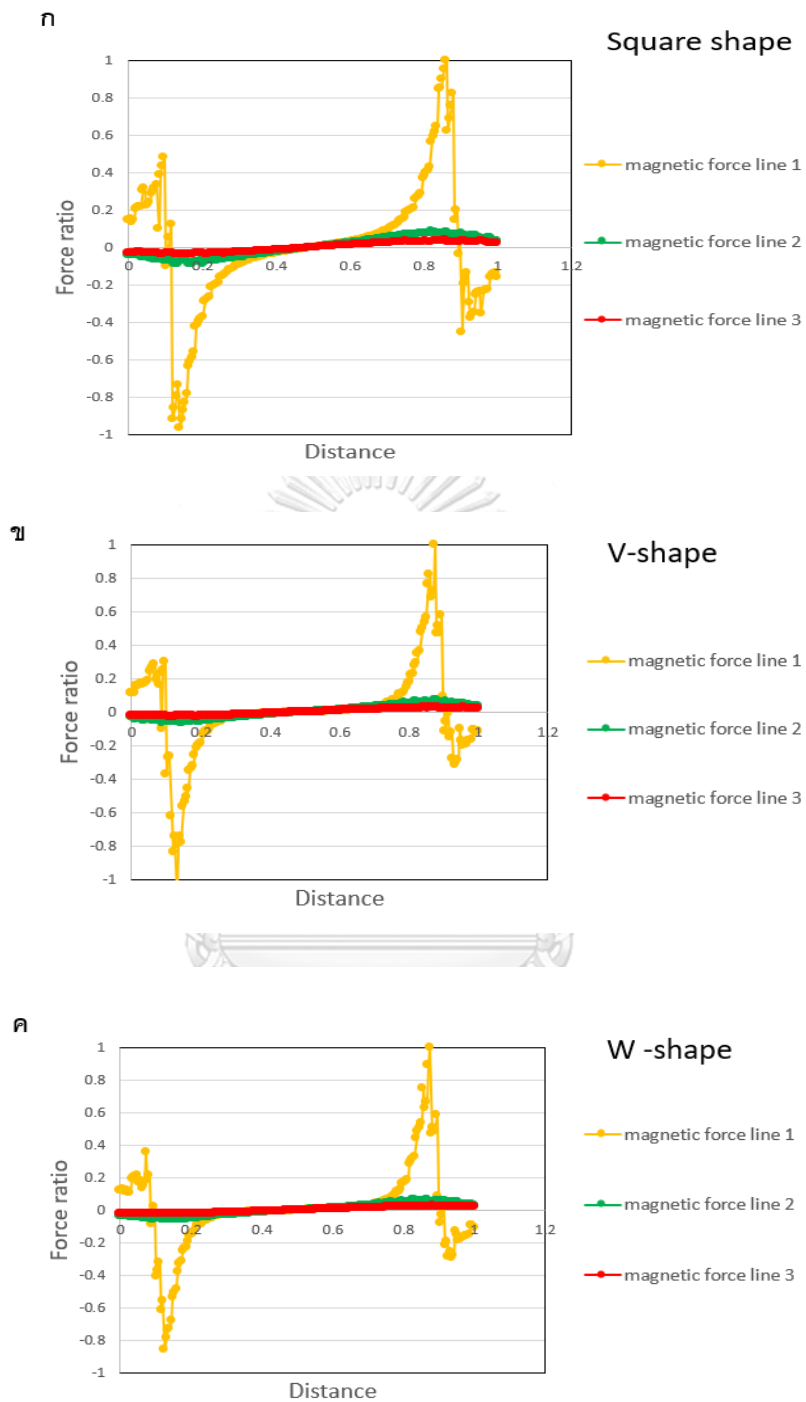
รูปที่ ๓3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงแมกนีโตเฟอริติกและแรงต้านการไหลในทิศทางตามแนวนอนของโครงสร้าง(เก็บข้อมูลตามแนวนอน) (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวี และ (ค) รูปร่างดับเบิ้ลยู



รูปที่ ข4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงแมกนีโตเฟอริติกในทิศทางตามแนวนอนของโครงสร้าง(เก็บข้อมูลตามแนวตั้ง) (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวี และ (ค) รูปร่างดับเบิลยู



รูปที่ ข5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงแม่เหล็กไนโตเฟอร์ริกในทิศทางตามแนวตั้งของโครงสร้าง(เก็บข้อมูลตามแนวนอน) (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวี และ (ค) รูปร่างดับเบิลยู



รูปที่ ข6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงแมกนีโตเฟอริติกในทิศทางตามแนวตั้งของโครงสร้าง(เก็บข้อมูลตามแนวตั้ง) (ก) รูปร่างสี่เหลี่ยม (ข) รูปร่างวี และ (ค) รูปร่างดับเบิลยู

ภาคผนวก ค

ผลการนับอนุภาคที่ทางออกของระบบของไหลจุลภาค

ก

ครั้งที่ 1 นับครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2 นับครั้งที่ 1				ครั้งที่ 3 นับครั้งที่ 1							
square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape				
54	44	49	38	41	40	40	36	49	33	35	33				
56	47	37	40	34	43	32	34	45	40	40	33				
68	53	38	36	35	39	35	42	47	39	44	35				
50	50	42	34	37	39	44	39	42	38	33	34				
228	194	166	148	147	161	151	151	183	150	152	135				
570000	485000	415000	370000	367500	402500	377500	377500	457500	375000	380000	337500				
32.62%	27.75%	23.75%	21.17%	21.03%	23.03%	21.60%	21.60%	26.18%	21.46%	21.75%	19.31%				
ครั้งที่ 1 นับครั้งที่ 2				ครั้งที่ 2 นับครั้งที่ 2				ครั้งที่ 3 นับครั้งที่ 2							
square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape				
62	39	36	30	40	46	42	33	44	35	35	36				
55	37	45	39	38	39	34	34	45	34	38	33				
49	48	42	32	35	38	34	38	43	33	39	35				
52	40	48	30	39	42	40	37	44	36	38	37				
218	164	171	131	152	165	150	142	176	138	150	141				
545000	410000	427500	327500	380000	412500	375000	355000	440000	345000	375000	352500				
31.19%	23.46%	0.00%	24.46%	18.74%	0.00%	21.75%	23.61%	0.00%	21.46%	20.31%	25.18%	19.74%	0.00%	21.46%	20.17%
ครั้งที่ 1 นับครั้งที่ 3				ครั้งที่ 2 นับครั้งที่ 3				ครั้งที่ 3 นับครั้งที่ 3							
square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape				
51	40	45	38	62	49	39	35	40	39	36	34				
60	54	47	37	50	45	47	40	41	34	34	33				
55	49	39	40	48	44	48	41	43	35	39	35				
49	44	42	38	44	45	42	35	43	37	41	38				
215	187	173	153	204	183	176	151	167	145	150	140				
537500	467500	432500	382500	510000	457500	440000	377500	417500	362500	375000	350000				
30.76%	26.75%	0.00%	24.75%	21.89%	29.18%	26.18%	0.00%	25.18%	21.60%	23.89%	20.74%	0.00%	21.46%	20.03%	
ครั้งที่ 1 นับครั้งที่ 4				ครั้งที่ 2 นับครั้งที่ 4				ครั้งที่ 3 นับครั้งที่ 4							
square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape				
57	55	40	42	51	40	45	44	45	35	35	39				
60	57	41	40	57	41	45	39	43	39	40	35				
70	62	37	35	48	45	40	35	44	39	41	34				
64	64	39	39	46	45	46	30	49	37	40	32				
251	238	157	156	202	171	176	148	181	150	156	140				
627500	595000	392500	390000	505000	427500	440000	370000	452500	375000	390000	350000				
35.91%	34.05%	0.00%	22.46%	22.32%	0.00%	28.90%	24.46%	0.00%	25.18%	21.17%	25.89%	21.46%	0.00%	22.32%	20.03%
ครั้งที่ 1 นับครั้งที่ 5				ครั้งที่ 2 นับครั้งที่ 5				ครั้งที่ 3 นับครั้งที่ 5							
square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape				
58	37	42	44	50	47	38	42	40	40	44	39				
63	44	44	43	49	49	39	34	46	44	45	38				
61	36	35	38	55	45	35	35	44	42	49	37				
53	40	38	40	57	42	31	41	49	38	42	43				
235	157	159	165	211	183	143	152	179	164	180	157				
587500	392500	397500	412500	527500	457500	357500	380000	447500	410000	450000	392500				
33.62%	22.46%	22.75%	23.61%	30.19%	26.18%	20.46%	21.75%	25.61%	23.46%	25.75%	22.46%				

ข

กรมชลประทานที่ 1			กรมชลประทานที่ 2			กรมชลประทานที่ 3			กรมชลประทานที่ 4			กรมชลประทานที่ 5			กรมชลประทานที่ 6			
คลัง 1.บึงศรีโพธิ์			คลัง 2.บึงศรีโพธิ์			คลัง 3.บึงศรีโพธิ์			คลัง 4.บึงศรีโพธิ์			คลัง 5.บึงศรีโพธิ์			คลัง 6.บึงศรีโพธิ์			
square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	
30	15	21	13	21	25	28	30	27	13	30	17	20	27	25	27	34	15	20
25	14	19	12	31	30	37	17	40	27	37	13	20	27	35	21	30	20	25
32	10	18	13	30	19	22	13	39	34	39	19	30	31	25	18	39	19	29
28	11	21	14	37	20	27	27	20	21	28	20	29	25	29	22	33	19	24
115	50	80	52	142	77	116	111	110	82	132	69	106	110	95	88	136	73	110
28790	125000	200000	130000	855000	195000	290000	277500	275000	205000	315000	237500	265000	275000	322500	192500	237500	230000	275000
16.4%	7.1%	0.0%	11.4%	20.3%	11.0%	0.0%	16.6%	15.7%	11.7%	0.0%	18.0%	13.9%	18.8%	9.8%	0.0%	15.1%	15.7%	19.4%
คลัง 1.บึงศรีโพธิ์ 2			คลัง 2.บึงศรีโพธิ์ 2			คลัง 3.บึงศรีโพธิ์ 2			คลัง 4.บึงศรีโพธิ์ 2			คลัง 5.บึงศรีโพธิ์ 2			คลัง 6.บึงศรีโพธิ์ 2			
square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	
28	16	18	15	38	21	35	25	28	30	25	14	25	28	22	20	31	25	
35	10	18	13	41	25	29	15	21	30	37	14	25	30	37	13	30	21	
37	19	20	17	40	30	30	16	32	37	21	15	25	35	27	18	33	21	
33	22	20	13	25	29	33	32	29	25	24	19	30	27	29	34	20	22	
110	67	57	57	154	105	127	121	102	168	115	120	111	107	115	108	128	82	105
27500	167500	217500	142500	385000	265000	575000	305000	255000	170000	285000	195000	275000	267500	285000	275000	300000	205000	265000
15.4%	9.5%	0.0%	12.4%	22.0%	15.0%	0.0%	18.1%	14.5%	9.7%	0.0%	16.1%	17.1%	16.7%	11.1%	0.0%	15.8%	15.3%	18.3%
คลัง 1.บึงศรีโพธิ์ 3			คลัง 2.บึงศรีโพธิ์ 3			คลัง 3.บึงศรีโพธิ์ 3			คลัง 4.บึงศรีโพธิ์ 3			คลัง 5.บึงศรีโพธิ์ 3			คลัง 6.บึงศรีโพธิ์ 3			
square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	
21	10	20	13	39	25	44	24	28	17	24	13	32	29	29	28	31	23	
37	18	19	20	44	28	45	35	25	18	21	27	30	20	30	22	31	21	
41	13	22	17	47	32	34	34	18	30	19	24	25	19	28	25	29	19	
33	15	29	11	38	30	39	32	24	26	22	21	22	19	25	20	28	15	
132	56	90	61	168	115	158	125	95	81	128	70	115	98	106	94	121	77	109
83000	140000	255000	155000	400000	287500	595000	315000	275000	202500	215000	125000	287500	245000	265000	255000	305000	192500	275000
18.8%	8.0%	0.0%	12.8%	24.0%	16.4%	0.0%	17.8%	13.5%	11.9%	0.0%	12.3%	12.1%	13.5%	11.6%	0.0%	12.0%	11.0%	17.3%
คลัง 1.บึงศรีโพธิ์ 4			คลัง 2.บึงศรีโพธิ์ 4			คลัง 3.บึงศรีโพธิ์ 4			คลัง 4.บึงศรีโพธิ์ 4			คลัง 5.บึงศรีโพธิ์ 4			คลัง 6.บึงศรีโพธิ์ 4			
square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	
32	19	29	20	55	20	37	22	27	17	27	15	30	23	29	18	25	19	
27	21	31	18	44	18	57	29	37	19	38	18	34	19	30	19	25	20	
25	19	34	15	52	31	55	25	19	15	25	21	33	18	27	18	24	25	
28	22	25	10	28	26	30	27	25	21	22	23	29	20	26	21	24	18	
112	81	119	63	135	95	139	103	108	71	112	77	126	80	113	88	144	84	114
28000	202500	297500	157500	387500	275000	547500	257500	270000	180000	280000	192500	315000	210000	285000	207500	240000	222500	285000
16.0%	11.5%	0.0%	9.0%	19.3%	13.9%	0.0%	19.8%	15.4%	10.3%	0.0%	16.0%	11.8%	18.0%	11.4%	0.0%	13.7%	12.7%	16.3%
คลัง 1.บึงศรีโพธิ์ 5			คลัง 2.บึงศรีโพธิ์ 5			คลัง 3.บึงศรีโพธิ์ 5			คลัง 4.บึงศรีโพธิ์ 5			คลัง 5.บึงศรีโพธิ์ 5			คลัง 6.บึงศรีโพธิ์ 5			
square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	square	v-shape	w-shape	
32	14	25	13	34	27	40	24	25	18	25	20	32	18	27	20	31	19	
35	19	28	18	37	30	37	22	24	19	29	19	36	23	30	20	25	18	
34	18	20	19	29	29	35	19	27	22	31	14	31	17	25	27	28	19	
29	13	24	11	25	30	38	27	30	24	22	18	30	19	22	22	20	18	
130	64	97	81	115	116	150	97	106	80	107	71	131	80	117	98	144	81	111
91500	160000	243500	203500	387500	290000	575000	330000	265000	177500	275000	175000	327500	200000	280000	200000	250000	202500	275000
18.8%	9.1%	0.0%	13.8%	15.4%	16.6%	0.0%	13.1%	15.1%	11.8%	0.0%	15.3%	10.6%	18.7%	11.4%	0.0%	14.3%	11.9%	15.8%

รูปที่ ค1 ผลการนับอนุภาคพาราแมกเนติกที่ทางออกของอุโมงค์อุโมงค์น้ำที่ 0.4 มิลลิเมตรต่อ นาที (ก) ไม่มีเหล็กถาวร (ข) มีแม่เหล็กถาวร

ก

ครั้งที่ 1 นับครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2 นับครั้งที่ 1				ครั้งที่ 3 นับครั้งที่ 1			
square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape
75	50	70	49	79	59	81	69	75	64	78	70
57	65	68	50	80	61	84	77	77	66	79	77
74	63	73	58	83	74	90	70	81	68	85	72
81	52	83	67	91	65	85	75	80	69	88	69
287	230	294	224	333	259	340	291	313	267	330	288
717500	575000	735000	560000	832500	647500	850000	727500	782500	667500	825000	720000
38.01%	30.46%	38.94%	29.67%	44.11%	34.30%	45.03%	38.54%	41.46%	35.36%	43.71%	38.15%

ครั้งที่ 1 นับครั้งที่ 2				ครั้งที่ 2 นับครั้งที่ 2				ครั้งที่ 3 นับครั้งที่ 2			
square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape
70	57	75	65	78	58	75	77	75	60	70	78
75	55	71	69	83	60	78	75	74	65	74	74
79	67	80	57	85	69	88	84	82	67	72	70
82	60	84	54	94	75	94	80	85	62	77	66
306	239	310	245	340	262	335	316	316	254	293	288
765000	597500	775000	612500	850000	655000	837500	790000	790000	635000	732500	720000
40.53%	31.66%	41.06%	32.45%	45.03%	34.70%	44.37%	41.85%	41.85%	33.64%	38.81%	38.15%

ครั้งที่ 1 นับครั้งที่ 3				ครั้งที่ 2 นับครั้งที่ 3				ครั้งที่ 3 นับครั้งที่ 3			
square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape
78	62	74	59	74	64	77	85	82	71	75	70
85	69	77	65	81	62	81	74	80	70	77	66
83	58	82	69	80	73	80	79	79	66	74	65
79	60	75	64	89	60	75	83	79	69	73	69
325	249	308	257	324	259	313	321	320	276	299	270
812500	622500	770000	642500	810000	647500	782500	802500	800000	690000	747500	675000
43.05%	32.98%	40.79%	34.04%	42.91%	34.30%	41.46%	42.52%	42.38%	36.56%	39.60%	35.76%

ครั้งที่ 1 นับครั้งที่ 4				ครั้งที่ 2 นับครั้งที่ 4				ครั้งที่ 3 นับครั้งที่ 4			
square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape
77	70	78	48	78	85	75	77	80	69	72	69
74	65	85	50	83	60	78	75	81	65	73	68
80	57	84	58	85	69	88	84	77	72	75	72
89	55	81	59	94	75	95	80	76	71	72	70
320	247	328	215	340	289	336	316	314	277	292	279
800000	617500	820000	537500	850000	722500	840000	790000	785000	692500	730000	697500
42.38%	32.72%	43.44%	28.48%	45.03%	38.28%	44.50%	41.85%	41.59%	36.69%	38.68%	36.95%

ครั้งที่ 1 นับครั้งที่ 5				ครั้งที่ 2 นับครั้งที่ 5				ครั้งที่ 3 นับครั้งที่ 5			
square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape
74	60	77	59	77	76	84	78	77	72	72	69
75	59	74	48	78	81	90	65	75	75	76	68
89	61	79	54	85	80	85	70	74	70	75	62
91	54	85	50	88	74	83	74	77	73	71	65
329	234	315	211	328	311	342	287	303	290	294	264
822500	585000	787500	527500	820000	777500	855000	717500	757500	725000	735000	660000
43.58%	30.99%	41.72%	27.95%	43.44%	41.19%	45.30%	38.01%	40.13%	38.41%	38.94%	34.97%

ก

no magnet 0.4ml/min (n=1)			
square	v-shape	square	w-shape
234	250	225	231
247	230	237	240
280	247	250	210
260	227	243	215
1021	954	955	896
2552500	2385000	2387500	2240000
93%	87%	87%	82%
240	228	244	224
245	234	254	232
238	220	253	210
264	231	221	204
987	913	972	870
2467500	2282500	2430000	2175000
90%	83%	89%	79%
243	240	260	234
244	210	210	214
209	204	232	228
201	202	241	230
897	856	943	906
2242500	2140000	2357500	2265000
82%	78%	86%	83%

no magnet 0.4ml/min (n=2)			
square	v-shape	square	w-shape
241	231	179	214
250	210	194	225
232	180	210	210
219	174	215	185
942	795	798	834
2355000	1987500	1995000	2085000
86%	73%	73%	76%
230	220	180	196
220	180	210	192
209	184	194	201
185	194	221	204
844	778	805	793
2110000	1945000	2012500	1982500
77%	71%	73%	72%
210	184	210	189
223	193	214	193
214	205	195	204
200	190	196	223
847	772	815	809
2117500	1930000	2037500	2022500
77%	70%	74%	74%

ข

magnet 0.4ml/min (n=1)			
square	v-shape	square	w-shape
196	191	210	184
185	199	194	167
220	201	200	174
221	180	201	184
822	771	805	709
2055000	1927500	2012500	1772500
75%	70%	73%	65%
165	200	210	194
201	203	200	190
179	184	184	184
200	180	190	192
745	767	784	760
1862500	1917500	1960000	1900000
68%	70%	72%	69%
164	145	204	200
175	184	210	180
184	168	180	163
192	135	219	179
715	632	813	722
1787500	1580000	2032500	1805000
65%	58%	74%	66%

magnet 0.4ml/min (n=2)			
square	v-shape	square	w-shape
197	195	200	194
201	184	193	199
204	163	190	205
184	170	209	221
786	712	792	819
1965000	1780000	1980000	2047500
72%	65%	72%	75%
210	204	223	199
215	210	200	213
184	173	209	216
192	190	210	180
801	777	842	808
2002500	1942500	2105000	2020000
73%	71%	77%	74%
232	174	210	189
184	199	223	197
190	220	232	188
210	219	201	174
816	812	866	748
2040000	2030000	2165000	1870000
74%	74%	79%	68%

รูปที่ ค3 ผลการนับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียที่ทางออกของอุปกรณ์ระยะการติดเชื้อที่ 2 วัน อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาที (ก) ไม่มีเหล็กถาวร (ข) มีแม่เหล็กถาวร

no magnet 0.8ml/min (n=1)					no magnet 0.8ml/min (n=2)				
square	v-shape		square	w-shape	square	v-shape		square	w-shape
84	79		105	90	94	84		94	120
95	84		110	102	109	86		85	100
104	72		107	101	112	95		108	80
101	93		85	92	80	104		119	92
384	328	0	407	385	395	369		406	392
960000	820000	0	1017500	962500	987500	922500		1015000	980000
82%	70%	0%	87%	82%	84%	79%		87%	84%
90	73		100	90	94	94		99	118
94	84		101	93	90	90		104	102
101	77		90	92	105	104		110	89
103	81		83	83	106	108		112	94
388	315		374	358	395	396		425	403
970000	787500		935000	895000	987500	990000		1062500	1007500
83%	67%		80%	76%	84%	85%		91%	86%
83	83		104	94	77	89		104	84
81	86		100	95	80	77		100	95
95	74		94	97	84	80		90	76
94	100		90	81	76	83		71	80
353	343		388	367	317	329		365	335
882500	857500		970000	917500	792500	822500		912500	837500
75%	73%		83%	78%	68%	70%		78%	72%

magnet 0.8ml/min (n=1)					magnet 0.8ml/min (n=2)				
square	v-shape		square	w-shape	square	v-shape		square	w-shape
81	78		94	84	78	84		75	69
95	90		95	80	82	90		88	74
89	70		89	85	85	94		70	65
96	73		103	94	74	72		69	81
361	311		381	343	319	340		302	289
902500	777500		952500	857500	797500	850000		755000	722500
77%	66%		81%	73%	68%	73%		64%	62%
85	80		105	98	84	77		90	71
95	79		109	94	93	84		84	66
90	78		116	90	74	90		73	79
105	85		120	92	77	70		77	84
375	322		450	374	328	321		324	300
937500	805000		1125000	935000	820000	802500		810000	750000
80%	69%		96%	80%	70%	69%		69%	64%
101	90		84	84	78	89		74	74
100	70		80	80	81	79		70	77
90	87		94	99	80	94		81	79
84	95		92	91	60	85		80	85
375	342		350	354	299	347		305	315
937500	855000		875000	885000	747500	867500		762500	787500
80%	73%		75%	76%	64%	74%		65%	67%

รูปที่ ค4 ผลการนับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียที่ทางออกของอุปกรณ์ระยะการติดเชื้อที่ 2 วัน อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที (ก) ไม่มีเหล็กถาวร (ข) มีแม่เหล็กถาวร

ก

no magnet 0.4ml/min (n=1)				
square	v-shape		square	w-shape
120	96		100	95
115	82		91	111
119	107		128	112
110	102		112	119
464	387		431	437
1160000	967500		1077500	1092500
84%	70%		78%	79%
109	90		101	104
113	104		104	90
130	112		92	125
97	105		121	110
449	411		418	429
1122500	1027500		1045000	1072500
81%	75%		76%	78%
129	100		121	92
119	116		132	120
101	105		106	111
110	122		103	115
459	443		462	438
1147500	1107500		1155000	1095000
83%	80%		84%	79%

no magnet 0.4ml/min (n=2)				
square	v-shape		square	w-shape
115	104		104	115
107	94		105	119
100	97		94	100
103	100		95	90
425	395		398	424
1062500	987500		995000	1060000
77%	72%		72%	77%
112	93		107	113
102	99		109	104
111	109		121	97
100	113		100	104
425	414		437	418
1062500	1035000		1092500	1045000
77%	75%		79%	76%
94	103		109	104
99	100		110	103
107	105		98	93
115	89		93	87
415	397		410	387
1037500	992500		1025000	967500
75%	72%		74%	70%

ข

magnet 0.4ml/min (n=1)				
square	v-shape		square	w-shape
104	97		70	80
93	84		84	84
82	96		96	92
100	99		102	97
379	376		352	353
947500	940000		880000	882500
69%	68%		64%	64%
104	84		100	84
100	82		103	80
94	75		85	92
95	70		94	99
393	311		382	355
982500	777500		955000	887500
71%	56%		69%	64%
94	79		74	90
100	74		78	92
92	82		90	82
90	75		94	80
376	310		336	344
940000	775000		840000	860000
68%	56%		61%	62%

magnet 0.4ml/min (n=2)				
square	v-shape		square	w-shape
84	84		84	102
85	75		94	94
90	80		99	74
94	74		103	79
353	313		380	349
882500	782500		950000	872500
64%	57%		69%	63%
94	89		102	74
105	80		84	80
100	85		83	89
97	104		80	94
396	358		349	337
990000	895000		872500	842500
72%	65%		63%	61%
105	102		103	94
112	94		111	93
105	88		102	99
92	91		90	104
414	375		406	390
1035000	937500		1015000	975000
75%	68%		74%	71%

รูปที่ ค5 ผลการนับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียที่ทางออกของอุปกรณ์ระยะการติดเชื้อที่ 5 วัน อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาที (ก) ไม่มีเหล็กถาวร (ข) มีแม่เหล็กถาวร

no magnet 0.8ml/min (n=1)					no magnet 0.8ml/min (n=2)				
square	v-shape		square	w-shape	square	v-shape		square	w-shape
105	99		100	103	104	120		109	115
100	102		105	95	94	110		121	121
109	94		100	100	109	105		119	130
123	119		103	107	121	100		125	107
437	414		408	405	428	435		474	473
1092500	1035000		1020000	1012500	1070000	1087500		1185000	1182500
80%	76%		75%	74%	78%	80%		87%	86%
109	94		104	105	124	121		114	114
112	99		109	115	113	112		107	102
105	120		109	94	115	110		99	105
132	102		117	90	109	100		103	124
458	415		439	404	461	443		423	445
1145000	1037500		1097500	1010000	1152500	1107500		1057500	1112500
84%	76%		80%	74%	84%	81%		77%	81%
104	95		103	107	115	121		104	98
109	98		102	92	107	104		100	104
112	107		125	97	120	107		105	105
99	109		100	104	108	116		109	103
424	409		430	400	450	448		418	410
1060000	1022500		1075000	1000000	1125000	1120000		1045000	1025000
78%	75%		79%	73%	82%	82%		76%	75%

magnet 0.8ml/min (n=1)					magnet 0.8ml/min (n=2)				
square	v-shape		square	w-shape	square	v-shape		square	w-shape
104	84		92	80	105	104		103	104
92	90		80	91	84	103		109	94
95	82		88	90	99	84		99	93
100	99		87	94	79	99		89	99
391	355		347	355	367	390		400	390
977500	887500		867500	887500	917500	975000		1000000	975000
71%	65%		63%	65%	67%	71%		73%	71%
104	94		105	94	109	95		105	107
99	93		92	103	95	99		100	98
94	84		84	94	94	106		101	97
109	80		94	84	99	103		95	102
406	351		375	375	397	403		401	404
1015000	877500		937500	937500	992500	1007500		1002500	1010000
74%	64%		69%	69%	73%	74%		73%	74%
104	94		82	84	113	94		100	99
100	102		84	95	97	85		112	103
100	113		80	99	89	105		102	102
82	95		92	84	99	102		97	90
386	404		338	362	398	386		411	394
965000	1010000		845000	905000	995000	965000		1027500	985000
71%	74%		62%	66%	73%	71%		75%	72%

รูปที่ ๑๖ ผลการนับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียที่ทางออกของอุปกรณ์ระยะการติดเชื้อที่ 5 วัน อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิเมตรต่อนาที (ก) ไม่มีเหล็กถาวร (ข) มีแม่เหล็กถาวร

no magnet 0.4ml/min (n=1)					no magnet 0.4ml/min (n=2)				
square	v-shape		square	w-shape	square	v-shape		square	w-shape
94	84		85	94	103	105		105	100
105	94		97	106	98	103		107	107
103	103		107	118	88	98		97	105
99	100		103	111	104	97		99	82
401	381		392	429	393	403		408	394
1002500	952500		980000	1072500	982500	1007500		1020000	985000
71.39%	67.83%		69.79%	76.38%	66%	68%		69%	66%
103	89		87	107	105	97		104	97
104	94		88	105	110	104		94	95
97	99		97	96	109	107		99	109
92	109		110	116	94	100		97	96
396	391		382	424	418	408		394	397
990000	977500		955000	1060000	1045000	1020000		985000	992500
70.50%	69.61%		68.01%	75.49%	70%	69%		66%	67%
105	85		90	105	107	94		106	102
100	87		91	112	115	95		94	107
95	99		99	103	107	112		97	98
99	102		107	95	104	108		113	107
399	373		387	415	433	409		410	414
997500	932500		967500	1037500	1082500	1022500		1025000	1035000
71.04%	66.41%		68.90%	73.89%	73%	69%		69%	70%

magnet 0.4ml/min (n=1)					magnet 0.4ml/min (n=2)				
square	v-shape		square	w-shape	square	v-shape		square	w-shape
69	74		83	90	77	84		79	74
84	75		90	83	79	79		84	77
79	82		88	79	95	77		94	68
89	77		85	87	84	67		110	66
321	308		346	339	335	307		367	285
802500	770000		865000	847500	837500	767500		917500	712500
57.15%	54.84%		61.60%	60.36%	56%	52%		62%	48%
89	77		82	77					
75	79		75	75	84	83		74	84
79	77		77	72	80	70		80	76
85	81		92	79	79	77		85	77
328	314		326	303	87	64		88	62
820000	785000		815000	757500	330	294		327	299
58.40%	55.91%		58.04%	53.95%	825000	735000		817500	747500
					56%	49%		55%	50%
82	79		82	79	84	74		79	77
80	75		84	76	87	73		77	79
86	72		79	77	94	74		84	80
84	68		74	62	82	68		92	67
332	294		319	294	347	289		332	303
830000	735000		797500	735000	867500	722500		830000	757500
59.11%	52.34%		56.80%	52.34%	58%	49%		56%	51%

รูปที่ ค7 ผลการนับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเข็มมาลาเรียที่ทางออกของอุปกรณ์ระยะการติดเชื้อที่ 7 วัน อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาที (ก) ไม่มีเหล็กถาวร (ข) มีแม่เหล็กถาวร

no magnet 0.8ml/min (n=1)					no magnet 0.8ml/min (n=2)				
square	v-shape		square	w-shape	square	v-shape		square	w-shape
90	83		88	80	94	97		110	105
87	104		94	89	101	95		98	97
89	95		93	96	103	105		89	95
103	88		91	97	97	113		107	107
369	370		366	362	395	410		404	404
922500	925000		915000	905000	987500	1025000		1010000	1010000
74%	74%		74%	73%	75%	78%		77%	77%
95	83		94	89	103	102		103	95
94	82		95	95	107	94		107	99
100	80		99	94	115	98		95	105
94	95		84	92	98	105		97	103
383	340		372	370	423	399		402	402
957500	850000		930000	925000	1057500	997500		1005000	1005000
77%	68%		75%	74%	80%	76%		76%	76%
105	98		102	95	103	94		115	103
107	104		97	94	107	98		103	107
98	107		89	85	95	105		95	109
85	89		99	104	99	103		93	91
395	398		387	378	404	400		406	410
987500	995000		967500	945000	1010000	1000000		1015000	1025000
					77%	76%		77%	78%

magnet 0.8ml/min (n=1)					magnet 0.8ml/min (n=2)				
square	v-shape		square	w-shape	square	v-shape		square	w-shape
77	67		77	87	84	84		97	80
81	70		74	78	89	94		98	94
73	74		79	79	91	82		103	81
76	79		87	75	102	80		91	83
307	290		317	319	366	340		389	338
767500	725000		792500	797500	915000	850000		972500	845000
62%	58%		64%	64%	70%	65%		74%	64%
75	70		79	84	94	74		102	74
82	77		75	80	92	79		94	79
86	79		84	70	91	81		85	82
88	80		82	74	97	85		97	85
331	306		320	308	374	319		378	320
827500	765000		800000	770000	935000	797500		945000	800000
67%	62%		64%	62%	71%	61%		72%	61%
84	77		72	84	95	74		94	75
80	76		74	81	99	76		97	85
81	82		85	74	92	82		98	84
74	84		89	73	84	87		101	72
319	319		320	312	370	319		390	316
797500	797500		800000	780000	925000	797500		975000	790000
64%	64%		64%	63%	70%	61%		74%	60%

รูปที่ ค8 ผลการนับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเข็มมาลาเรียที่ทางออกของอุปกรณ์ระยะการติดเชื้อที่ 7 วัน อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที (ก) ไม่มีเหล็กถาวร (ข) มีแม่เหล็กถาวร

ก

no magnet 0.4ml/min (n=1)				
square	v-shape		square	w-shape
79	74		81	77
81	69		74	80
80	73		80	69
79	68		80	79
319	284		315	305
797500	710000		787500	762500
78%	69%		77%	74%
84	85		85	85
91	77		88	88
82	81		92	72
81	77		75	79
338	320		340	324
845000	800000		850000	810000
82%	78%		83%	79%
88	80		84	72
78	74		94	70
89	77		75	84
75	86		80	89
330	317		333	315
825000	792500		832500	787500
80%	77%		81%	77%

ข

magnet 0.4ml/min (n=1)				
square	v-shape		square	w-shape
62	47		55	47
64	50		57	57
59	38		60	45
69	34		63	51
254	169		235	200
635000	422500		587500	500000
62%	41%		57%	49%
65	51		61	51
64	42		60	55
69	44		67	59
72	50		69	61
270	187		257	226
675000	467500		642500	565000
66%	46%		63%	55%
67	55		65	54
66	49		61	55
58	52		62	59
65	51		72	65
256	207		260	233
640000	517500		650000	582500
62%	50%		63%	57%

รูปที่ ค9 ผลการนับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียที่ทางออกของอุปกรณ์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียในคน อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาที (ก) ไม่มีเหล็กถาวร (ข) มีแม่เหล็กถาวร

ก

no magnet 0.8ml/min (n=1)				
square	v-shape		square	w-shape
109	84		107	99
105	99		94	95
90	96		107	95
99	96		116	100
403	375	0	424	389
1007500	937500	0	1060000	972500
84%	78%	0%	88%	81%
108	103		87	100
91	100		89	94
105	104		109	95
107	84		105	103
411	391	0	390	392
1027500	977500	0	975000	980000
86%	81%	0%	81%	82%
110	95		110	85
99	89		95	99
95	85		84	102
115	104		115	86
419	373	0	404	372
1047500	932500	0	1010000	930000
87%	78%	0%	84%	77%

ข

magnet 0.8ml/min (n=1)				
square	v-shape		square	w-shape
88	79		97	71
82	79		74	74
98	81		83	74
95	72		82	80
363	311	0	336	299
907500	777500	0	840000	747500
76%	65%	0%	70%	62%
104	75		87	72
80	70		84	77
95	68		85	81
89	69		81	74
368	282	0	337	304
920000	705000	0	842500	760000
77%	59%	0%	70%	63%
89	70		100	84
97	77		98	80
91	79		83	79
90	68		93	75
367	294		374	318
917500	735000		935000	795000
76%	61%		78%	66%

รูปที่ ค10 ผลการนับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื่อมมาลาเรียที่ทางออกของอุปกรณ์ที่ติดเชื่อมมาลาเรียในคน อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที (ก) ไม่มีเหล็กถาวร (ข) มีแม่เหล็กถาวร

ก)

no magnet 0.4ml/min (n=1)				no magnet 0.4ml/min (n=1)			
square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape
84	79	79	67	80	83	79	67
85	78	78	59	84	65	78	59
90	83	84	74	74	78	84	74
82	85	81	78	80	77	81	78
341	325	322	278	318	303	322	278
852500	812500	805000	695000	795000	757500	805000	695000
62%	60%	59%	51%	56%	54%	57%	49%
83	84	74	61	65	63	75	76
80	73	70	79	79	75	68	78
73	80	83	58	74	88	84	85
85	85	89	74	81	94	94	74
321	322	316	272	299	320	321	313
802500	805000	790000	680000	747500	800000	802500	782500
59%	59%	58%	50%	53%	57%	57%	55%
77	85	75	76	81	73	74	76
79	79	77	84	72	84	68	65
84	77	81	80	69	88	71	82
80	83	80	83	79	85	86	74
320	324	313	323	301	330	299	297
800000	810000	782500	807500	752500	825000	747500	742500
59%	59%	57%	59%	53%	58%	53%	52%
75	84	80	85	98	83	85	81
79	83	83	88	74	74	97	79
81	91	77	93	84	79	85	88
79	76	92	90	79	80	86	75
314	334	332	356	335	316	353	323
785000	835000	830000	890000	837500	790000	882500	807500
58%	61%	61%	65%	59%	56%	62%	57%
74	63	74	84	88	80	79	76
79	65	79	78	76	65	74	65
81	82	81	74	74	84	75	82
70	70	71	86	83	75	88	84
304	281	305	322	321	304	316	307
760000	702500	762500	805000	802500	760000	790000	767500
56%	51%	56%	59%	57%	54%	56%	54%

ข)

magnet 0.4ml/min (n=1)				magnet 0.4ml/min (n=2)			
square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape
72	77	82	81	96	94	95	94
74	74	74	71	84	74	75	75
83	68	80	77	77	68	74	77
68	82	75	79	95	88	78	79
297	301	311	308	352	324	322	325
742500	752500	777500	770000	880000	810000	805000	812500
54%	55%	57%	56%	62%	57%	57%	57%
75	82	85	67	104	82	87	78
84	80	74	86	84	80	77	95
70	68	70	78	74	89	98	84
67	64	64	65	77	67	89	75
296	294	293	296	339	318	351	332
740000	735000	732500	740000	847500	795000	877500	830000
54%	54%	54%	54%	60%	56%	62%	59%
81	80	82	75	103	80	82	75
79	77	81	79	87	77	81	79
85	76	74	84	95	76	74	84
63	65	70	82	75	65	70	82
308	298	307	320	360	298	307	320
770000	745000	767500	800000	900000	745000	767500	800000
56%	55%	56%	59%	64%	53%	54%	57%
65	66	68	71	75	76	78	71
64	81	72	81	64	81	72	81
79	69	69	74	84	88	100	74
82	77	65	80	92	97	84	80
290	293	274	306	315	342	334	306
725000	732500	685000	765000	787500	855000	835000	765000
53%	54%	50%	56%	56%	60%	59%	54%
74	84	83	76	94	84	87	77
79	70	74	83	87	79	74	95
82	72	72	68	81	82	84	75
80	71	71	65	78	77	71	74
315	297	300	292	340	322	316	321
787500	742500	750000	730000	850000	805000	790000	802500
58%	54%	55%	53%	60%	57%	56%	57%

รูปที่ ค11 ผลการนับอนุภาคเม็ดพลาสติก อัตราการไหลที่ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาที (ก) ไม่มีเหล็กถาวร (ข) มีแม่เหล็กถาวร

ก

no magnet 0.8ml/min (n=1)				no magnet 0.8ml/min (n=2)			
square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape
84	84	85	74	84	81	85	74
90	95	94	78	90	94	94	78
101	94	93	83	101	90	93	83
95	90	90	85	84	74	90	85
370	363	362	320	359	339	362	320
925000	907500	905000	800000	897500	847500	905000	800000
64%	63%	63%	56%	68%	64%	69%	61%
88	84	115	83	81	78	84	82
91	87	107	85	75	88	79	80
84	79	90	93	84	84	73	74
105	80	73	96	67	65	78	79
368	330	385	357	307	315	314	315
920000	825000	962500	892500	767500	787500	785000	787500
64%	57%	67%	62%	58%	60%	59%	60%
74	85	93	84	88	87	80	77
88	94	97	85	91	82	85	83
90	90	83	98	67	90	94	97
96	82	94	103	74	68	91	85
348	351	367	370	320	327	350	342
870000	877500	917500	925000	800000	817500	875000	855000
61%	61%	64%	64%	61%	62%	66%	65%
79	74	91	74	74	84	81	70
83	85	90	85	85	95	74	74
86	89	82	92	84	94	94	77
92	93	104	90	88	90	80	68
340	341	367	341	331	363	329	289
850000	852500	917500	852500	827500	907500	822500	722500
59%	59%	64%	59%	63%	69%	62%	55%
78	85	84	94	70	84	85	78
79	80	82	95	71	95	94	76
84	77	85	83	95	94	93	95
80	74	93	104	74	90	90	65
321	316	344	376	310	363	362	314
802500	790000	860000	940000	775000	907500	905000	785000
56%	55%	60%	66%	59%	69%	69%	59%

ข

magnet 0.8ml/min (n=1)				magnet 0.8ml/min (n=2)			
square	v-shape	square	w-shape	square	v-shape	square	w-shape
84	84	101	89	82	87	95	85
88	85	85	84	74	94	75	75
94	99	88	92	65	78	75	78
105	93	96	84	95	74	84	87
371	361	370	349	316	333	329	325
927500	902500	925000	872500	790000	832500	822500	812500
65%	63%	64%	61%	60%	63%	62%	62%
85	92	95	99	75	98	74	77
94	105	84	97	65	75	65	84
95	100	95	84	68	75	78	95
92	98	97	89	95	84	84	74
366	395	371	369	303	332	301	330
915000	987500	927500	922500	757500	830000	752500	825000
64%	69%	65%	64%	57%	63%	57%	63%
92	79	85	98	62	74	72	89
105	75	89	85	84	64	89	74
97	86	99	82	83	86	74	86
98	89	107	109	94	87	92	94
392	329	380	374	323	311	327	343
980000	822500	950000	935000	807500	777500	817500	857500
68%	57%	66%	65%	61%	59%	62%	65%
87	92	91	92	81	84	80	70
104	94	82	87	90	95	90	84
103	100	84	86	78	84	93	86
97	85	104	99	97	85	85	97
391	371	361	364	346	348	348	337
977500	927500	902500	910000	865000	870000	870000	842500
68%	65%	63%	63%	66%	66%	66%	64%
81	97	105	104	64	80	84	74
107	104	88	84	90	78	86	78
105	84	81	95	68	94	65	83
97	97	87	92	95	89	67	85
390	382	361	375	317	341	302	320
975000	955000	902500	937500	792500	852500	755000	800000
68%	67%	63%	65%	60%	65%	57%	61%

รูปที่ ค12 ผลการนับอนุภาคเม็ดพลาสติก อัตราการไหลที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที (ก) ไม่มีเหล็กถาวร (ข) มีแม่เหล็กถาวร

ภาคผนวก ง
การตรวจสอบอัตราการไหลทั้งสองช่องทางการไหล

Sample	Weight of eppendrof(g)	Weight of water in eppendrof (g)	Weight of water (g)
1	0.977	1.945	0.968
1	0.977	1.901	0.924
2	0.977	1.909	0.932
2	0.977	1.984	1.007
3	0.977	1.889	0.912
3	0.977	1.934	0.957

รูปที่ ง1 การคำนวณอัตราการไหลทั้งสองช่องทางของระบบของไหลจุลภาค

- การทดลองเพื่อคำนวณถึงอัตราการไหลที่ออกจากระบบของไหลจุลภาค มีการเก็บปริมาตรน้ำทั้งสองช่องทางการไหล ใช้อัตราการไหลที่ 0.04 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที แล้วเพิ่มอัตราการไหลขึ้นไป 0.4 มิลลิลิตรต่อนาทีเวลา 2 นาที โดยกำหนดค่าที่ปั๊มดิจิตอลไว้ให้ปล่อยน้ำออกมา 1 มิลลิลิตร

- [1] S. Kasetsirikul, J. Buranapong, W. Srituravanich, M. Kaewthamasorn, and A. Pimpin, "The development of malaria diagnostic techniques: a review of the approaches with focus on dielectrophoretic and magnetophoretic methods," *Malar J*, vol. 15, no. 1, p. 358, Jul 12 2016.
- [2] World Health Organization .The Use of Malaria Rapid Diagnostic tests 2nd edition, ISBN92-9061-204-5, 2006, (NLM:Classification WC750)
- [3] J. Zhang, S. Yan, D. Yuan, G. Alici, N.T. Nguyen, "Fundamentals and applications of inertial microfluidics: a review," *Lab Chip*, vol. 16, no. 1, pp. 10-34, Jan 7 2016.
- [4] H. W. Hou, Bhagat, Chong, "Deformability based cell margination--a simple microfluidic design for malaria-infected erythrocyte separation," *Lab Chip*, vol. 10, no. 19, pp. 2605-13, Oct 7 2010.
- [5] K. K. Zeming, S. Ranjan, and Y. Zhang, "Rotational separation of non-spherical bioparticles using I-shaped pillar arrays in a microfluidic device," *Nat Commun*, vol. 4, p. 1625, 2013.
- [6] P. Gascoyne, C. Mahidol, M. Ruchirawat, J. Satayavivad, P. Watcharasit, and F. Becker, "Microsample preparation by dielectrophoresis: isolation of malaria," *Lab Chip*, vol. 2, no. 2, pp. 70-5, May 2002.
- [7] S. Hackett, J. Hamzah, T. M. Davis, and T. G. St Pierre, "Magnetic susceptibility of iron in malaria-infected red blood cells," *Biochim Biophys Acta*, vol. 1792, no. 2, pp. 93-9, Feb 2009.
- [8] L. Bannister and G. Mitchell, "The ins, outs and roundabouts of malaria," *Trends in Parasitology*, vol. 19, no. 5, pp. 209-213, 2003.
- [9] T. F. Kong, W.Y. Weng, W.K.Peng, H.W.Hou, Marcos, "Enhancing malaria diagnosis through microfluidic cell enrichment and magnetic resonance relaxometry detection," *Sci Rep*, vol. 5, p. 11425, Jun 17 2015.
- [10] A. Munaz, M. J. A. Shiddiky, and N.-T. Nguyen, "Magnetophoretic separation of diamagnetic particles through parallel ferrofluid streams," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 275, pp. 459-469, 2018.

- [11] C. Iliescu, G. Xu, E. Barbarini, M. Avram, and A. Avram, "Microfluidic device for continuous magnetophoretic separation of white blood cells," *Microsystem Technologies*, vol. 15, no. 8, pp. 1157-1162, 2008.
- [12] J. Xia, X. Chen, C. Z. Zhou, Y. G. Li, and Z. H. Peng, "Development of a low-cost magnetic microfluidic chip for circulating tumour cell capture," *IET Nanobiotechnol*, vol. 5, no. 4, pp. 114-20, Dec 2011.
- [13] J. Nam, H. Huang, H. Lim, C. Lim, and S. Shin, "Magnetic separation of malaria-infected red blood cells in various developmental stages," *Anal Chem*, vol. 85, no. 15, pp. 7316-23, Aug 6 2013.
- [14] M. Bu, T. B. Christensen, K. Smistrup, A. Wolff, and M. F. Hansen, "Characterization of a microfluidic magnetic bead separator for high-throughput applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 145-146, pp. 430-436, 2008.
- [15] A. Blue Martin, W. T. Wu, M. V. Kameneva, and J. F. Antaki, "Development of a High-Throughput Magnetic Separation Device for Malaria-Infected Erythrocytes," *Ann Biomed Eng*, vol. 45, no. 12, pp. 2888-2898, Dec 2017.
- [16] W. T. Wu, A. B. Martin, A. Gandini, N. Aubry, M. Massoudi, and J. F. Antaki, "Design of microfluidic channels for magnetic separation of malaria-infected red blood cells," *Microfluid Nanofluidics*, vol. 20, no. 2, 2016.
- [17] J. Darabi and C. Guo, "Continuous isolation of monocytes using a magnetophoretic-based microfluidic Chip," *Biomed Microdevices*, vol. 18, no. 5, p. 77, Oct 2016.

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พชร หนูสวัสดิ์
วัน เดือน ปี เกิด	6 กันยายน 2536
สถานที่เกิด	สระบุรี
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาจากสถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2558 ประสบการณ์ฝึกงาน ในแผนกบำรุงรักษา (Department of Maintenance) จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) 2557 ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559
ที่อยู่ปัจจุบัน	17/4 ซอยคงเจริญ ถนน ท่าเรือ อำเภอบางเสาธง จังหวัดสมุทรปราการ 13130
ผลงานตีพิมพ์	การออกแบบโครงสร้างนิกเกิลสำหรับดักจับเซลล์เม็ดเลือดแดงด้วยแรงแม่เหล็ก ตีพิมพ์ในวารสาร การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32