

การศึกษากลไกการดักจับอนุภาคภายในหลุมจุลภาครูปทรงสามเหลี่ยม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A study of particle trapping mechanism inside a triangular microwell array



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	การศึกษาการดักจับอนุภาคภายในหลุมจุลภาครูปทรงสามเหลี่ยม
โดย	นายภาคภูมิ ยิ่งประทานพร
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

ภาคภูมิ ยิ่งประทานพร : การศึกษากลไกการดักจับอนุภาคภายในหลุมจุลภาครูปทรงสามเหลี่ยม. (A study of particle trapping mechanism inside a triangular microwell array) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ

การศึกษาแบ่งออกเป็นสองวัตถุประสงค์หลัก อย่างแรกเป็นการศึกษากลไกการดักจับอนุภาคโดยอาศัยหลักการหมุนวนที่เกิดขึ้นภายในหลุมสามเหลี่ยมคือ สามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ผลจากการจำลองการไหลพบว่าของไหลที่บริเวณหลุมรูปทรงสามเหลี่ยมจะเกิดการไหลแบบหมุนวนสำคัญ 2 รูปแบบคือ การหมุนวนภายในหลุมโดยแกนการหมุนตั้งฉากกับทิศทางการไหล และการหมุนวนที่ขอบด้านหน้าหลุมโดยมีแกนการหมุนในทิศทางเดียวกับการไหล โดยการหมุนแบบแรกเป็นการดักจับอนุภาคลงสู่หลุม ทั้งนี้การหมุนวนภายในหลุมและการหมุนวนที่ขอบด้านหน้าหลุมจะเกิดการปฏิสัมพันธ์ของการหมุนวนจนทำให้เกิดการหมุนวนอีกกลุ่มหนึ่งภายในหลุมเรียกว่าการหมุนวนทุติยภูมิ การหมุนวนนี้อาจช่วยประคองอนุภาคที่ถูกดักจับให้อยู่กลางหลุมแต่หากมีขนาดการหมุนวนที่มากเกินไปอาจส่งผลให้อนุภาคหลุดออกจากหลุมได้ โดยสามเหลี่ยมมุมป้านจะมีขนาดการหมุนวนทุติยภูมิสูงสุด ดังนั้นหากมีอนุภาคถูกดักจับภายในหลุมมีความเป็นไปได้สูงที่อนุภาคจะถูกแรงหมุนวนดันออกจากหลุมสำหรับกรณีสามเหลี่ยมมุมป้านรองลงมาคือสามเหลี่ยมมุมเท่าและสามเหลี่ยมมุมแหลมตามลำดับ วัตถุประสงค์ที่สองคือการนำเสนอรูปแบบการดักจับอนุภาคโดยอาศัยการทดลองประกอบ รูปแบบการดักจับใหม่นี้เริ่มจากการดักจับอนุภาคให้เต็มหลุมที่อัตราการไหลต่ำกว่าก่อนจากนั้นเพิ่มอัตราการไหลเพื่อเพิ่มขนาดของการไหลหมุนวนทุติยภูมิส่งผลให้อนุภาคออกจากหลุมมากขึ้น โดยอุปกรณ์การไหลประกอบไปด้วยช่องการไหลที่พื้นมีการเรียงตัวของหลุมจุลภาครูปทรงสามเหลี่ยม สำหรับการทดลองเริ่มจากการนำอนุภาคพลาสติกผสมเข้ากับสารละลาย PBS และฉีดเข้าสู่อุปกรณ์การไหลที่อัตราการไหลประมาณ 10 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงเพื่อดักจับอนุภาคให้เต็มหลุมจากนั้นปรับอัตราการไหลสูงเพื่อดันอนุภาคออกจากหลุมจนกระทั่งเหลือเพียงอนุภาคเดียว โดยที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงเป็นเวลา 2 นาที พบว่าสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้านสามารถดักจับอนุภาคเดี่ยวได้ 83.6% 31.5% และ 16.7% ตามลำดับ ซึ่งสามเหลี่ยมมุมแหลมจะกักเก็บอนุภาคไว้ภายในหลุมได้มากเนื่องจากมีขนาดการหมุนวนทุติยภูมิในหลุมที่ต่ำแต่สามเหลี่ยมมุมป้านมีขนาดการหมุนวนทุติยภูมิสูงสุดส่งผลให้อนุภาคส่วนใหญ่ถูกดันออกจากหลุมจนหมด



สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970282321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD: Microfluidic system; Particle entrapment; Triangular microwell.

Phakpoom Yingprathanphon : A study of particle trapping mechanism inside a triangular microwell array. Advisor: Asst. Prof. Alongkorn Pimpin, Ph.D.

This study has two objectives. The first objective is to study of a trapping mechanism of a particle, by induced flow-recirculation, in triangular microwells, and investigate for different shapes such as equilateral, acute and obtuse microwells. The results from computational study showed that there are two main induced flow-structures such as the lateral vortex at the upper part, and the counter-rotating streamwise vortices at the leading-edges of the microwell. The lateral vortex might help preventing the trapped particle moving out as a covering barrier. Meanwhile, the interaction between the lateral vortex and streamwise vortices at the leading edges induces another pair of streamwise vortex inside the microwell. These secondary streamwise vortices might help aligning the entrapped particle at the middle of the microwell, while the extremely strong vortices may create the flow fluctuation causing of the detrapping of particles. Among three shapes, the obtuse triangular microwell allows stronger interaction between two vortices resulting of stronger flow fluctuation inside the microwell. Therefore, once particles are entrapped, the possibility of particle detrapping should be higher for the obtuse microwell, and becomes smaller for equilateral and acute microwells, respectively. The second objective is to propose a new trapping scheme and demonstrate its trapping efficacy with the experiments. The new scheme starts with the full entrapment of particles inside the microwells at extremely low flow rate. After that, the flow rate is increased to generate significant flow recirculation allowing strong hydrodynamic forces to push the particles out from the microwell. The device consists of an array of triangular microwells on the bottom surface of microchannel. In experiments, the polystyrene beads mixed with PBS solution were introduced at the flow rate of 10 ml/hr in order to fully entrap particles inside the microwells. After that, the higher flow rate was applied in order to detrap particles until a single particle was remained. At the flow rate of 500 ml/hr, the single particle remained around 83.6, 31.5 and 16.7%, respectively, for equilateral, obtuse and acute microwells, after 2 minutes from the introduction of high flow rate. In general, most particles were still well entrapped inside the acute microwells, which might be due to the weak secondary streamwise vortices. On the other hand, the strong secondary streamwise vortices inside the obtuse microwells tended to drag all particles away.

Field of Study: Mechanical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากการได้รับความช่วยเหลือในหลายๆด้านจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. อลงกรณ์ พิมพ์พิณ ซึ่งคอยมอบความรู้ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยตั้งแต่แรกเริ่มจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา จนนำไปสู่การวางแผนขั้นตอนการวิจัยได้อย่างครบถ้วนและราบรื่นเสมอมา

ขอกราบขอบคุณ ผศ.ดร. วีระยุทธ ศรีธรรมาวิช ผศ.ดร. สรล ศาลากิจ และ รศ.ดร. เวชพงศ์ ชูติชูเดช ที่คอยสละเวลาเป็นกรรมการสอบและคอยให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับงานวิจัยส่งผลให้ งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ศ.สพ.ญ.ดร. อัจฉริยา ไสละสูต รศ.น.สพ.ดร. ชีระยุทธ แก้วอมตวงศ์ อ. น.สพ.ดร. ประพฤติดี ปิยะวิริยะกุล และ สพ.ญ. สุขญา พันธุ์พัฒนกุล ที่กรุณาให้ความรู้เกี่ยวกับระบบชีววิทยาอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวางแผนแนวทางการทำวิจัย

ขอขอบคุณรุ่นพี่ รุ่นน้องและเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคนาโน เทคโนโลยีรุ่นปี พ.ศ. 2559 – 2561 ที่คอยให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้ชีวิตภายในมหาวิทยาลัย คอยให้กำลังใจ คอยแนะนำเทคนิคเบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์การทดลองในห้องปฏิบัติการ รวมไปถึงคอยสร้างเสียงหัวเราะและความสนุกสนานอันเป็นบรรยากาศที่ดีต่อผู้ทำวิทยานิพนธ์เสมอมา

ขอขอบคุณคุณอาจารย์และนิสิตภายในชมรมบัณฑิตศึกษาศาสตร์วิศวกรรมศาสตร์ทุกคนสำหรับมิตรภาพ ความเสียสละ รวมไปถึงคำแนะนำเกี่ยวกับกิจกรรมอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ นางสาว อภิญญา ฐานะ คอยให้กำลังใจและแสดงความห่วงใยเสมอมา

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนโครงการพัฒนาวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศตวรรษที่ 2 ในหัวข้ออุปกรณ์การแพทย์ชาญฉลาด และ ทุนการศึกษาจากภาคีวิชาวิศวกรรมเครื่องกลจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา และ มารดา ผู้คอยอบรมสั่งสอนผู้วิจัยด้วยความรักและความอบอุ่น คอยชี้แนะให้แง่คิดเกี่ยวกับการใช้ชีวิต การวิเคราะห์และแก้ไขปัญหา คอยประสิทธิ์ประสาทความรู้พื้นฐานที่สำคัญอันเป็นส่วนหนึ่งของความสำเร็จของงานวิจัยในครั้งนี้ อีกทั้งยังคอยมอบความห่วงใย ความหวังดีและเป็นกำลังใจสำคัญต่อผู้วิจัยเสมอมา

ภาคภูมิ ยิ่งประทานพร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	6
1.3.1 การจำลองการไหล.....	6
1.3.2 การออกแบบ.....	6
1.3.3 การขึ้นรูป.....	6
1.3.4 การทดลอง.....	7
1.4 ระเบียบขั้นตอนของงานวิจัย.....	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	8
บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรม.....	9
2.1 การดักจับอนุภาคโดยอาศัยแรงภายนอก.....	9
2.1.1 การดักจับอนุภาคด้วยแม่เหล็ก (Magnetic entrapment).....	10
2.1.2 การดักจับอนุภาคด้วยไฟฟ้า (Electric entrapment).....	11

2.2 การดักจับอนุภาคโดยไม่อาศัยแรงภายนอก.....	12
2.2.1 การดักจับอนุภาคด้วยร่องยาวขนาดจุลภาค (Microgroove entrapment).....	12
2.2.2 การดักจับอนุภาคด้วยห้องโพรงและช่องว่างขนาดเล็ก (Microchamber and microgap entrapment).....	14
2.2.3 การดักจับอนุภาคด้วยหลุมขนาดเล็ก (Microwell entrapment).....	18
2.3 สรุปผล.....	29
บทที่ 3 การศึกษาเบื้องต้น.....	30
3.1 การสร้างระบบของไหลจุลภาค.....	30
3.1.1 การเตรียมโพลีเมอร์เหลว PDMS (Poly-dimethyl siloxane).....	31
3.1.2 การเตรียมแม่พิมพ์.....	31
3.1.3 การสร้างระบบของไหลจุลภาค.....	31
3.1.3.1 การขึ้นรูปชิ้นงาน.....	31
3.1.3.2 การประกบชิ้นงานเข้าหากัน.....	32
3.1.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของชิ้นงาน.....	32
3.2 การเตรียมการทดลอง.....	33
3.2.1 อุปกรณ์สำหรับการบันทึกผล.....	33
3.2.2 อุปกรณ์ทดลองส่วนควบ.....	34
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	34
3.4 การเก็บผลการทดลอง.....	36
3.5 ผลการทดลอง.....	36
3.5.1 ผลการทดลองที่ความเข้มข้น 100 particles/ml.....	36
3.5.2 ผลการทดลองที่ความเข้มข้น 30 particles / ml.....	37
3.5.3 ผลการทดลองที่ความเข้มข้น 50 particles/ml.....	38
3.5.4 ผลการทดลองการดักจับอนุภาคภายในหลุมสามเหลี่ยมสามรูปแบบ.....	40

4.2.1 การออกแบบแม่พิมพ์ส่วนบน	79
4.2.2 การออกแบบแม่พิมพ์ส่วนล่าง	81
4.3 สรุปผล	83
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	84
5.1 อุปกรณ์ดักจับอนุภาคแบบใหม่และวิธีการทดลอง	84
5.2 การแปรผลการทดลอง.....	86
5.3 ผลการทดลองดักจับอนุภาคระยะสั้น.....	86
5.3.1 ผลการทดลองการดักจับอนุภาคระยะสั้น อัตราการไหล 350 mL/hr	86
5.3.2 ผลการทดลองการดักจับอนุภาคระยะสั้น อัตราการไหล 500 mL/hr	87
5.4 สรุปผลการทดลองดักจับอนุภาคระยะสั้น.....	87
5.5 ผลการทดลองดักจับอนุภาคระยะยาว	94
5.5.1 ผลการทดลองการดักจับอนุภาคระยะยาว อัตราการไหล 350 mL/hr.....	94
5.5.2 ผลการทดลองการดักจับอนุภาคระยะยาว อัตราการไหล 500 mL/hr.....	94
5.6 สรุปผลการทดลองดักจับอนุภาคระยะยาว	96
5.7 สรุปผล	101
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัย.....	102
6.1 สรุปงานวิจัย.....	102
6.2 อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	104
บรรณานุกรม.....	107
ภาคผนวก.....	109
ภาคผนวก ก ขนาดหลุมจริงหลังการขึ้นรูป	110
ภาคผนวก ข การดักจับอนุภาคเม็ดพลาสติกภายในอุปกรณ์.....	111
ภาคผนวก ค อุปกรณ์สำหรับการทดลอง.....	123
ภาคผนวก ง อุปกรณ์สำหรับการขึ้นรูปอุปกรณ์ทดสอบ	129

ภาคผนวก จ การนำเข้าไฟล์ข้อมูลจากโปรแกรมเขียนแบบเข้าสู่โปรแกรมจำลองการไหลโดยตรง	133
ภาคผนวก ฉ ผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของอนุภาค (Gravitational force) กับแรงการเคลื่อนที่ของของไหล (Hydrodynamic force)	136
ภาคผนวก ช ผลการกระจายความเร็วของของไหลภายในช่องการไหล	139
ภาคผนวก ซ ผลการกระจายตัวการหมุนและความเร็วภายในหลุม	142
ภาคผนวก ฌ ตารางการเก็บข้อมูลผลการกระจายตัวการหมุนเฉลี่ยเทียบพื้นที่ผิว (Surface average of vorticity).....	169
ภาคผนวก ญ ตารางการเก็บข้อมูลผลการทดลอง	173
ประวัติผู้เขียน	189



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	8
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขสำหรับการทดลองการดักจับอนุภาค	35
ภาคผนวกตารางที่ 1 ผลการคำนวณแรงโน้มถ่วงของอนุภาค (Gravitational force) กับแรงการเคลื่อนที่ของของไหล (Hydrodynamic force) อัตราการไหล 35 ml/hr.....	138
ภาคผนวกตารางที่ 2 ผลการคำนวณแรงโน้มถ่วงของอนุภาค (Gravitational force) กับแรงการเคลื่อนที่ของของไหล (Hydrodynamic force) อัตราการไหล 35 ml/hr.....	138
ภาคผนวกตารางที่ 3 ผลการคำนวณการกระจายตัวการหมุนเฉลี่ยเทียบพื้นที่ผิวของสามเหลี่ยมทั้งสามรูปแบบที่ระนาบความลึกต่างกัน ไม่มีอนุภาคภายในหลุม ตามแนวการหมุน สำหรับกรณี (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z	169
ภาคผนวกตารางที่ 4 ผลการคำนวณการกระจายตัวการหมุนเฉลี่ยเทียบพื้นที่ผิวของสามเหลี่ยมทั้งสามรูปแบบที่ระนาบความลึกต่างกัน มีอนุภาคภายในหลุม ตามแนวการหมุน สำหรับกรณี (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z	170
ภาคผนวกตารางที่ 5 ผลการทดลองระยะสั้น อัตราส่วนหลุมที่ดักจับอนุภาคเดี่ยวที่อัตราการไหล 350 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน	173
ภาคผนวกตารางที่ 6 ผลการทดลองระยะสั้น อัตราส่วนหลุมที่ดักจับอนุภาคคู่ที่อัตราการไหล 350 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน	174
ภาคผนวกตารางที่ 7 ผลการทดลองระยะสั้น อัตราส่วนหลุมที่ดักจับสามอนุภาคขึ้นไปที่อัตราการไหล 350 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน	175
ภาคผนวกตารางที่ 8 ผลการทดลองระยะสั้น อัตราส่วนหลุมเปล่าที่อัตราการไหล 350 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน	176
ภาคผนวกตารางที่ 9 ผลการทดลองระยะสั้น อัตราส่วนหลุมที่ดักจับอนุภาคเดี่ยวที่อัตราการไหล 500 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน	177
ภาคผนวกตารางที่ 10 ผลการทดลองระยะสั้น อัตราส่วนหลุมที่ดักจับอนุภาคคู่ที่อัตราการไหล 500 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน	178

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1.1	ขั้นตอนโดยทั่วไปของวิศวกรรมเนื้อเยื่อ	1
รูปที่ 1.2	การเลี้ยงเซลล์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพเทียบกับการเลี้ยงด้วยระบบของไหลจุลภาค [3] ..	2
รูปที่ 1.3	รูปแบบการยึดเกาะของเซลล์ต้นกำเนิดบนโครงเลี้ยงเซลล์ภายในหลุมที่มีเซลล์ยึดเกาะอยู่ .	3
รูปที่ 1.4	อุปกรณ์ห้องปฏิบัติการบนชิพแสดงรูปแบบการสร้างช่องทางไหลขนาดจุลภาคจากการประสานกันของชิ้นงาน.....	4
รูปที่ 2.1	การเรียงตัวของแม่เหล็กขนาดจุลภาค (ก) ภาพรวมตำแหน่งการวางตัวของวัสดุในชิ้นงาน, (ข) ภาพกำลังขยายการเรียงตัวของแม่เหล็กจุลภาค ขนาด $7.5 \times 7.5 \mu\text{m}^2$ ถูกสร้างโดยวิธี Thermo-Magnetically Patterned (TMP), (ค) การจำลองขนาดของเกรเดียนสนามแม่เหล็ก ($\partial B/\partial z$),	11
รูปที่ 2.2	ภาพรวมการดักเซลล์จับโดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าแบบโพซิทีฟ-ไดอิเล็กโตรโฟรีติก (p-DEP).	12
รูปที่ 2.3	(ก) แผนผังแสดงช่องทางเดินของของไหล, (ข) การกระจายตัวของเซลล์ภายในร่องกลุ่มขนาดเล็ก ขนาด $50 \mu\text{m}$ และ $75 \mu\text{m}$, (ค) ภาพแสดงความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นภายในร่องที่มีขนาดแตกต่างกัน [12].....	13
รูปที่ 2.4	(ก) รูปแบบการวางตัวของอุปกรณ์, (ข) ส่วนบน : อุปกรณ์เพิ่มความปั่นป่วนในการไหลของของไหล, (ค) ส่วนล่าง : ห้องโพรงดักจับเซลล์ [13].....	14
รูปที่ 2.5	ภาพจำลองการไหลภายในระบบ (ก) ณ.เวลาที่ยังไม่มีเซลล์ในโพรงดักจับ, (ข) ณ.เวลาที่มีเซลล์อุดตันตำแหน่งด้านล่างโพรงดักจับแล้ว [13].....	16
รูปที่ 2.6	(ก) แผนผังภาพรวมระบบอุปกรณ์, (ข) ส่วนฟิลเตอร์กรองอนุภาคต่ำกว่า $50 \mu\text{m}$, (ค) ส่วนเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วน, (ง) ส่วนดักจับอนุภาคระหว่างช่องแคบ, (จ) ภาพรวมอุปกรณ์จริง, (ฉ) ช่องดักจับเซลล์ขนาดต่างกัน [14]	17
รูปที่ 2.7	(ก) หลุมขนาดเล็กที่มีเซลล์อยู่ด้านล่างของหลุม, (ข) ภาพแสดงระดับของอุปกรณ์,	19
รูปที่ 2.8	(ก) บน-โครงสร้างภายในอุปกรณ์ดักเซลล์ระบบดูดอากาศ และ ล่าง-เซลล์ถูกดูดลงสู่หลุมโดยปั๊มแรงดันต่ำ (17 - 85 kPa), (ข) ภาพถ่ายเซลล์จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) บนซ้าย - ทรงกลม บนขวา - สีเหลือง และ ล่าง - หกเหลี่ยม [17]	20

รูปที่ 2.9 (ก) การวางตัวของหลุมเว้ารูปตัวยูขนาดเล็ก, (ข) แผ่นอะคริลิกเพื่อใช้ยึดชิ้นงาน PDMS ซึ่งถูกติดตั้งภายใน [18].....	21
รูปที่ 2.10 (ก) การสร้างชิ้นงานฉายแสงแบบ Underexposure, (ข) ขั้นตอนการทดลอง [7].....	23
รูปที่ 2.11 (ก) แผนผังช่องทางการไหลของของไหล, (ข) ความเป็นไปได้ในการดักจับเซลล์เดี่ยวของรูปทรงที่ต่างกัน, (ค) การจำลองการไหลของของไหลเมื่อไหลผ่านหลุมจุลภาครูปทรงต่างกัน [8].....	24
รูปที่ 3.1 แผนผังการสร้างอุปกรณ์การไหลขนาดจุลภาค.....	30
รูปที่ 3.2 ภาพรวมเส้นทางการไหลในอุปกรณ์ในระบบของไหลจุลภาค.....	33
รูปที่ 3.3 แผนผังภาพรวมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด	34
รูปที่ 3.4 ภาพแสดงการดักจับอนุภาคเงินไอ ความเข้มข้น 100 particles/ml ที่อัตราการไหล 5 ml/hr.....	37
รูปที่ 3.5 ภาพแสดงการดักจับอนุภาคเงินไอ ความเข้มข้น 50 particles / ml ที่อัตราการไหล 15ml/hr	38
รูปที่ 3.6 ความเป็นไปได้ในการดักจับอนุภาคเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านหลุมที่ตำแหน่งต่างกัน.....	39
รูปที่ 3.8 ความเป็นไปได้ในการดักจับอนุภาคเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านหลุมที่ตำแหน่งต่างกันของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน	40
รูปที่ 3.9 ลำดับการดักจับอนุภาคเดี่ยวภายในหลุมเริ่มจากขั้นตอน (ก) ถึง (ง) ตามลำดับโดย (ก) การเริ่มดักจับอนุภาคโดยอัตราการไหลต่ำ, (ข) อนุภาคถูกดักจับจนแน่นเต็มหลุม, (ค) ใช้อัตราการไหลสูงดันอนุภาคบางส่วนออกจากหลุม, (ง) ดักจับอนุภาคเดี่ยวภายในหลุม.....	41
รูปที่ 4.1 รูปทรงเรขาคณิตช่องการไหลหลักจุลภาค.....	44
รูปที่ 4.2 โมเดลจำลองการไหลเรขาคณิตหลุมจุลภาคสำหรับ (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมป้าน, (ค) สามเหลี่ยมมุมแหลม	45
รูปที่ 4.3 รูปแบบความละเอียดของการตีเมช โดยเส้นสีฟ้าของภาพขยายทางด้านขวาเป็นส่วนของการเพิ่มความหนาแน่นของเมชด้วยคำสั่ง Mesh distribution.....	47
รูปที่ 4.4 เส้นความเร็วการไหล (m/s) ผ่านหลุม (รูปบน) และแนวเส้นทางการไหลของการไหลภายในหลุม (รูปล่าง) สำหรับกรณี (ก) การหมุนวนภายในหลุมจุลภาครูปทรงสามเหลี่ยม, (ข) การหมุนวนที่ตำแหน่งขอบทั้งสองข้าง.....	48

รูปที่ 4.5 ผลลัพธ์การจำลองการไหลแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของเส้นความเร็วภายในช่องการไหลทางเข้าแบบสามเหลี่ยมและมีท่อต่อตรงจากด้านบน	49
รูปที่ 4.6 ผลลัพธ์การจำลองการไหลแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของเส้นความเร็วภายในช่องการไหลทางเข้าแบบสามเหลี่ยมและมีท่อต่อตรงจากด้านหน้า	50
รูปที่ 4.7 ผลลัพธ์การจำลองการไหลแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของเส้นความเร็วภายในช่องการไหลทางเข้าแบบท่อแยกและมีท่อต่อตรงจากด้านหน้า	51
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งการเก็บค่าความเร็วของของไหลภายในช่องการไหล	52
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงสัดส่วนความเร็วต่อความเร็วเฉลี่ยภายในช่องการไหลหลักจูลภาค	52
รูปที่ 4.10 ลักษณะเส้นการเคลื่อนที่ของของไหลที่ระดับความสูงต่างๆ	54
รูปที่ 4.11 การแสดงผลระนาบจากการสร้างภาพตัดขวางตามระนาบ YZ ที่ตำแหน่ง (ก) กึ่งกลางของหลุม, (ข) ขอบของสามเหลี่ยม	56
รูปที่ 4.12 เส้นความเร็วการไหล (m/s) หมุนวนภายในหลุมจูลภาครูปทรงสามเหลี่ยม (รูปบน) และแนวเส้นทางการไหลของการไหลภายในหลุม (รูปล่าง) สำหรับกรณี (ก) มีอนุภาคภายในหลุม, (ข) ไม่มีอนุภาคภายในหลุม	56
รูปที่ 4.13 เส้นความเร็วการไหล (m/s) ผ่านหลุมที่ระนาบตำแหน่งกลางหลุม (รูปซ้าย) และระนาบตำแหน่งข้างหลุม (รูปขวา) สำหรับกรณี (ก) หลุมสามเหลี่ยมด้านเท่า, (ข) หลุมสามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) หลุมสามเหลี่ยมมุมป้าน	59
รูปที่ 4.14 เส้นความเร็วการไหล (m/s) ผ่านหลุมที่ระนาบตำแหน่งกลางหลุม (รูปซ้าย) และระนาบตำแหน่งข้างหลุม (รูปขวา) สำหรับกรณี (ก) หลุมสามเหลี่ยมด้านเท่า, (ข) หลุมสามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) หลุมสามเหลี่ยมมุมป้าน	62
รูปที่ 4.15 วิธีการเก็บค่าขนาดการกระจายตัวการหมุนเฉลี่ยเทียบพื้นที่ผิว	63
รูปที่ 4.16 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 10 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z	66
รูปที่ 4.17 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 150 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z	67

รูปที่ 4.18 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 300 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z.....	68
รูปที่ 4.19 กราฟขนาดการกระจายตัวการหมุนภายในหลุมเฉลี่ยเทียบกับพื้นที่ผิวระนาบความลึกต่างๆ ไม่มีอนุภาคภายในหลุม สำหรับกรณี (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z	69
รูปที่ 4.20 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 10 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z.....	73
รูปที่ 4.21 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 150 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z.....	74
รูปที่ 4.22 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 300 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z.....	75
รูปที่ 4.23 กราฟขนาดการกระจายตัวการหมุนภายในหลุมเฉลี่ยเทียบกับพื้นที่ผิวระนาบความลึกต่างๆ มีอนุภาคภายในหลุม สำหรับกรณี (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z.....	76
รูปที่ 4.24 พื้นที่เก็บผลการทดลองในกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน	77
รูปที่ 4.25 ภาพการออกแบบชิ้นงานด้านบน.....	80
รูปที่ 4.27 ภาพการออกแบบชิ้นงานด้านล่าง (หลุมสามเหลี่ยม).....	82
รูปที่ 5.1 (ก) อุปกรณ์ดักจับอนุภาค, (ข) ตำแหน่งการเก็บผลการทดลองสำหรับการทดลองระยะสั้น	85
รูปที่ 5.2 อัตราส่วนจำนวนหลุมที่ดักจับอนุภาคภายในหลุมสามเหลี่ยมที่อัตราการไหล 350 mL/hr ในการทดลองระยะสั้นกรณี (ก) อนุภาคเดี่ยว, (ข) อนุภาคคู่, (ค) สามอนุภาคขึ้นไป, (ง) ไม่มีอนุภาค ..	89
รูปที่ 5.3 อัตราส่วนจำนวนหลุมที่ดักจับอนุภาคภายในหลุมสามเหลี่ยมที่อัตราการไหล 500 mL/hr ในการทดลองระยะสั้นกรณี (ก) อนุภาคเดี่ยว (ข) อนุภาคคู่ (ค) สามอนุภาคขึ้นไป (ง) ไม่มีอนุภาค	90

รูปที่ 5.4 อัตราส่วนจำนวนหลุมดักจับอนุภาคเดี่ยว คู่ และสามขึ้นไปที่อัตราการไหล 350 ml/hr ใน การทดลองระยะสั้นกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน.. 91

รูปที่ 5.5 อัตราส่วนจำนวนหลุมดักจับอนุภาคเดี่ยว คู่ และสามขึ้นไปที่อัตราการไหล 500 ml/hr ใน การทดลองระยะสั้นกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน 92

รูปที่ 5.6 พื้นที่เก็บผลการทดลองในกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, 93

รูปที่ 5.7 อัตราส่วนจำนวนหลุมที่ดักจับอนุภาคภายในหลุมสามเหลี่ยมที่อัตราการไหล 350 ml/hr ใน การทดลองระยะยาวกรณี (ก) อนุภาคเดี่ยว, (ข) อนุภาคคู่, (ค) สามอนุภาคขึ้นไป, (ง) ไม่มีอนุภาค. 97

รูปที่ 5.8 อัตราส่วนจำนวนหลุมที่ดักจับอนุภาคภายในหลุมสามเหลี่ยมที่อัตราการไหล 500 ml/hr ใน การทดลองระยะยาวกรณี (ก) อนุภาคเดี่ยว, (ข) อนุภาคคู่, (ค) สามอนุภาคขึ้นไป, (ง) ไม่มีอนุภาค. 98

รูปที่ 5.9 อัตราส่วนจำนวนหลุมดักจับอนุภาคเดี่ยว คู่ และสามขึ้นไปที่อัตราการไหล 350 ml/hr ใน การทดลองระยะยาวกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน 99

รูปที่ 5.10 อัตราส่วนจำนวนหลุมดักจับอนุภาคเดี่ยว คู่ และสามขึ้นไปที่อัตราการไหล 500 ml/hr ใน การทดลองระยะยาวกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน 100

รูปที่ 6.1 แบบอุปกรณ์จุลภาคแบบใหม่ที่อาจจะสร้างการไหลเอียงตัวไปกับทิศทางการเรียงตัวของ หลุมจุลภาคเมื่อใช้ท่อทางออกต่างกันสำหรับ (ก) ดักจับอนุภาคเดี่ยว, (ข) ปล่อยอนุภาคออก..... 106

ภาคผนวกรูปที่ 1 ขนาดหลุมจริงสามเหลี่ยมจุลภาคหลังการขึ้นรูปในกรณีหลุม (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน 110

ภาคผนวกรูปที่ 2 การดักจับอนุภาคระยะสั้นภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าที่อัตราไหล 350 ml/hr 111

ภาคผนวกรูปที่ 3 การดักจับอนุภาคระยะสั้นภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมแหลมที่อัตราไหล 350 ml/hr 112

ภาคผนวกรูปที่ 4 การดักจับอนุภาคระยะสั้นภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมป้านที่อัตราไหล 350 ml/hr 113

ภาคผนวกรูปที่ 5 การดักจับอนุภาคระยะสั้นภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าที่อัตราไหล 500 ml/hr 114

ภาคผนวกรูปที่ 6 การดักจับอนุภาคระยะสั้นภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมแหลมที่อัตราไหล 500 ml/hr	115
ภาคผนวกรูปที่ 7 การดักจับอนุภาคระยะสั้นภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมป้านที่อัตราไหล 500 ml/hr	116
ภาคผนวกรูปที่ 8 การดักจับอนุภาคระยะยาวภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าที่อัตราไหล 350 ml/hr	117
ภาคผนวกรูปที่ 9 การดักจับอนุภาคระยะยาวภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมแหลมที่อัตราไหล 350 ml/hr	118
ภาคผนวกรูปที่ 10 การดักจับอนุภาคระยะยาวภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมป้านที่อัตราไหล 350 ml/hr	119
ภาคผนวกรูปที่ 11 การดักจับอนุภาคระยะยาวภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าที่อัตราไหล 500 ml/hr	120
ภาคผนวกรูปที่ 12 การดักจับอนุภาคระยะยาวภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมแหลมที่อัตราไหล 500 ml/hr	121
ภาคผนวกรูปที่ 13 การดักจับอนุภาคระยะยาวภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมป้านที่อัตราไหล 500 ml/hr	122
ภาคผนวกรูปที่ 14 อุปกรณ์ของไหลจุลภาค	123
ภาคผนวกรูปที่ 15 กล้องจุลทรรศน์	123
ภาคผนวกรูปที่ 16 หลอดฉีดยาเชื่อมต่อกับท่อซิลิโคนและคอนเนคเตอร์	124
ภาคผนวกรูปที่ 17 อุปกรณ์กรองเศษขนาดเล็ก	124
ภาคผนวกรูปที่ 18 หลอดทดลอง	125
ภาคผนวกรูปที่ 19 คอมพิวเตอร์	125
ภาคผนวกรูปที่ 20 ปืนหลอดฉีดยา	126
ภาคผนวกรูปที่ 21 แท่นคืบหลอดทดลอง	126
ภาคผนวกรูปที่ 22 ไมโครปิเปต	127
ภาคผนวกรูปที่ 23 สารละลาย PBS	127

ภาคผนวกรูปที่ 24 สารลดแรงตึงผิว.....	128
ภาคผนวกรูปที่ 25 พอลิเมอร์ PDMS (ใหญ่) และ สารเร่งปฏิกิริยาการแข็งตัวของพอลิเมอร์ (เล็ก).....	129
ภาคผนวกรูปที่ 26 ตู้สร้างสภาวะศูนย์อากาศ	129
ภาคผนวกรูปที่ 27 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล	130
ภาคผนวกรูปที่ 28 เครื่องสร้างความร้อน.....	130
ภาคผนวกรูปที่ 29 อุปกรณ์เจาะรู.....	131
ภาคผนวกรูปที่ 30 แก้วพลาสติกและอุปกรณ์สำหรับคนพอลิเมอร์.....	131
ภาคผนวกรูปที่ 31 แม่พิมพ์.....	132
ภาคผนวกรูปที่ 32 การเปรียบเทียบอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของอนุภาคกับแรงการเคลื่อนที่ของของไหล.....	136
ภาคผนวกรูปที่ 33 สมการและตัวแปรสำหรับการคำนวณแรง.....	136
ภาคผนวกรูปที่ 34 ผลเปรียบเทียบอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของอนุภาคกับแรงการเคลื่อนที่ของของไหลที่อัตราการไหล 35 ml/hr.....	137
ภาคผนวกรูปที่ 35 ผลเปรียบเทียบอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของอนุภาคกับแรงการเคลื่อนที่ของของไหลที่อัตราการไหล 350 ml/hr.....	137
ภาคผนวกรูปที่ 36 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลการกระจายความเร็วของของไหลภายในโดเมน	140
ภาคผนวกรูปที่ 37 ผลการกระจายความเร็วของของไหลภายในช่องการไหลสำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน.....	141
ภาคผนวกรูปที่ 38 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 10 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z.....	142
ภาคผนวกรูปที่ 39 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 50 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z.....	143

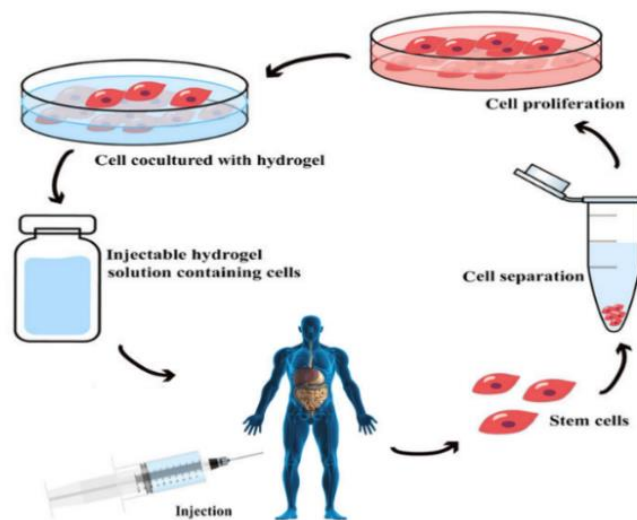
ภาคผนวกรูปที่ 58 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 300 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z.....	162
ภาคผนวกรูปที่ 59 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 10 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z.....	163
ภาคผนวกรูปที่ 60 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 25 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z.....	164
ภาคผนวกรูปที่ 61 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 50 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z.....	165
ภาคผนวกรูปที่ 62 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 75 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z.....	166
ภาคผนวกรูปที่ 63 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 100 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z.....	167
ภาคผนวกรูปที่ 64 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 125 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z.....	168
ภาคผนวกรูปที่ 65 กราฟขนาดการกระจายตัวการหมุนภายในหลุมเฉลี่ยเทียบกับพื้นที่ผิวระนาบความลึกต่างๆ ไม่มีอนุภาคภายในหลุม สำหรับกรณี (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z.....	171
ภาคผนวกรูปที่ 66 กราฟขนาดการกระจายตัวการหมุนภายในหลุมเฉลี่ยเทียบกับพื้นที่ผิวระนาบความลึกต่างๆ มีอนุภาคภายในหลุม สำหรับกรณี (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z	172

บทที่ 1

บทนำ

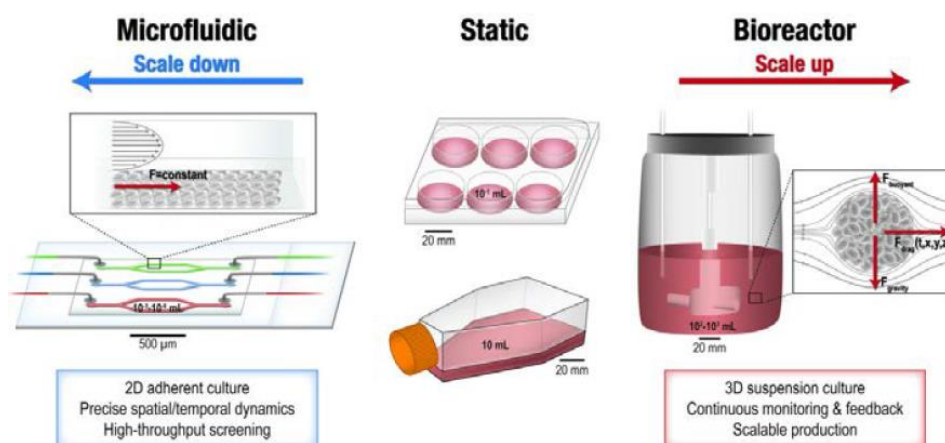
1.1 ที่มาและความสำคัญ

แนวทางการรักษาโรคโดยการปลูกถ่ายอวัยวะนับแต่อดีตถึงปัจจุบัน ได้ถูกพัฒนา ค้นคว้า และ วิจัยมาอย่างต่อเนื่องบนพื้นฐานความรู้สมัยใหม่เชื่อมโยงวิทยาการมากมาย เช่น ชีววิทยาระดับ เซลล์ เคมี ฟิสิกส์ วัสดุศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และแพทยศาสตร์ เพื่อตอบสนองความต้องการรักษา ของผู้ป่วยให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในทุกวัน อย่างไรก็ตามพบว่าปัญหาในการรักษาก็ยังคงมีอยู่จาก ความไม่สมดุลระหว่าง จำนวนเพิ่มขึ้นของผู้ป่วยที่รอคอยการปลูกถ่ายอวัยวะและจำนวนของอวัยวะที่ ได้รับบริจาค จากข้อมูลในปี ค.ศ. 2010 สมาคมโรคหัวใจแห่งสหรัฐอเมริกา (American Heart Association) พบว่าการเสียชีวิตของคนอเมริกันว่า 1 ใน 9 เกิดจากสภาวะหัวใจล้มเหลว (Heart failure) โดยพบว่า คนอเมริกันต้องเผชิญกับโรคเส้นเลือดหัวใจอุดตันทุกประมาณ 34 วินาที และใน ทุก 1 นาที 23 วินาที จะมีผู้เสียชีวิตอย่างน้อย 1 รายด้วยโรคดังกล่าว จากการศึกษายังพบว่าการ เสียชีวิตผู้ป่วยกว่าร้อยละ 70 เกิดจากความขาดแคลนของจำนวนอวัยวะที่รอรับบริจาค [1] เวช ศาสตร์ฟื้นฟูสภาวะเสื่อม (Regenerative medicine) [2] เป็นแนวโน้มสำคัญที่อาจจะช่วยแก้ปัญหา ดังกล่าว โดยเริ่มจากการนำเซลล์ต้นกำเนิด (Stem cells) ของผู้ป่วย หรือจากผู้บริจาคสายพันธุ์ เดียวกันมาทำการเพาะเลี้ยงจนกลายเป็นเซลล์เป้าหมาย จากนั้นปลูกถ่ายเซลล์เข้าสู่ร่างกายผู้ป่วยเพื่อ ทดแทนเซลล์เดิมดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนโดยทั่วไปของวิศวกรรมเนื้อเยื่อ

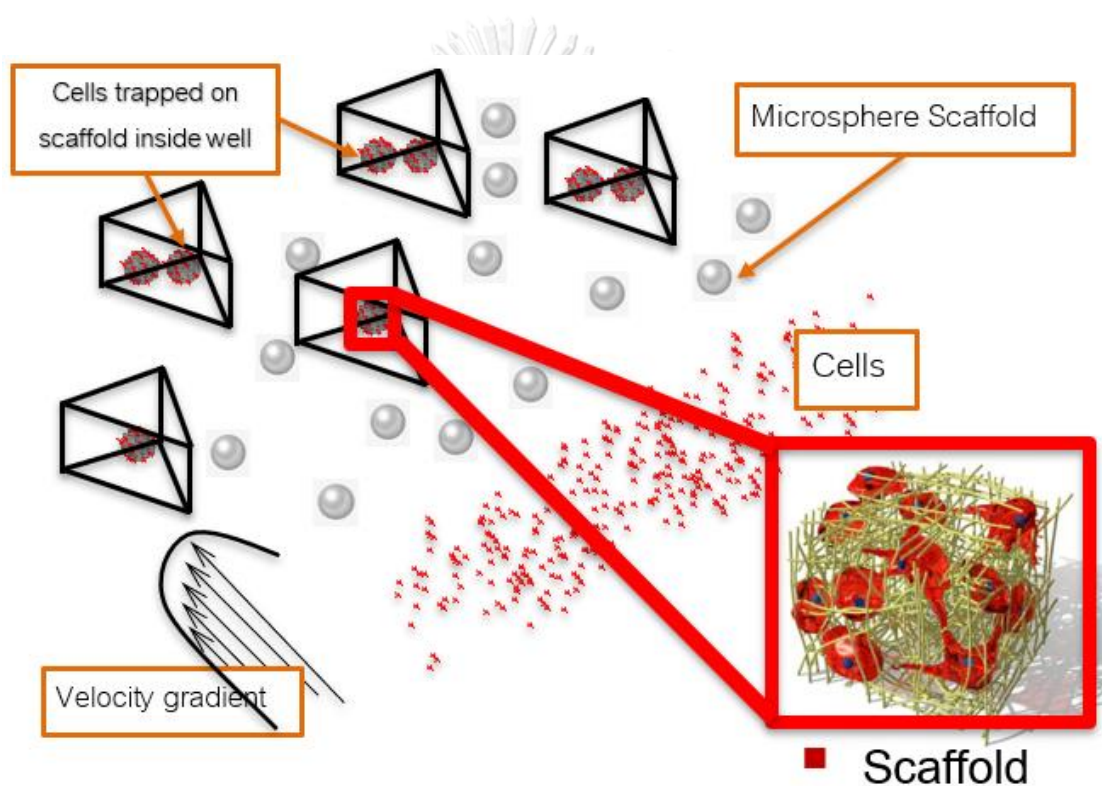
การเพาะเลี้ยงเซลล์นับว่าเป็นเรื่องละเอียดอ่อนและมีความสำคัญในวงการวิศวกรรมทางการแพทย์และสาขาทางชีววิทยาเกี่ยวข้อง เนื่องจากการเพาะเลี้ยงเซลล์จำเป็นจะต้องควบคุมปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความสะอาด ความปลอดภัย ความเข้ากันได้ในระดับเซลล์ รวมไปถึงจรรยาบรรณควบคุมการใช้สัตว์ทดลอง เป็นต้น โดยการเพาะเลี้ยงเซลล์แบ่งออกเป็นสองแบบ คือ 2 มิติ และ 3 มิติ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการศึกษา การเลี้ยงเซลล์แบบ 2 มิติมักนิยมเพาะเลี้ยงเซลล์ที่อยู่ในร่างกายมนุษย์แบบแนบชิดติดกัน มีทั้งทำการการเพาะเลี้ยงเซลล์ผ่านระบบของไหลจุลภาคและเพาะเลี้ยงภายในห้องปฏิบัติการดังรูปที่ 1.2 แต่หากจะศึกษากลไกการเจริญเติบโตอย่างละเอียดแล้ว การเลี้ยงแบบสามมิติดูเหมือนจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสม เนื่องจากการเลี้ยงลักษณะนี้มีสภาวะการเจริญเติบโตใกล้เคียงกับเซลล์ในร่างกายมนุษย์ อีกทั้งยังสามารถศึกษาลักษณะการเกิดของเนื้อเยื่อใหม่ (Cellular differentiation) ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเซลล์ที่เลี้ยงในระบบ 3 มิติมีลักษณะที่เกาะกลุ่มของเซลล์ต่อเซลล์เชิงชีวภาพ (Physiologic cell to cell contact) การมีปฏิริยาต่อโครงสร้างภายนอก (Extra cellular matrix; ECM) และการตอบสนองต่อสารบางอย่าง (Drug response) ที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับการเลี้ยงเซลล์แบบ 2 มิติ



รูปที่ 1.2 การเลี้ยงเซลล์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพเทียบกับการเลี้ยงด้วยระบบของไหลจุลภาค [3]

เนื่องจากการเลี้ยงเซลล์แบบ 3 มิติจำเป็นจะต้องมีโครงสร้างยึดเกาะของเซลล์หรือโครงเลี้ยงเซลล์ (Scaffold) ดังรูปที่ 1.3 ซึ่งเป็นวัสดุชีวภาพที่ผลิตจากชีววัสดุที่มีลักษณะและคุณสมบัติเหมาะสมต่อการชักนำให้เกิดการเจริญเติบโตของเซลล์ มีความสามารถในการเข้ากันและย่อยสลายได้

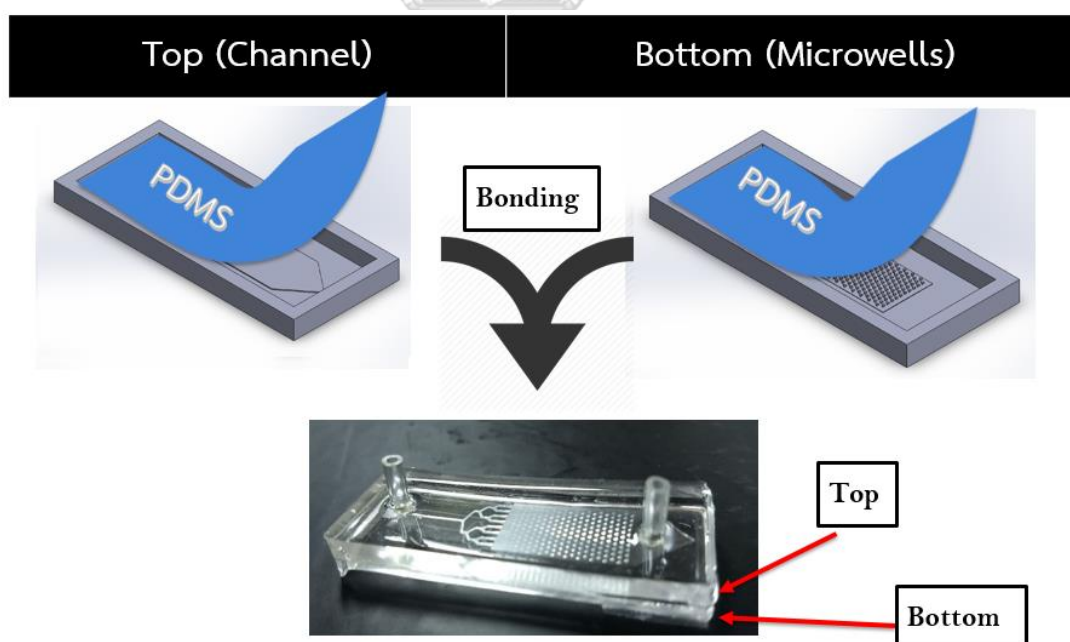
ในร่างกายมนุษย์ (Biocompatibility) โดยทำหน้าที่เป็นจุดศูนย์กลางให้เซลล์ต้นกำเนิดมายึดเกาะ จนแปรสภาพเซลล์เป็นเนื้อเยื่อใหม่ (Cellular differentiation) อย่างไรก็ตามการเพาะเลี้ยงเซลล์นั้น จะมีความซับซ้อน หากมีเซลล์มากมายรวมกันเป็นกลุ่มก้อนในอุปกรณ์เพาะเลี้ยงเซลล์ ดังนั้น การออกแบบการเพาะเลี้ยงเซลล์ที่สามารถจำกัดขอบเขตความหนาแน่นของประชากรเซลล์ต่อพื้นที่หนึ่ง หน่วย หรือ สามารถควบคุมความหนาแน่นและความสม่ำเสมอ (Uniformity) ของเซลล์ต่อพื้นที่ได้ จึงเป็นตัวแปรอย่างหนึ่งที่เพิ่มประสิทธิภาพในการศึกษา เช่น การดักจับโครงเลี้ยงเซลล์ภายในหลุม ก่อนจากนั้นศึกษารูปแบบการเลี้ยงเซลล์ในหลุมดังรูปที่ 1.3ก เป็นต้น



รูปที่ 1.3 รูปแบบการยึดเกาะของเซลล์ต้นกำเนิดบนโครงเลี้ยงเซลล์ภายในหลุมที่มีเซลล์ยึดเกาะอยู่

การเพาะเลี้ยงเซลล์ในระบบของไหลจุลภาค (Microfluidic system) เป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เพื่อตอบสนองจุดประสงค์ดังกล่าว เนื่องจากเป็นระบบของไหลที่มีสภาวะแวดล้อมขนาดเล็ก (Microenvironment) สามารถตีกรอบพื้นที่การศึกษการเพาะเลี้ยงเซลล์ได้เป็นอย่างดีนอกจากนั้น ยังเป็นตัวกลางส่งผ่านและกักเก็บสารละลายบัฟเฟอร์และเซลล์ไปยังเป้าหมายของระบบได้ ใช้งานง่าย

ทราบผลรวดเร็ว ใช้ปริมาณตัวอย่างทดสอบน้อย มากไปกว่านั้นยังสามารถศึกษาผลของแรงเฉือนที่เกิดจากการไหลของอาหารเลี้ยงเซลล์ที่กระทำต่อเซลล์ได้อีกด้วย มีความสอดคล้องกับระบบปฏิบัติการบนชิพหรืออุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์และทางการแพทย์ที่ถูกย่อขนาดให้เล็กลงและสะดวกต่อการพกพา แต่ยังคงไว้ซึ่งความแม่นยำและรวดเร็วในการวิเคราะห์ผล โดยหนึ่งในโครงสร้างที่ถูกใช้งานมากที่สุดในเทคโนโลยีระบบของไหลจุลภาคคือช่องทางไหลจุลภาค ซึ่งเป็นช่องทางไหลขนาดเล็กสำหรับของเหลวหรือสารละลายในระดับไมโครลิตร โดยมีช่องทางไหลจุลภาคเป็นส่วนเชื่อมต่อให้ทั่วถึงกัน ทั้งนี้การสร้างช่องทางไหลจุลภาคนิยมใช้วัสดุพอลิเมอร์ที่เรียกว่า PDMS (Polydimethylsiloxane) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยไดเมทิลซิลิโคนออกไซด์เป็นหน่วยมอโนเมอร์ มีซิลิโคนเป็นฐาน ไม่มีสี มีลักษณะขุ่นหนืด ไม่ละลายในน้ำ ไม่เป็นพิษ และติดไฟยาก โดยจะถูกนำมาขึ้นเป็นชิ้นงานโครงสร้างช่องทางเดินขนาดเล็กที่เกิดจากการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์จากนั้นการปรับผิวชิ้นงานด้วย พลาสมาของออกซิเจนและนำไปประกบติดกับแผ่นซิลิโคนหรือ PDMS อีกด้าน จะก่อให้เกิดการเชื่อมติดกันอย่างถาวรและป้องกันสารละลายรั่วออกจากอุปกรณ์โดยวิธีการสร้างระบบของไหลจุลภาคแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 อุปกรณ์ห้องปฏิบัติการบนชิพแสดงรูปแบบการสร้างช่องทางไหลขนาดจุลภาคจากการประสานกันของชิ้นงาน

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นเพื่อที่จะทำการศึกษาคำเฉพาะเลี้ยงเซลล์ให้มีประสิทธิภาพและความสะดวกต่อการสังเกตพฤติกรรมของเซลล์ จึงต้องเริ่มด้วยการศึกษาคำดักจับโครมโซ่เลี้ยงเซลล์เดี่ยวให้มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ การดักจับอนุภาคในลักษณะนี้จะส่งผลให้การศึกษาที่มีการตีกรอบพื้นที่ศึกษา และวิเคราะห์ผล เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ในอดีตที่ผ่านมาวิธีสำหรับการดักเซลล์หลากหลายรูปแบบ เช่น เทคนิคการดักเซลล์แบบไม่อาศัยการสัมผัสพื้นผิว (Contact-less) [4] ได้แก่ การดักเซลล์โดยอาศัยแรงจากแม่เหล็กด้วยแม่เหล็กขนาดเล็กที่มีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน [5] โดยการใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต่างกันของอิเล็กโทรดดึงดูดเซลล์ที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กเข้ามาในบริเวณที่สนใจได้ อย่างไรก็ตามวิธีการดักจับแบบนี้อาจส่งผลกระทบต่อระบบชีววิทยาของเซลล์เนื่องจากมีแรงภายนอกมากระทำ

ในอีกรูปแบบหนึ่งจะเป็นวิธีการที่ไม่ใช้แรงภายนอก เช่น การดักเซลล์ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว [6] โดยของเหลวดังกล่าวมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับเลือดของมนุษย์และเปรียบเสมือนตัวกลางในการนำพาเซลล์เคลื่อนตัวผ่านช่องทางเดินที่ถูกออกแบบโดยมีรูขนาดเล็กทำหน้าที่เป็นเป้าหมายในการดักเซลล์ และยังมีกลไกการปลดปล่อยเซลล์โดยใช้เลเซอร์ให้ความร้อนไปยังแผ่นอลูมิเนียมเพื่อใช้ในการสร้างฟองอากาศในระบบเพื่อดันเซลล์หลุดออกจากอุปกรณ์ไปในที่สุด อีกทั้งยังมีการดักจับเซลล์บนหลุมขนาดเล็กรูปทรงโคนตัดปลาย [7] ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุดกว่าร้อยละ 90 อีกหนึ่งงานวิจัยที่น่าสนใจคือ การดักจับอนุภาคเดี่ยวในหลุมจุลภาคในรูปทรงที่แตกต่างกัน [8] คือ สามเหลี่ยม วงกลม รูปกรวย ขั้วแหลมตัด และสี่เหลี่ยม แล้วทำการศึกษาเส้นการไหลภายในหลุมของรูปทรงต่างกัน พบว่าหลุมทรงสามเหลี่ยมมีเส้นการไหลภายในหลุมแบบหมุนวน (Recirculation flow) ได้มากที่สุด ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการผลักดันเซลล์ลงไปหลุม วิธีการเหล่านี้จะไม่ทำให้คุณสมบัติทางชีววิทยาของเซลล์เปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งยังเป็นวิธีที่มีขั้นตอนการทำงานไม่ซับซ้อนสะดวกต่อการออกแบบระบบ และการผลิตขึ้นรูป ทั้งนี้มีอีกหลายวิธีสำหรับการดักเซลล์ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว [9, 10] ซึ่งจะกล่าวอย่างละเอียดในบทที่ 2 ต่อไป

ถึงแม้ว่าการดักจับอนุภาคในหลุมรูปทรงสามเหลี่ยมสามารถควบคุมความหนาแน่นของอนุภาคโครงสร้างได้ แต่การศึกษาคำดักจับอนุภาคภายในหลุมดังกล่าวที่ผ่านมายังมีข้อมูลเกี่ยวกับอิทธิพลที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคน้อยมาก เช่น กลไกอื่นที่เกิดขึ้นภายในหลุมรูปร่างหลุมสามเหลี่ยมที่มีมุมภายในแตกต่างกัน เป็นต้น โดยรูปร่างหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าสามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดกลไกการไหลภายในหลุมต่างกัน เนื่องจากอิทธิพลของรูปร่างเหตุผลดังกล่าวจึงส่งผลโดยตรงต่อรูปแบบการดักจับอนุภาค ดังนั้นจึง

จำเป็นต้องศึกษากลไกการไหลที่เกิดขึ้นในหลุมสามเหลี่ยมรูปแบบต่างกัน ผ่านโปรแกรมการจำลองการไหลเพื่อให้เข้าใจโครงสร้างการไหลที่เกิดขึ้นอย่างละเอียดก่อนทำการออกแบบและผลิตชิ้นงานเพื่อการทดลองเปรียบเทียบต่อไป

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

- ศึกษากลไกการไหลของของไหลที่กระทำต่อหลุมรูปทรงต่างกัน ผ่านโปรแกรมจำลองการไหล

- ศึกษาการออกแบบและขึ้นรูปชิ้นงานอุปกรณ์การไหลจุลภาคขนาดเล็ก เพื่อที่ทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองการไหล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การจำลองการไหล

กลไกการไหลของของไหลแบบ 3 มิติ ถูกศึกษาผ่านโปรแกรมการไหลสำเร็จรูปสำหรับหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน

1.3.2 การออกแบบ

ช่องทางเข้าของของไหลจะถูกแบ่งออกเป็นท่อย่อย 8 ช่องทางก่อนที่จะเข้าช่องการไหลหลัก และหลุมสามเหลี่ยมสามรูปแบบ คือสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน จะถูกวางตัวเป็นลักษณะฟันปลาสลับกันไปมา โดยมีความสูง 520 μm ความยาวฐาน 600, 400 และ 800 μm ตามลำดับ

1.3.3 การขึ้นรูป

ชิ้นงานทดสอบถูกขึ้นรูปโดยใช้วัสดุพอลิเมอร์ PDMS โดยเทคนิคการขึ้นรูปซอฟลิโทกราฟี (Soft lithography) และแม่พิมพ์ถูกขึ้นรูปโดยใช้การควบคุมเชิงตัวเลขด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control ; CNC)

1.3.4 การทดลอง

หลอดฉีดยาขนาด 10 - 20 ml ถูกใช้เพื่อควบคุมการไหลและใช้อุณหภูมิเม็ดพลาสติกขนาด 150 μm ที่ความเข้มข้น 1,200 อนุภาค/ml สิ้นสุดการทดลองเมื่อครบ 30 วินาทีสำหรับการทดลองระยะสั้นและ 2 นาทีสำหรับการทดลองระยะยาว จากนั้นทำซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งสำหรับหนึ่งเงื่อนไขการทดลอง โดยแต่ละเงื่อนไขมีอัตราการไหลที่ใช้ทดสอบอยู่ 2 ค่าคือ 350 ml/hr และ 500 ml/hr

1.4 ระเบียบขั้นตอนของงานวิจัย

- ศึกษากระบวนการดักจับอนุภาคด้วยอุปกรณ์และเทคนิคในลักษณะต่างๆ จากบทความที่เกี่ยวข้องจากนั้นทำการออกแบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น เพื่อที่จะทราบถึงปัญหา ข้อจำกัด บางประการ รวมไปถึงแนวทางการแก้ไขในการทดลองต่อไปในอนาคต ซึ่งทำการทดลองโดยใช้อุณหภูมิพลาสติกขนาดเล็กเป็นตัวแทนโครงสร้างยึดเกาะของเซลล์
- ผลิตอุปกรณ์และศึกษาการทดลองเบื้องต้นเพื่อแก้ไขปัญหาวางเกิดการทดลองในอนาคต
- สร้างแบบจำลองการไหลในคอมพิวเตอร์ เพื่อศึกษาตัวแปรที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดักจับอนุภาค โดย อัตราการไหล ความสูงของผนังของท่อการไหลหลัก การไหลภายในหลุมและช่อง การไหลรูปแบบต่างกันจะเป็นตัวแปรที่จะถูกนำมาพิจารณาในการจำลองด้วย
- นำข้อมูลตัวแปรข้างต้นมาใช้ในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ใหม่ ทำการทดลองดักจับอนุภาคพลาสติกขนาด 150 μm จากนั้นบันทึก และเปรียบเทียบกับผลจำลองการไหล
- สรุปงานวิจัย อภิปรายผล และจัดทำรูปเล่ม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ความเข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการดักจับอนุภาค เช่น อัตราการไหล และ กลไกการไหลที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลจุลภาค และ หลุมสามเหลี่ยม เป็นต้น จนนำมาสู่ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคภายในหลุมขนาดจุลภาคให้มีความสม่ำเสมอสะดวกต่อการวิเคราะห์ผล ผ่านอุปกรณ์ที่สะดวกต่อการใช้งาน โครงสร้างไม่ซับซ้อน มีต้นทุนต่ำ และนำองค์ความรู้ไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาอุปกรณ์ในงานที่เกี่ยวข้องอื่นต่อไปในอนาคตได้

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

ระบบของไหลจุลภาค ถูกนำมาใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับเซลล์ของสิ่งมีชีวิตอย่างแพร่หลาย ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากมีขนาดอุปกรณ์ที่ใกล้เคียงกับเซลล์ ส่งผลให้ควบคุมปัจจัยการศึกษาในระบบจุลภาคได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังมีจุดเด่นมากมายเมื่อเปรียบเทียบกับทำการทดลองในระบบใหญ่หรือในห้องปฏิบัติการ เช่น ทราบผลรวดเร็ว ใช้ปริมาณตัวอย่างทดสอบน้อยแต่ทั้งนี้ยังคงไว้ซึ่งประสิทธิภาพที่แม่นยำ

ระบบของไหลจุลภาคถูกใช้ประยุกต์กับงานหลายประเภท เช่น ใช้เพื่อการคัดแยกอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันออกจากกันโดยอาศัยแรงเฉือน และแรงหมุนวนภายในห้องการไหลขนาดเล็ก นอกจากนี้ อุปกรณ์ชนิดนี้ยังสามารถใช้ในงานผสมและเจือจางสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างกัน ก่อนจะนำไปใช้งานกับอุปกรณ์อื่นได้

โดยในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดักจับอนุภาครูปแบบต่างๆที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งสามารถจำแนกเทคนิคการดักจับอนุภาคได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆคือ เทคนิคการดักจับโดยอาศัยแรงภายนอก และเทคนิคการดักจับโดยไม่อาศัยแรงภายนอก รวมไปถึงการประยุกต์การดักจับด้วยอุปกรณ์ที่ใช้หลุมจุลภาคภายใต้เงื่อนไขต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

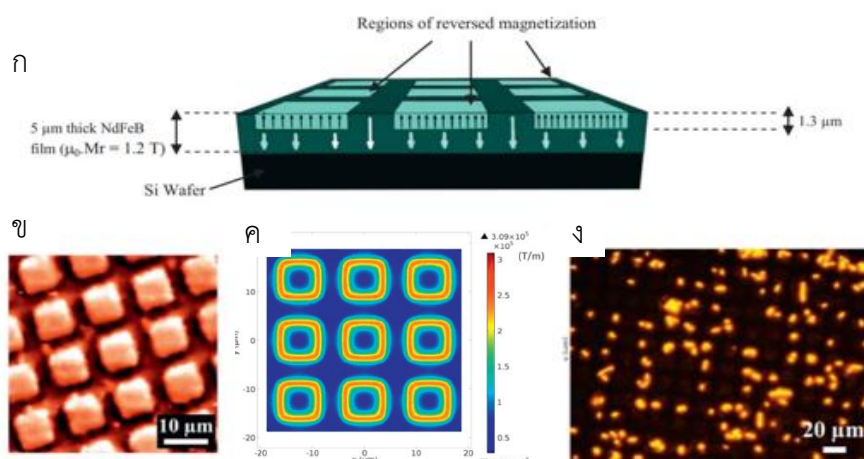
2.1 การดักจับอนุภาคโดยอาศัยแรงภายนอก

การดักจับเซลล์ด้วยวิธีนี้เป็นการใช้แรงจากภายนอกระบบ เช่น แรงแม่เหล็ก แรงไฟฟ้า เป็นต้น เข้ามามีส่วนร่วมในการดักจับเซลล์ ซึ่งเป็นการดักจับในลักษณะจำเพาะกับเซลล์ เช่น การดักจับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรีย เม็ดเลือดแดงเหล่านี้จะมีความเป็นแม่เหล็กสูงกว่าปกติ ดังนั้นจึงดูดติดกับเป้าหมายได้เมื่อออกแบบระบบให้มีแรงแม่เหล็กไปกระทำ หรือการใช้แรงฟ้าในการดักจับเซลล์ที่มีคุณสมบัติเหนียวนาต่อแรงไฟฟ้า ให้ยึดติดกันเพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ อย่างไรก็ตาม แรงเหล่านี้ซึ่งเป็นแรงภายนอกอาจจะไปส่งผลให้เซลล์ที่ถูกดักจับนั้นเกิดความเสียหายหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางชีววิทยาได้ ดังนั้นการออกแบบระบบ และเงื่อนไขในการทดลองจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่นำมาพิจารณา วิธีการดักจับเซลล์ที่ใช้แรงภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้องนี้สามารถจำแนกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆคือ แรงจากแม่เหล็ก และแรงจากไฟฟ้า

2.1.1 การดักจับอนุภาคด้วยแม่เหล็ก (Magnetic entrapment)

ในปี 2004 Winkleman et al. [10] ได้เสนอวิธีการใช้แม่เหล็กถาวรมาในการดักจับอนุภาคเม็ดพลาสติกจุลภาคและเซลล์ (Mouse fibroblast (NIH-3T3), yeast (*Saccharomyces cerevisiae*), and algae (*Chlamydomonas reinhardtii*) ซึ่งการดักจับเซลล์นี้จะใช้การหยดของสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบมีคุณสมบัติเป็นพาราแมกเนติก สำหรับดักจับอนุภาคที่มีคุณสมบัติเป็นไดอะแมกเนติกด้วย โดยสารละลายจะถูกหยดไว้ระหว่างแม่เหล็กสองอันที่มีสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้าม และพบว่าการเคลื่อนตัวของแม่เหล็กนั้นก็ส่งผลให้เกิดขนาดและแรงของแม่เหล็กที่แตกต่างกันออกไป จากการทดลองนั้นพบว่าการเคลื่อนแม่เหล็กให้มีระยะห่างกัน 50 μm ก็ยังคงสามารถดักเซลล์ได้ และเซลล์ขนาดเล็กที่สุดที่สามารถดักจับได้คือประมาณ 2.5 μm จากการทดลองพบว่าสารละลายประเภทนี้สามารถเข้ากันได้ดีกับเซลล์และไม่ส่งผลอันตรายต่อเซลล์ที่ดักได้

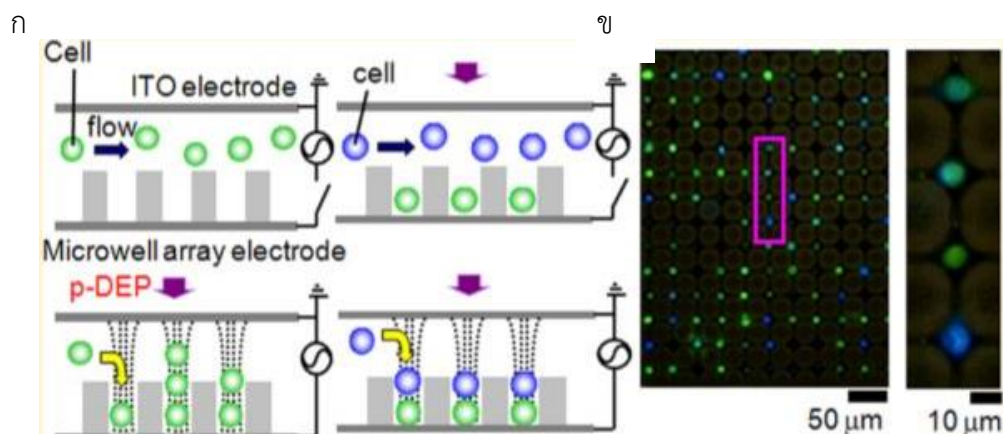
ต่อมาในปี 2015 Pivetal et al. [5] เสนอวิธีการดักจับเซลล์ในรูปแบบช่องตารางสองมิติ สำหรับการดักเซลล์แบคทีเรีย *E. coli* อาศัยกลไกซึ่งเกิดจากแม่เหล็กขนาดเล็กที่ถูกบรรจุบนแผ่นฟิล์มบางที่ถูกสร้างลวดลายเป็นช่องตารางเล็กขนาด $7.5 \times 7.5 \mu\text{m}^2$ ดังรูปที่ 2.1ก-ข ทำหน้าที่เป็นเป้าหมายจับเคลื่อนให้เซลล์เคลื่อนที่ลงไปในตัวนั้น ผ่านการจำลองสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 2.1ค จากนั้นทำการย้อมสีเซลล์โดยใช้ ethidium bromide เพื่อใช้ในการศึกษาชีววิทยาของเซลล์ ข้อดีคือมีลักษณะจำเพาะสูง แต่เซลล์เดี่ยวที่ดักจับได้เป็นลักษณะการดักจับแบบสุ่ม กล่าวคือตำแหน่งที่ดักจับขึ้นอยู่กับจังหวะที่เซลล์เคลื่อนที่ไปบริเวณนั้น ส่งผลให้เซลล์ความหนาแน่นของเซลล์อาจรวมตัวก่อนเป็นกลุ่มก้อนณ.บริเวณใดบริเวณหนึ่งดังรูปที่ 2.1ง



รูปที่ 2.1 การเรียงตัวของแม่เหล็กขนาดจุลภาค (ก) ภาพรวมตำแหน่งการวางตัวของวัสดุในงาน, (ข) ภาพกำลังขยายการเรียงตัวของแม่เหล็กจุลภาค ขนาด $7.5 \times 7.5 \mu\text{m}^2$ ถูกสร้างโดยวิธี Thermo-Magnetically Patterned (TMP), (ค) การจำลองขนาดของเกรเดียนสนามแม่เหล็ก ($\partial B/\partial z$), (ง) ภาพกำลังขยายการดักจับเซลล์แบคทีเรีย E. Coli หลังจากการย้อมสี [5]

2.1.2 การดักจับอนุภาคด้วยไฟฟ้า (Electric entrapment)

ในปี 2014 Yoshimura et al. [11] ได้เสนอวิธีการดักจับเซลล์ด้วยอุปกรณ์ที่มีรูปร่างเป็น หลุมตารางขนาดเล็กกว่า 10,000 หลุม อุปกรณ์มีอิเล็กโทรดอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) เป็น ส่วนประกอบและยังเป็นตำแหน่งฐานที่ใช้ในการขึ้นรูปของชิ้นงานด้วย ดังรูปที่ 2.2ก มีกลไกดักจับ เซลล์โดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าแบบโพซิทีฟ-ไดอิเล็กโตรโฟรีติก (p-DEP) เป็นตัวดักจับเซลล์ พบว่า เซลล์มะเร็งของหนูที่ถูกย้อมด้วยสีเขียวถูกดักจับภายในแค่ 1 วินาที หลังจากปล่อยกระแสไฟฟ้าความ ต่างศักย์ 10 โวลต์ (10Vpp) เข้าสู่แท่งอิเล็กโทรดอินเดียมทินออกไซด์ หลังจากนั้นทำการล้างระบบ ด้วยสารละลายซูโคสเพื่อกำจัดเซลล์ที่ไม่ถูกดักในแต่ยังคงติดอยู่ในช่องทางเดินออก โดยที่เซลล์ที่ถูก ดักยังคงอยู่ในตำแหน่งเดิม จากนั้นได้ทำการให้ความต่างศักย์อีกครั้งส่งผลให้หลุมที่ดักจับเซลล์ไว้ มากกว่าหนึ่งเซลล์ก่อนหน้านี้เหลือแค่เซลล์เดี่ยวต่อหลุม จากนั้นทำซ้ำแต่ครั้งนี้เป็นการย้อมเซลล์เป็นสีน้ำ เงินแทนสีเขียว พบว่า สามารถดักจับเซลล์สีน้ำเงินในลักษณะทับซ้อนเซลล์สีเขียวก่อนหน้านี้ได้เป็นสอง เซลล์ติดกันกว่า 50% ภายในระยะเวลาเพียง 1 นาที ดังรูปที่ 2.2ข โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อเซลล์



รูปที่ 2.2 ภาพรวมการดักเซลล์จับโดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าแบบโพซิทีฟ-ไดอิเล็กโตรโฟรีติก (p-DEP)
 (ก) ภาพแสดงกลไกการดักจับเซลล์เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์ 10 โวลต์เข้าสู่ระบบ,
 (ข) ภาพขยายตำแหน่งการดักจับเซลล์แบบซ้อนกัน [11]

2.2 การดักจับอนุภาคโดยไม่อาศัยแรงภายนอก

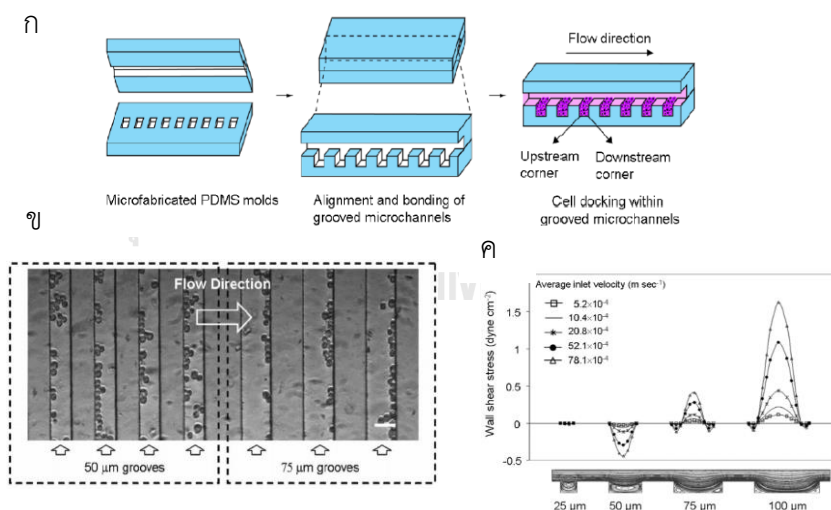
การดักจับอนุภาคโดยอาศัยการไหลของของไหล เป็นตัวกลางนำอนุภาคไปยังเป้าหมายที่ออกแบบไว้ ส่งผลให้การทดลองไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางชีวภาพของอนุภาคทดสอบ หรือส่งผลน้อยมาก มากไปกว่านั้นวิธีการนี้ยังสามารถทั้งดักจับอนุภาคเดี่ยวและหลายอนุภาค โดยทั่วไปแล้วการออกแบบเป้าหมายดักจับอนุภาคจะมีลักษณะคล้ายแฉกหรือหลุม บ้างก็มีในลักษณะรูปแบบร่อง ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์และการออกแบบในการศึกษาที่แตกต่างกันออกไป

2.2.1 การดักจับอนุภาคด้วยร่องยาวขนาดจุลภาค (Microgroove entrapment)

ในปี 2008 Khademhosseini [12] และทีมงานวิจัยได้นำเสนอการออกแบบอุปกรณ์ที่สามารถดักเซลล์และศึกษาความเค้นเฉือน อีกทั้งสามารถระบุตำแหน่งการเรียงตัวของเซลล์แบบเป็นกลุ่มก้อนได้ ด้วยจุดประสงค์ที่ต้องการศึกษาการอยู่รอดของเซลล์ภายใต้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นหลังจากที่เซลล์ถูกดักจับ อุปกรณ์นี้ถูกสร้างโดยการขึ้นรูปวัสดุพอลิเมอร์ PDMS สองชั้น ประกอบด้วยชั้นบนและชั้นล่างแสดงดังรูปที่ 2.3 จนกลายเป็นช่องทางการไหลขนาดจุลภาค (Microchannel) โดย PDMS ส่วนล่างเป็นแนวร่องลึกตั้งฉากกับทิศทางการไหล มีความลึก 40 μm ยาว 4 mm ความ

กว้างของช่องแบ่งออกเป็น 4 เงื่อนไข คือ 25, 50, 75 และ 100 μm ตามลำดับ โดยถือว่าความกว้างขนาด 25 และ 50 μm เป็นร่องกลุ่มขนาดเล็ก นอกนั้นเป็นร่องกลุ่มขนาดใหญ่ ส่วน PDMS ด้านบนมีลักษณะเป็นแนวยาวสูง 40 μm ยาว 5 mm จากการทดลองส่งผ่านเซลล์ด้วยของไหลที่มีความหนาแน่น 4×10^6 cells/ml ที่ความเร็วเฉลี่ย 5.2×10^{-4} m/s

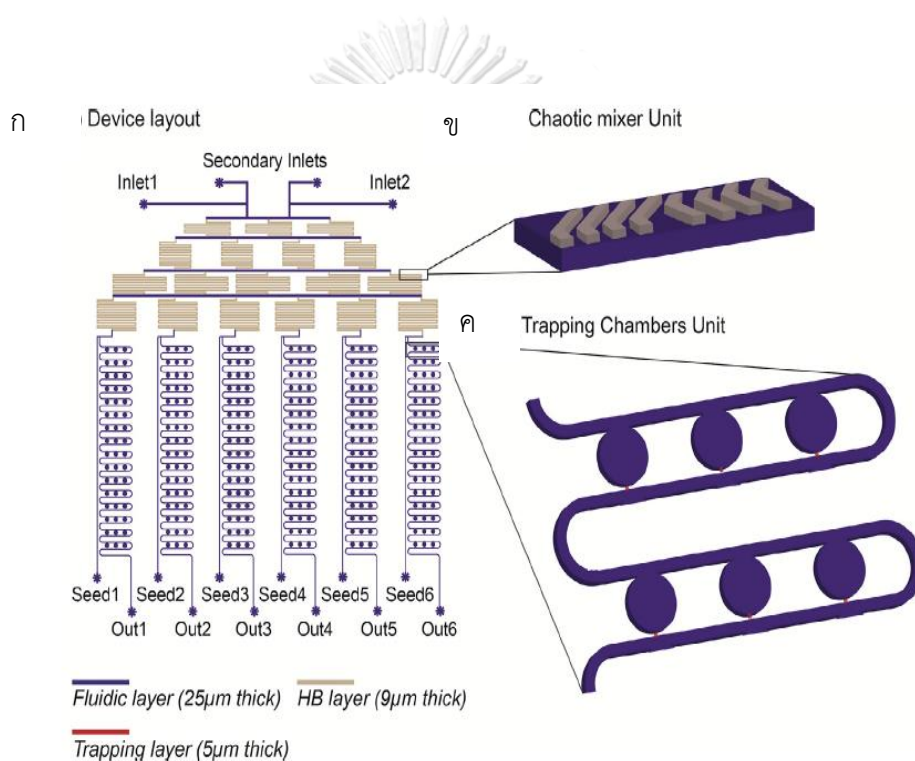
การกระจายตัวของเซลล์ภายในร่องกลุ่มขนาดเล็ก จะเรียงตัวกันตามแนวยาวฝั่งต้นน้ำ (Upstream) ส่วนการกระจายตัวของเซลล์ภายในร่องกลุ่มขนาดใหญ่จะเรียงตัวกันตามแนวยาวฝั่งปลายน้ำ (Downstream) ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับแบบจำลองการไหล และยังพบว่า ขนาดของความเค้นเฉือนมากขึ้นเมื่ออัตราเร็วของของไหลและความกว้างของร่องมีขนาดใหญ่ขึ้นดังรูปที่ 2.3ค และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเมื่อเพิ่มอัตราไหลของของไหลเข้า จากการศึกษาพบว่าอุปกรณ์ชนิดนี้สามารถดักจับและควบคุมตำแหน่งเซลล์ภายใต้ขนาดความเค้นเฉือนที่เหมาะสมทางชีววิทยา อย่างไรก็ตามเซลล์ที่ถูกดักจับนี้ยังไม่ใช่เซลล์อนุภาคเดียว ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับลักษณะการตรวจวิเคราะห์เซลล์ในงานบางประเภท



รูปที่ 2.3 (ก) แผนผังแสดงช่องทางเดินของของไหล, (ข) การกระจายตัวของเซลล์ภายในร่องกลุ่มขนาดเล็ก ขนาด 50 μm และ 75 μm , (ค) ภาพแสดงความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นภายในร่องที่มีขนาดแตกต่างกัน [12]

2.2.2 การดักจับอนุภาคด้วยห้องโพรงและช่องว่างขนาดเล็ก (Microchamber and microgap entrapment)

ในปี 2016 Occhetta [13] และคณะวิจัยได้เสนอกลยุทธ์การดักจับเพื่อการวิเคราะห์เซลล์เดี่ยวภายในห้องโพรงขนาดเล็ก เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมายังมีช่องว่างในการดักจับเซลล์เดี่ยวและการเลี้ยงเซลล์ควบคู่กันในอุปกรณ์ชนิดเดียวกัน ขณะเดียวกันเทคโนโลยีการสร้างแม่พิมพ์ขนาดเล็กถูกพัฒนาอย่างมากส่งผลให้สามารถสร้างช่องทางเดินของของไหลที่มีลวดลายซับซ้อนมากยิ่งขึ้นทางผู้วิจัยจึงออกแบบระบบของไหลจุลภาคไว้เป็นสองส่วนซึ่งจะถูกนำมาเชื่อมต่อกันภายหลังดังรูปที่ 2.4



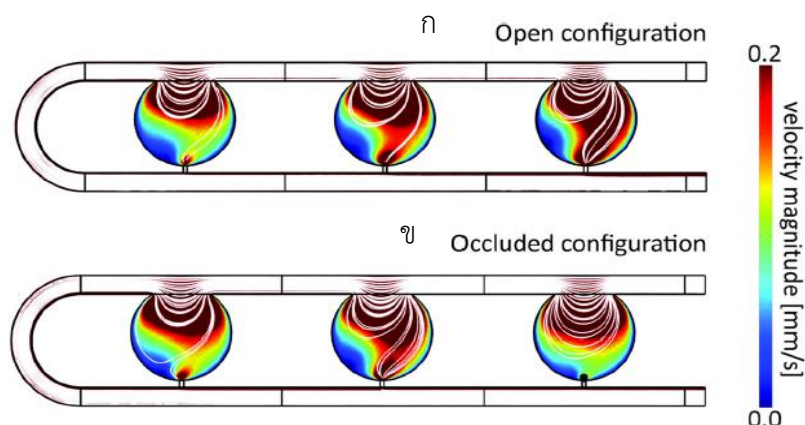
รูปที่ 2.4 (ก) รูปแบบการวางตัวของอุปกรณ์, (ข) ส่วนบน : อุปกรณ์เพิ่มความปั่นป่วนในการไหลของของไหล, (ค) ส่วนล่าง : ห้องโพรงดักจับเซลล์ [13]

ส่วนแรกคือส่วนที่เป็นช่องทางเดินสำหรับการผสมสารละลายบัฟเฟอร์ให้คลุกเคล้าจนมีความเข้มข้น 6 ค่าที่แตกต่างกัน ในส่วนที่สองเป็นส่วนของการออกแบบช่องทางเดินเพื่อการกักเก็บเซลล์ลักษณะท่อทางเดินออกแบบขดไปมาคล้ายท่อขดในอุปกรณ์ควบแน่น (Condenser) และ

อุปกรณ์ระเหย (Evaporator) ของระบบทำความเย็น ในระหว่างช่วงของท่อทางเดินหลักของแต่ละช่วงจะมีห้องดักจับลักษณะเป็นโพรงขนาดเล็ก (Trapping chamber unit) รูปร่างวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 μm จำนวนสามหน่วยแนบอยู่ ด้านบนของวงกลมเป็นลักษณะเปิดกว้าง ด้านล่างถูกสร้างเป็นรูทางเดินขนาดเล็กซึ่งใช้เป็นจุดดักจับเซลล์ โดยทั้งด้านบนและล่างของวงกลมเชื่อมต่อกับช่องทางเดินหลัก เป็นอย่างนี้เรื่อยไปทั้งหมด 16 แถวของท่อช่วงทางเดินรวมทั้งสิ้นในหนึ่งหน่วยจะมีห้องดักจับเซลล์ 48 ช่องต่อหนึ่งค่าความเข้มข้น โดยแบ่งเงื่อนไขของท่อทางเดินหลักเป็น 4 ขนาดคือ 25, 50, 75 และ 100 μm แต่ละขนาดจะประกอบขนาดตำแหน่งดักจับเซลล์ที่แตกต่างกัน 2 ขนาดคือ 10 และ 15 μm

ลักษณะเด่นของการออกแบบระบบดังกล่าวส่งผลให้การดักจับอนุภาคเซลล์เดี่ยวประสิทธิภาพสูงเนื่องจากใช้กลไกการเปลี่ยนเส้นทางการไหลของของไหล เมื่อมีเซลล์ถูกกักที่ตำแหน่งกักเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 กล่าวคือเส้นทางการไหลของของไหลจะนำเซลล์ไหลลงห้องกักเก็บได้มากเมื่อยังไม่มีเซลล์อยู่ในห้องกักเก็บนั้น ขณะเดียวกันโอกาสของเส้นทางการไหลของของไหลจะนำเซลล์ลงไปในห้องกักเก็บมีค่าต่ำมากเมื่อมีเซลล์ไปอุดตันอยู่ที่ตำแหน่งดักจับเซลล์แล้วก่อนหน้านี้ เนื่องจากมีเซลล์ซึ่งเปรียบเสมือนอนุภาคที่ไปอุดตันตำแหน่งดักจับเซลล์ทำให้ของไหลไม่สามารถไหลผ่านรูขนาดเล็กนี้ได้เหมือนครั้งยังไม่มีอนุภาคมาขวางกั้น ซึ่งการทดลองเป็นไปตามแบบจำลองการไหลของระบบในคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 2.5

จากการทดลองภายใต้เงื่อนไข ความกว้างของช่องการไหลหลักที่ 50 μm และขนาดตำแหน่งดักจับเซลล์ที่ 10 μm ที่อัตราเร็ว 0.2 $\mu\text{L}/\text{min}$ เป็นระยะเวลา 2 นาที ผลการทดลองกับเม็ดพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 ไมโครเมตร พบว่าประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเซลล์เดี่ยวสูงถึง $70\% \pm 6.9\%$ เมื่อเทียบกับจำนวนห้องโพรงดักจับทั้งหมด และเมื่อทดสอบกับเซลล์จริงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณขนาด 16 μm พบว่าประสิทธิภาพการดักจับเซลล์ทั้งหมดคือ 40.1% มีจำนวนเซลล์เดี่ยวและสองเซลล์ขึ้นไปต่อหนึ่งห้องอยู่ที่ประมาณ 40.1% และ 4.4% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าการดักจับลักษณะนี้ไม่เหมาะกับการดักจับเซลล์ที่ยึดเกาะกับผนัง เพราะจะส่งผลให้เซลล์ ไปอุดตันและเกาะอยู่ในรูเล็กด้านล่างของโพรงวงกลมแทนที่จะอยู่ตำแหน่งโพรง ซึ่งมีพื้นที่ว่างมากกว่า ทำให้เซลล์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้เนื่องจากข้อจำกัดของพื้นที่เนื่องจากตำแหน่งที่เซลล์ที่ถูกดักจับอยู่ตรงตำแหน่งรู ไม่ใช่โพรงของห้องกักเก็บ

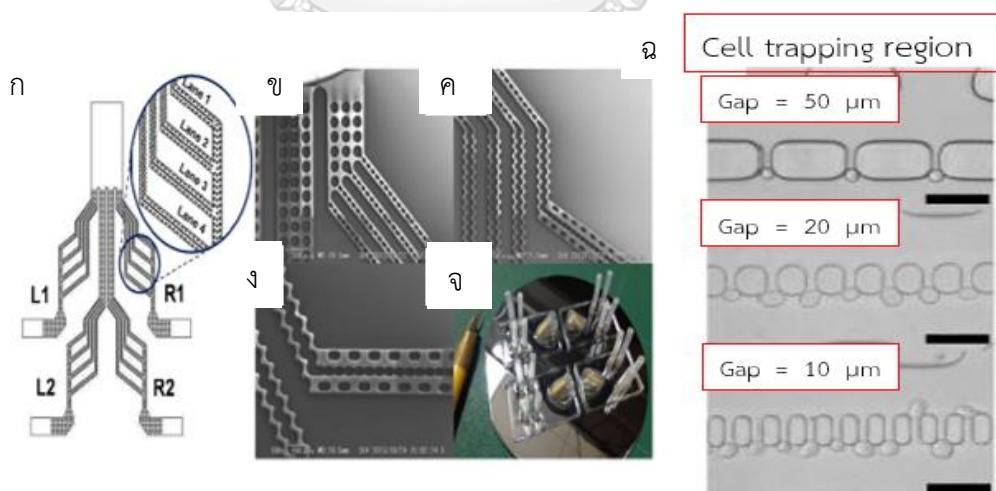


รูปที่ 2.5 ภาพจำลองการไหลภายในระบบ (ก) ณ.เวลาที่ยังไม่มีเซลล์ในโพรงดักจับ, (ข) ณ.เวลาที่มีเซลล์อุดตันตำแหน่งด้านล่างโพรงดักจับแล้ว [13]

ในปีค.ศ. 2014 Wilfred [14] ผู้วิจัยมหาวิทยาลัยโอซากา ประเทศญี่ปุ่น และคณะทีมงาน ได้ทำการค้นคว้าวิจัยอุปกรณ์ขนาดเล็กที่ใช้สำหรับดักจับเซลล์ต้นกำเนิดหัวใจของหนู (Neonatal rat cardiomyocytes) ในลักษณะเซลล์เดี่ยวและศึกษาปฏิกิริยาของเซลล์ต่อเซลล์ (Cell-cell interaction) พร้อมกันไปด้วย โดยใช้เครื่องปั่นแรงเหวี่ยง เป็นเครื่องมือสร้างแรงดันเพื่อให้ของไหลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วรอบ 900 rpm หรือประมาณ 127 กรัม เป็นเวลา 5 นาที ช่องทางการไหลในอุปกรณ์ถูกแบ่งออกเป็น 4 ช่องทาง (L1, R1, L2 และ R2) โดยมีลักษณะช่องของของไหลเหมือนกัน ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกคือส่วนของฟิลเตอร์กรองขนาดอนุภาคโดยมีรูปร่างวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 μm แต่ละหน่วยห่างกัน 50 μm กระจายอยู่ในบริเวณนั้น เพื่อกรองไม่ให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 μm เข้ามาในระบบ (เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ชนิดนี้ประมาณ 12 – 15 μm) จากนั้นช่องทางการไหลจะถูกแบ่งออกเป็น 4 เลนส์ที่เหมือนกัน มายังช่วงที่สองคือช่วงที่มีท่อทางเดินในลักษณะโค้งขึ้นและลงคล้ายฟันปลาเพื่อต้องการสร้างความปั่นป่วนในการไหลและป้องกันการยึดติดกันระหว่างเซลล์กับผนังของช่องการไหลดังรูปที่ 2.6ค จนกระทั่งส่วนสุดท้ายคือส่วนของการดักจับเซลล์ อาศัยช่องว่างระหว่างเสาโครงสร้าง (Pillar) ในการดักจับเซลล์ ความกว้างของเสา ถูกออกแบบสามขนาดคือ 10 20 และ 50 μm สร้างขึ้นงานโดยใช้วิธีซอฟต์แวร์โฟลิโทกราฟี ส่วนทางเข้าและทางออกประกอบด้วยแท่งเหล็กกลมภายในกลวง ทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อท่อซิลิโคนในการ

ทดลอง จากนั้นนำเซลล์ฉีดเข้าไปยังอุปกรณ์ที่ความเข้มข้น 1×10^4 cells/ml จำนวน 50 μ l และฉีดอาหารเลี้ยงเซลล์เข้าไป 50 ml จากนั้นติดตั้งลงอุปกรณ์ปั่นแรงเหวี่ยง

หลังจากทำการทดลองพบว่า เซลล์เดี่ยวถูกดักจับสูงถึง 70 - 80% เซลล์จะถูกดักในส่วนช่องทางการไหล L1 และ R1 มากกว่าส่วน L2 และ R2 ในส่วนของความกว้างของเสาถูกออกแบบสามขนาด ทุกขนาดสามารถดักจับเซลล์เดี่ยวได้ แต่ขนาด 20 และ 10 μ m เป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุด เพราะสามารถศึกษาปฏิกิริยาของเซลล์ต่อเซลล์ที่ถูกดักจับได้ดีว่าเนื่องจากช่องว่างห่างกันแต่ละเซลล์มีขนาดเล็ก เซลล์สามารถเคลื่อนที่หากันได้สะดวก อย่างไรก็ตามช่องว่างที่ 10 μ m ไม่ถูกแนะนำ เนื่องจากจะทำให้อุปกรณ์ไม่มีความแข็งแรงเพียงพอและอาจส่งผลกระทบต่อความเสียหายในที่สุด พบว่าผ่านไปเซลล์มีอัตราการเต้นเฉลี่ยอยู่ประมาณ 12 beats/min (bpm) เกิดจากการคำนวณจากโปรแกรม MATLAB ใช้คำสั่งอ่านค่าความเข้มของจุดภาพที่เปลี่ยนไปเมื่อเซลล์มีการหายใจ จากนั้นแปลงค่าเป็นจังหวะการหายใจจริง หลังจาก 8 ชั่วโมงพบว่าเซลล์ที่อยู่ตำแหน่งใกล้เคียงกันมีการเคลื่อนที่เข้าหากันเพื่อทำปฏิกิริยาบางอย่างดังรูปที่ 2.6 ฉ โดยเซลล์ส่วนใหญ่จะตายลงหลังจากเวลาผ่านไป 3 วัน จากนั้นได้มีการเปรียบเทียบข้อมูลการเต้นและการอยู่รอดของเซลล์กับการเลี้ยงภายนอก (ภายใน flask) พบว่าการเลี้ยงในอุปกรณ์ขนาดเล็กมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าถึง 75% อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ถือเป็นจุดเริ่มต้นการเลี้ยงเซลล์จริงในอุปกรณ์ของไหลจุลภาค

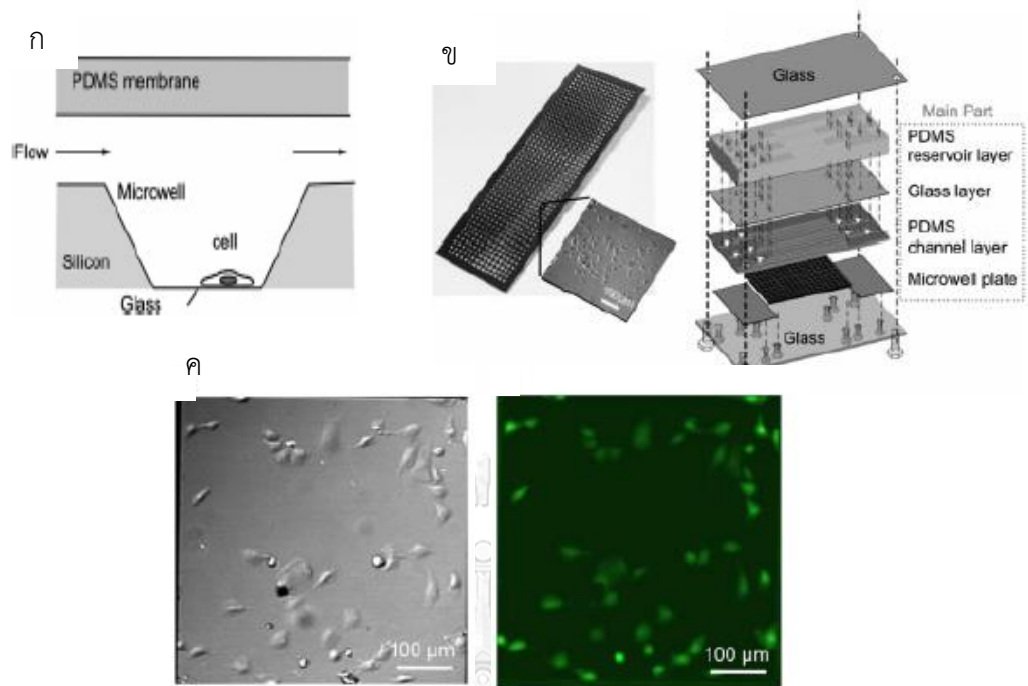


รูปที่ 2.6 (ก) แผนผังภาพรวมระบบอุปกรณ์, (ข) ส่วนฟิลเตอร์กรองอนุภาคต่ำกว่า 50 μ m, (ค) ส่วนเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วน, (ง) ส่วนดักจับอนุภาคระหว่างช่องแคบ, (จ) ภาพรวมอุปกรณ์จริง, (ฉ) ช่องดักจับเซลล์ขนาดต่างกัน [14]

2.2.3 การดักจับอนุภาคด้วยหลุมขนาดเล็ก (Microwell entrapment)

ลักษณะการดักจับด้วยหลุมขนาดเล็กมีแนวโน้มว่าจะเป็นทางออกที่น่าสนใจอยู่ไม่น้อยสำหรับนักวิจัย เนื่องจากความได้เปรียบทางกายภาพ ยกตัวอย่างเช่น ของไหลเมื่อไหลผ่านหลุมขนาดเล็กส่งผลให้ เส้นทางการไหลของของไหลจะเกิดการหมุนวนจากผิวบนไปยังผิวล่างของหลุมขนาดเล็ก โดยลักษณะรูปร่างต่างๆส่งผลให้เส้นทางการไหลของของไหลแตกต่างกันออกไป ปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นกลไกสำคัญในการดักจับอนุภาคลงไปสู่หลุมขนาดเล็กที่นักวิจัยได้ศึกษาอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้มีรูปแบบการดักจับที่น่าสนใจมากมายในหลุมขนาดเล็ก โดยในปี 2007 Moeller HC [15] ได้เสนอแนวทางการใช้หลุมวงกลมขนาดเล็กในการดักจับเซลล์ Embryonic stem cell (ES) เพื่อเพาะเลี้ยงและศึกษาลักษณะทางชีวภาพของเซลล์ หลุมถูกขึ้นรูปโดยใช้ Poly ethylene glycol (PEG) และได้ถูกออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน 5 ขนาดคือ 50, 70, 100, 150 และ 175 μm โดยมีความลึกของหลุมเท่ากันทั้งหมดคือ 20 μm พบว่า รูปแบบอุปกรณ์สามารถใช้เลี้ยงเซลล์ได้จริง และพบว่า Poly ethylene glycol (PEG) มีคุณสมบัติป้องกันการยึดติดของเซลล์บนพื้นผิวของหลุมอีกด้วย อย่างไรก็ตามการดักจับเซลล์ในลักษณะนี้มีทั้งการดักจับและเพาะเลี้ยงเซลล์แบบเซลล์เดี่ยวและหลายเซลล์ในหลุมเดียวกัน

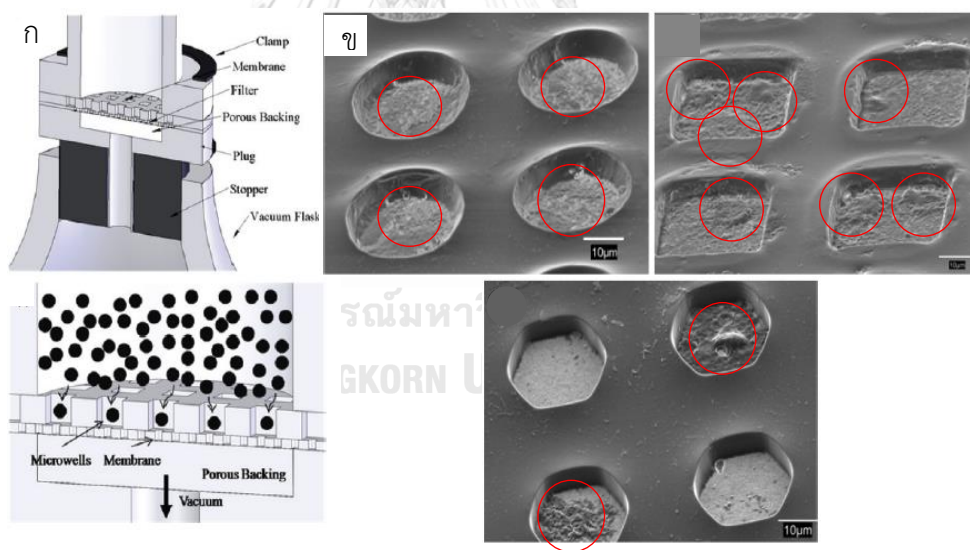
สองปีต่อมา Lindstrom et al. [16] และทีมวิจัยได้ร่วมพัฒนาต่อยอดอุปกรณ์เดิมให้มีประสิทธิภาพในการดักจับและวิเคราะห์เซลล์เดี่ยวให้ดียิ่งขึ้น อุปกรณ์นี้มีช่องทางการไหลโดยใช้วัสดุ PDMS ประกอบด้วยหลุมขนาดเล็กที่ใช้ในการดักเซลล์ประกบกับแผ่นกระจกเพื่อสร้างเป็นช่องทางการไหล มีบ่อพักสำหรับป้อนเซลล์เข้าอุปกรณ์และปั๊มขนาดเล็กที่ช่วยปรับแรงดันของของไหลเข้าสู่ระบบ โดยอาศัยแรงขับจากแม่เหล็กถาวร ในการขับเคลื่อนแกนหมุน พบว่าอุปกรณ์สามารถดักจับเซลล์ได้จริงโดยไม่ส่งผลเสียหายต่อเซลล์ในระหว่างการทดลองดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 (ก) หลุมขนาดเล็กที่มีเซลล์อยู่ด้านล่างของหลุม, (ข) ภาพแสดงระดับของอุปกรณ์, (ค) เซลล์ที่ถูกดักจับ (ซ้าย-ไมย้อมสี ขวา-ย้อมสี) [16]

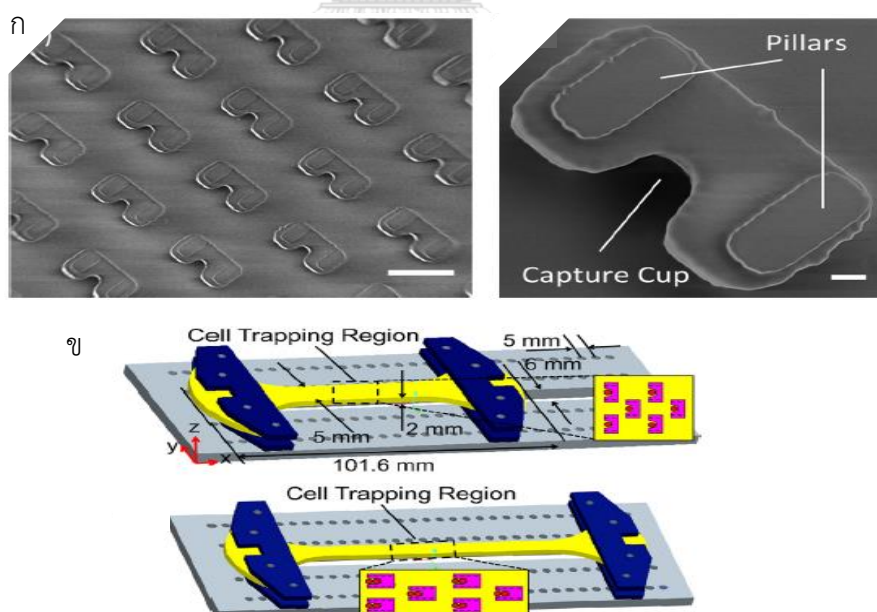
ในปี 2010 Ferrell et al. [17] ได้นำเสนออุปกรณ์ที่สามารถป้อนเซลล์เข้าสู่หลุมจุลภาคโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความดันที่ตำแหน่งบริเวณที่ต้องการดักจับเซลล์ โดยใช้ปั๊มที่ต่ออยู่ตำแหน่งล่างของอุปกรณ์ในการดูดอากาศผ่านบริเวณที่ดักจับเซลล์และแผ่นกรองจนบริเวณดังกล่าวเป็นสุญญากาศดังรูปที่ 2.8 ก ส่งผลให้เซลล์ถูกดูดเข้ามายังตำแหน่งหลุมจุลภาค ที่ถูกออกแบบแตกต่างกันสามรูปแบบคือ วงกลม สี่เหลี่ยมและ หกเหลี่ยม โดยมีเงื่อนไขในการทดลองกับเซลล์ที่มีคุณสมบัติยึดติดและไม่ยึดติดกับพื้นผิว (NIH 3T3 fibroblasts, PANC-1 pancreatic ductal epithelial-like cells และ THP-1 monocytic leukemia cells) เริ่มต้นจากการป้อนเซลล์เข้าสู่หลุมสองขนาดคือ 20 และ 50 μm โดยหลุมขนาด 20 μm จะถูกป้อนเซลล์ด้วยความเข้มข้น 300, 450 และ 600 cells/mm² อัตราการไหล 0.8 ถึง 4 nL/min เป็นระยะเวลา 5 นาที ต่อหลุม ในขณะที่ หลุมขนาด 50 ไมโครเมตร จะถูกป้อนเซลล์ด้วยความเข้มข้น 100, 200 และ 300 cells/mm² ที่อัตราการไหล 5 ถึง 25 nL/min ต่อหลุม เป็นระยะเวลา 5 นาที จากนั้นทำการศึกษาความหนาแน่นและสัญญาณวิทยาของเซลล์ที่ถูกดักจับ

ผลการทดลองของเซลล์ NIH 3T3 พบว่าจากรูปที่ 2.8 หลุมลักษณะวงกลมทั้งสี่วงสามารถดักจับเซลล์และเซลล์มีลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยว ส่วนหลุมสี่เหลี่ยมพบว่าทั้งสี่หลุมสามารถดักจับเซลล์ได้เช่นเดียวกันแต่หลุมที่ตำแหน่งบนซ้ายและล่างขวาจะมีเซลล์มากกว่าหนึ่งเซลล์ถูกดักจับ ในขณะที่หลุมรูปหกเหลี่ยมมีเพียงแค่สองหลุมในสี่หลุมที่สามารถดักจับเซลล์ได้และหนึ่งในนั้นมีมากกว่าหนึ่งเซลล์อีกด้วย จึงได้ข้อสรุปโดยคร่าวในการทดลองครั้งแรกว่าหลุมรูปร่างวงกลมมีคุณสมบัติที่ดีที่สุดเนื่องจากสามารถดักจับเซลล์ได้มากและเซลล์ที่ได้เป็นลักษณะเซลล์เดี่ยวเมื่อเทียบกับหลุมรูปทรงอื่นๆ จากการทดลองยังพบอีกว่าหลุมวงกลมมีประสิทธิภาพดักจับเซลล์ให้ลงหลุมได้สูงถึง 95% ในหลุมที่มีขนาด 20 และ 50 μm โดยมีเซลล์เดี่ยวอยู่ 50% และ 26% ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการดักจับสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเซลล์เพิ่มขึ้น แต่โอกาสในการดักจับเซลล์มากกว่าหนึ่งเซลล์ภายในหลุมเดี่ยวก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน อีกทั้งอุปกรณ์สามารถใช้งานกับเซลล์ที่มีคุณสมบัติยึดติดและไม่ยึดติดกับพื้นผิวได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อเซลล์



รูปที่ 2.8 (ก) บน-โครงสร้างภายในอุปกรณ์ดักเซลล์ระบบดูดอากาศ และ ล่าง-เซลล์ถูกดูดลงสู่หลุมโดยปั๊มแรงดันต่ำ (17 - 85 kPa), (ข) ภาพถ่ายเซลล์จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) บนซ้าย - ทรงกลม บนขวา - สี่เหลี่ยม และ ล่าง - หกเหลี่ยม [17]

จนกระทั่งในปี 2013 Jing Zhua และคณะได้ออกแบบอุปกรณ์ดักจับเซลล์ลักษณะคล้าย หลุมเว้ารูปตัวยูดั่งรูปที่ 2.9ก จัดเรียงในตำแหน่งขวางเส้นการไหลของอนุภาค [18] เพื่อที่จะดักจับ เซลล์มะเร็งเต้านมในมนุษย์ แบบทั้งเซลล์เดี่ยวและคู่ ภายในหลุมเดียวกัน โดยใช้ประโยชน์จาก คุณสมบัติที่มีความยืดหยุ่นสูงในวัสดุโพลีเมอร์ PDMS มาใช้เป็นกลไกในการดักเซลล์ด้วย แม่พิมพ์ถูก ขึ้นรูปโดยใช้วิธีซอโฟลิโกราฟี จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้วัสดุโพลีเมอร์ PDMS ผู้วิจัยนำชิ้นงานไป ติดตั้งลงบนแผ่นอะคริลิก โดยชิ้นส่วนของ PDMS จะติดอยู่กับแผ่นอะคริลิกนี้ดังรูปที่ 2.9ข เมื่อ ทีมงานทำการยึดแผ่นอะคริลิกนี้โครงสร้างภายในชิ้นงาน PDMS ก็จะถูกยึดออกไปด้วย เงื่อนไข การทดลอง มีความเข้มข้นเซลล์ 1×10^6 cells/mL จากนั้นฉีดเข้าระบบที่อัตราไหล $10 \mu\text{L}/\text{min}$ เป็นระยะเวลา 1 นาที นอกจากนั้นได้จำลองการเสีรูปของชิ้นงานหลังจากชิ้นงานถูกยึดออกไปเพื่อ ออกแบบขนาดที่เหมาะสม ในกรณีที่ไมยึดชิ้นงานระบบจะสามารถดักจับเซลล์เดี่ยวและเซลล์คู่ในหลุม เดียวกันได้ 41% และ 31% ตามลำดับ แต่ถ้าทีมงานทำการยึดชิ้นงานจนมีความเครียดเพิ่มขึ้น ประมาณ 8 เท่า จะสามารถดักจับเซลล์เดี่ยว สองเซลล์ และสามเซลล์ในหลุมเดียวกันได้ 4% 24% และ 39% ตามลำดับ ซึ่งผลลัพธ์ที่แตกต่างเกิดจากรูปทรงของหลุมเว้ารูปตัวยูเปลี่ยนไปเมื่อมีการยึดออก ส่งผลให้เส้นการไหลและขนาดมิติหลุมเปลี่ยนไปโดยทั้งสองปัจจัยนี้เป็นสิ่งสำคัญต่อการดักจับเซลล์

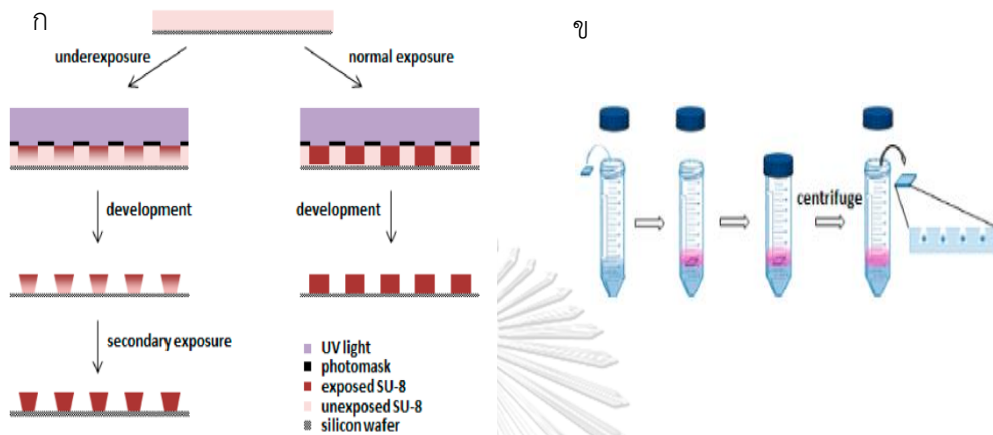


รูปที่ 2.9 (ก) การวางตัวของหลุมเว้ารูปตัวยูขนาดเล็ก, (ข) แผ่นอะคริลิกเพื่อใช้ยึดชิ้นงาน PDMS ซึ่ง ถูกติดตั้งภายใน [18]

ห้าปีถัดมาในปี 2015 Lu Huang และคณะที่มิวิจัยได้นำเสนอวิธีการดักจับเซลล์เดี่ยวโดยอาศัยกลไกการเหวี่ยงของของไหล [7] ผลักดันให้เซลล์ตกลงไปในหลุมทรงรูปกรวยตัดปลาย และใช้เซลล์ HeLa ของมนุษย์เป็นเซลล์ทดลอง เพื่อศึกษารูปแบบอุปกรณ์ที่สามารถดักจับเซลล์เดี่ยวให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด จากนั้นศึกษาการอยู่รอดของเซลล์หลักจากการดักจับ ขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์โดยใช้วิธีซอพลิโทกราฟี จากนั้นทำการฉายแสงยูวีผ่านหน้ากากลงบนชิ้นงานดังรูปที่ 2.10g เพื่อให้ชิ้นงานส่วนต่างของตำแหน่งหลุมหลายเป็นรูปกรวยที่ถูกตัดปลาย ก่อนจะนำมาขึ้นรูปโดยใช้วัสดุโพลีเมอร์ PDMS เพื่อสร้างหลุมจุลภาค รูปแบบของชิ้นงานแบ่งออกเป็นสองประเภทคือแบบระบุตำแหน่งและแบบที่ไม่ระบุตำแหน่งการดักจับ โดยชิ้นงานแบบแรกมี จำนวน 15,625 หลุมต่อ 1 cm^2 ในขณะที่แบบหลัง จะถูกแบ่งเป็น 100 กลุ่ม ต่อ 1 cm^2 โดยแต่ละกลุ่มมี 10 แถว และ 10 หลัก ผู้วิจัยได้นำวัสดุโพลีเมอร์รูปทรงกรวยตัดปลายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน คือ 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 และ $24 \mu\text{m}$ และสารละลายผสมเซลล์ ใส่ลงไปในห้องทดลองจากนั้นปั่นด้วยเครื่องเซนตริฟิวจ์ดังรูปที่ 2.10ข เพื่อศึกษาการดักจับเซลล์เดี่ยว

จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าเซลล์แทบไม่ถูกดักจับในหลุมกรวยตัดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า $18 \mu\text{m}$ เนื่องจาก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์ชนิดนี้อยู่ที่ประมาณ $20 \mu\text{m}$ ผู้ทดลองจึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมภายใต้ 5 เงื่อนไขดังนี้ 1) ชิ้นวัสดุโพลีเมอร์รูปทรงกรวยตัดปลายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (Size of microwell) คือ 18, 20, 22 และ $24 \mu\text{m}$ 2) รอบความเร็วในการปั่น (Centrifugation rate) ที่ 500, 1,000, 1,250, 1,500 และ 2,000 rpm 3) ความเข้มข้นของเซลล์ (Cell concentration) ที่ 60,000 100,000 200,000 และ 400,000 cells/ml 4) ช่วงระยะเวลาการปั่น (Centrifugal duration) ที่ 1 วินาที, 1, 2, และ 5 นาที 5) จำนวนรอบของการปั่นซ้ำ (Centrifugation cycle) ที่ 1, 2 และ 3 ครั้ง ผลการทดสอบพบว่าขนาดของหลุมกรวยตัด $24 \mu\text{m}$ สามารถดักจับเซลล์เดี่ยวได้มากที่สุด ในขณะที่หลุมกรวยตัด $18 \mu\text{m}$ แทบไม่สามารถดักจับเซลล์ได้เลย เงื่อนไขที่ดีที่สุดที่สามารถดักจับเซลล์เดี่ยวคือ ที่ความเร็วรอบที่ 1,500 rpm ความเข้มข้นของเซลล์ 200,000 cells/ml ส่วนประสิทธิภาพในส่วนในช่วงระยะเวลาการปั่นและจำนวนรอบของการปั่นซ้ำ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญดังนั้นจึงเลือกใช้เงื่อนไขที่ทำได้รวดเร็วและสะดวกที่สุดคือ 1 วินาทีและ 1 รอบ ตามลำดับ ภายใต้เงื่อนไขที่ดีที่สุดอุปกรณ์สามารถดักจับเซลล์ได้สูงถึง 90% ภายในระยะเวลาอันสั้น มีเพียง 4% เท่านั้นสำหรับการดักจับสองเซลล์ มากไปกว่าไปการอยู่รอดของเซลล์ (Cell viability) เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงนับจากการดักจับสูงถึงร้อยละ 85 การดักจับเซลล์

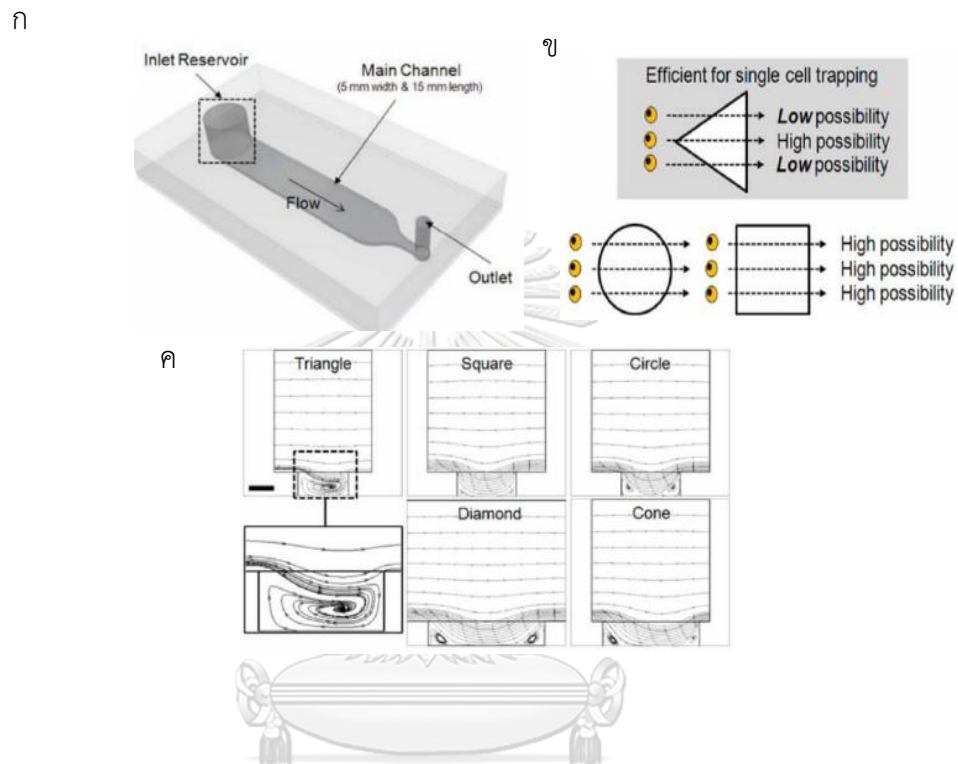
ในลักษณะนี้ให้ผลลัพธ์ที่รวดเร็วแต่ไม่เหมาะกับการนำเซลล์ออกมาใช้งานในอนาคตเนื่องจากปาก หลุมมีลักษณะแคบ



รูปที่ 2.10 (ก) การสร้างชิ้นงานฉายแสงแบบ Underexposure, (ข) ขั้นตอนการทดลอง [7]

ในปี 2010 Park et al. [8] ได้ศึกษากลไกการไหลของการดักจับเซลล์เซลล์มะเร็งเรียงต่อม หลุมมากและอนุภาคพลาสติกในหลุมขนาดเล็ก ด้วยจุดประสงค์ที่ต้องการดักจับเซลล์เดี่ยว โดยการ ออกแบบอุปกรณ์ที่มีช่องทางเดินของของไหลหลัก (Main channel) ดังรูปที่ 2.11ก รูปทรงเป็น สี่เหลี่ยมและมีหลุมวางอยู่ที่พื้นของสี่เหลี่ยมนั้นโดยจะมีรูปร่างของหลุมที่ต่างกัน 5 แบบคือ สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม วงกลม ข้ามหลามตัด และรูปกรวย จากการศึกษาโดยใช้โปรแกรมจำลองการ ไหล พบว่า หลุมรูปทรงสามเหลี่ยมมีโอกาสที่จะดักจับเซลล์เดี่ยวได้สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปทรง อื่นๆ จากเหตุผลของเส้นทางการไหลของของไหลเมื่อถึงหลุมสามเหลี่ยมของไหลจะเกิดการหมุนตัว และหมุนลง (Recirculation) สู่พื้นของหลุมซึ่งเป็นกลไกที่จะผลักดันให้เซลล์ถูกดักจับ มากไปกว่านั้น ความได้เปรียบของรูปทรงสามเหลี่ยมยังส่งผลต่อโอกาสในการดักจับเซลล์เดี่ยวอีกด้วยดังรูปที่ 2.11ข ในขณะเดียวกันปรากฏการณ์นี้ไม่เกิดขึ้นกับหลุมรูปทรงอื่นดังรูปที่ 2.11ค การทดลองนี้ใช้ความ เข้มข้นของสารละลายอยู่ที่ 1.5×10^6 cells/ml ซึ่งสารละลายนี้จะถูกป้อนเข้าด้วยปั๊มที่อัตราการ ไหล 0.18 ml/h

ประสิทธิภาพอุปกรณ์นี้สามารถดักจับเซลล์ได้ $62 \pm 10\%$ มากไปกว่านั้นการใช้ประโยชน์ของ microfluidic สามารถทำได้อย่างสะดวก ต้นทุนต่ำและสามารถดักเซลล์มีความรวมถึงการเพาะเลี้ยงเซลล์ได้ เนื่องจากหลุมขนาดเล็กนี้ยังคงมีพื้นที่ว่างพอที่จะทำให้เซลล์เติบโตต่อได้ เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูลผู้เขียนได้รวบรวมรายละเอียดของงานวิจัยต่างๆไว้ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.11 (ก) แผนผังช่องทางการไหลของของไหล, (ข) ความเป็นไปได้ในการดักจับเซลล์เดี่ยวของรูปทรงที่ต่างกัน, (ค) การจำลองการไหลของของไหลเมื่อไหลผ่านหลุมจุลภาครูปทรงต่างกัน [8]

ตารางที่ 2.1 วิธีการดักจับเซลล์ด้วยเทคนิคต่างๆ

Author	Adam Winkleman, Katherine L. Gudiksen, Declan Ryan, George M. Whitesides	Hannes-Christian Moeller, Matthew K. Mian, Shamit Shrivastava, Bong Geun Chung, Ali Khademhosseini	Amir Manbachi, Shamit Shrivastava, Margherita Cioffi, Bong Geun Chung, Matteo Moretti, Utkan Demirci, Marjo Yliperttula, and Ali Khademhosseini
Title	A magnetic trap for living cells suspended in a paramagnetic buffer	A microwell array system for stem cell culture	Microcirculation within Grooved Substrates regulates Cell Positioning and Cell Docking inside Microfluidic Channels
Years	2004	2007	2008
Entrapment geometry	Channel (bottleneck)	Circle	Microgroove
Type of particles	Polystyrene bead / Cells : mouse fibroblast sNIH-3T3d, yeast, and algae	Embryonic stem (ES) cells	Cardiac muscle cell line (HL-1) from the AT-1 mouse atrial cardiomyocyte tumor lineage
Materials	N/A	Polyethylene glycol	PDMS
Efficiency	N/A	60%	55% - 90%*
Cell suspension	$2.8 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{mol}$	$4 \times 10^2 \text{ cells/mm}^2$	$4 \times 10^6 \text{ cells/mL}$
Feeding technique	Drop Cell	Drop cell	Pump
Flow rate	N/A	Varies	N/A*
Type of captured targets	Single	Multiple	Bunch
Cell dimension	$> 10 \mu\text{m}$ ($\sim 5 \mu\text{m}$)	$5 \mu\text{m}$	$15 \mu\text{m}$
Simulation software	N/A	COMSOL-Multiphysics 3.2	COMSOL-Multiphysics 3.2
Cell Viability Test	N/A	Fluorescence dye - calcein AM	N/A
Type of cell entrapment	Active (Magnetic)	Passive	Passive
Remark*	Beads size	-	Depend on width of groove* / Inlet velocity of $5.2 \times 10^{-4} \text{ m/sec}^{**}$

ตารางที่ 2.1 วิธีการดักจับเซลล์ด้วยเทคนิคต่างๆ (ต่อ)

Author	Sara Lindstrom, Kiichiroh Mori, Toshiro Ohashi, Helene Andersson-Svahn	Nicholas Ferrell, Daniel Gallego-Perez, Natalia Higuera-Castro, Randall T. Butler, Rashmeet K. Reen, Keith J. Gooch, and Derek J. Hansford	Joong Yull Park, Mina Morgan, Aaron N. Sachs, Julia Samorezov, Ryan Teller, Ye Shen Kenneth J. Pienta, Shuichi Takayama
Title	A microwell array device with integrated microfluidic components for enhanced single-cell analysis	Vacuum-Assisted Cell Seeding in a Microwell Cell Culture System	Single cell trapping in larger microwells capable of supporting cell spreading and proliferation
Years	2009	2010	2010
Entrapment geometry	Rectangular microwells	Microwells: Circles, Squares, Hexagons	Triangular microwell
Type of particles	Calcein AM Cell	NIH 3T3 cells, THP-1 cells, PANC-1 cells	Human PC3 prostate cancer cells
Materials	PDMS	PDMS	PDMS
Efficiency	N/A	95%	62±10%
Cell suspension	N/A	100-600 cell/mm ²	1.5x10 ⁶ cells/mL
Feeding technique	Micro pump	Vacuum	Pump
Flow rate	1.3 ml/h	0.8-4 nl/min	0.18 ml/h for 5 min
Type of captured targets	Multiple	Single & Multiple	Single
Cell dimension	5 µm	NIH 3T3 cells, THP-1 cells < 15 µm / PANC-1 cells < 300 µm	10 µm
Simulation software	ANSYS 11.0 commercial code	N/A	FLUENT 6.3 (Fluent Inc., Canonsburg, PA)
Cell Viability Test	Fluorescence dye - calcein AM	Fluorescence dye	Observation
Type of cell entrapment	Passive	Passive	Passive
Remark*	-	-	-

ตารางที่ 2.1 วิธีการดักจับเซลล์ด้วยเทคนิคต่างๆ (ต่อ)

Author	Jing Zhu, Junyi Shang, Timothy Olsen, Kun Liu, David Brenner, Qiao Lin	Wilfred Espulgar, Yoshinori Yamaguchi, Wataru Aoki, Daiki Mita, Masato Saito, Jong-Kook Lee, Eiichi Tamiya	Yuki Yoshimura, Masahiro Tomita, Fumio Mizutani, and Tomoyuki Yasukawa
Title	A mechanically tunable microfluidic cell-trapping device	Single cell trapping and cell-cell interaction monitoring of cardiomyocytes in a designed microfluidic chip	Cell Pairing Using Microwell Array Electrodes Based on Dielectrophoretic
Years	2013	2014	2014
Entrapment geometry	Capture cup	Gaps between pillars	Rectangular microwells
Type of particles	MCF-7 cells, a human breast cancer cell line	rat cardiomyocyte	Mouse myeloma cells
Materials	PDMS	PDMS	p-DEP
Efficiency	Strain was applied: * Strain wasn't applied: **	70% - 80%	65-85%
Cell suspension	1×10^6 cells/mL	1×10^4 cells/mL	4×10^7 cells/ml
Feeding technique	Pump	Centrifuge	Drop cell
Flow rate	10 L/min for 1 min	N/A*	N/A
Type of captured targets	Single and Double	Single	Single
Cell dimension	N/A	12-15 μm	Cell: 12 μm / Beads: 16 μm
Simulation software	COMSOL Multiphysics®	N/A*	N/A
Cell Viability Test	Fluorescence dye: JC-1	Observation	Fluorescence dye
Type of cell entrapment	Passive	Passive	Active (Electric)
Remark*	* 41% single cell / 31% double cell **4% single cell / 24% double cell / 39% triple cell	*Applied MATLAB to compute beat rate(bpm) of cells	-

ตารางที่ 2.1 วิธีการดักจับเซลล์ด้วยเทคนิคต่างๆ (ต่อ)

Author	Lu Huang, Yin Chen, Yangfan Chen, and Hongkai Wu	Paola Occhetta, Mara Licini, Alberto Redaelli, Marco Rasponi	J. Pivetal, D. Royet, G. Ciuta, M. F. Robin, N. Haddour, N. M. Dempsey, F.Dumas-Bouchiat, P. Simonet
Title	Centrifugation-Assisted Single-Cell Trapping in a Truncated Cone-Shaped Microwell Array Chip for the Real-Time Observation of Cellular Apoptosis	Design of a microfluidic strategy for trapping and screening single cells	Micro-magnet arrays for specific single bacterial cell positioning
Years	2015	2015	2015
Entrapment geometry	Truncated Cone-Shaped Microwell	Circle microchamber	Micro-magnet arrays
Type of particles	HeLa (Human cervix adenocarcinoma cell line, CCL-2TM, ATCC) and HeLa-C3	Human cell line (Hela) & Polystyrene microspheres	E. coli bacterial cells & Superparamagnetic beads
Materials	PDMS	PDMS	Micro-magnet (NdFeB) film
Efficiency	90%	Cells: Single 36%, Multiple 4% / Microspheres (single particle): 70%±6.9%	N/A
Cell suspension	2×10^5 cells/mL*	2×10^5 cells/mL	10^8 cells/mL
Feeding technique	Centrifuge	Pump	Drop Cell
Flow rate	N/A	0.2 μ L/min for 2 min	N/A
Type of captured targets	Single	Single	Multiple
Cell dimension	10–20 μ m	Cell : 16 μ m / Beat : 10 μ m	50 nm*
Simulation software	N/A	CFD, COMSOL Multiphysics®	COMSOL
Cell Viability Test	Fluorescence dye: DAPI	N/A	Fluorescence dye
Type of cell entrapment	Passive	Passive	Active (Magnetic)
Remark*	5 ml suspension in syringe	There is Chaotic mixer Unit.	Beads size

2.3 สรุปผล

ระบบของไหลจุลภาค ถูกนำมาใช้ในงานด้านอนุภาคขนาดเล็กอย่างแพร่หลายในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากต้นทุนต่ำ แต่ให้ประสิทธิภาพที่ดี มากไปกว่านั้นยังมีจุดเด่นหลากหลายหน้าที่ เช่น สามารถคัดแยก ดักจับอนุภาคได้เป็นต้น ในส่วนการดักจับอนุภาคของงานวิจัยที่ผ่านมา ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนย่อย คือ การดักจับโดยอาศัยแรงภายนอก และ การดักจับที่ไม่อาศัยแรงภายนอก

การดักจับโดยใช้แรงภายนอก เช่น แรงแม่เหล็กหรือไฟฟ้า ซึ่งเป็นการดักจับในลักษณะจำเพาะ เช่น การดักจับเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรีย เม็ดเลือดแดงเหล่านี้จะมีความเป็นแม่เหล็กสูงกว่าปกติ อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยบางส่วนอ้างอิงการดักจับโดยอาศัยแรงจากไฟฟ้าว่าจะดักจับอนุภาคที่มีประจุเกือบทั้งหมด ต่างกับแรงที่เกิดจากแม่เหล็กที่ดักจับอนุภาคที่มีแม่เหล็กจำเพาะกับโครงสร้างที่ออกแบบไว้ ส่วนอีกประเภทคือการดักจับแบบไม่อาศัยแรงภายนอก เป็นการดักจับอนุภาคโดยอาศัยการไหลของของไหล ซึ่งเป็นตัวกลางนำอนุภาคไปยังเป้าหมายที่ออกแบบไว้ เช่น แบบร่องยาว แบบช่อง แบบห้องโพรง และแบบหลุม

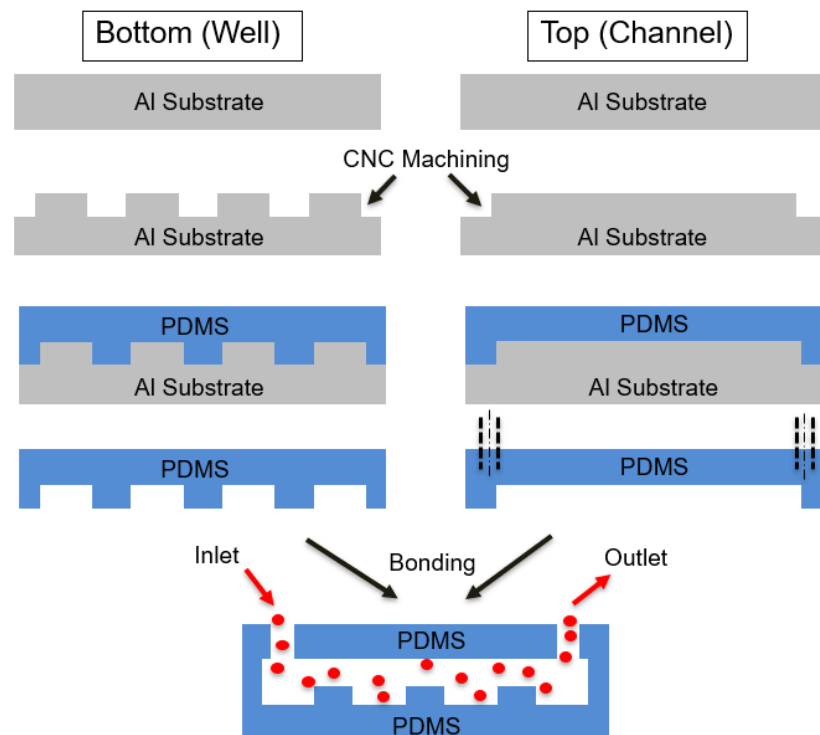
การดักจับที่ไม่อาศัยแรงภายนอกอาจเหมาะสมกับงานวิจัยนี้มากกว่าเพราะไม่มีแรงภายนอกกระทำ ส่งผลให้การทดลองไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางชีวภาพของอนุภาคทดสอบ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกศึกษาการดักจับอนุภาคภายในหลุมและเป็นหลุมจุลภาคทรงสามเหลี่ยม เนื่องจากมีระบบที่ไม่ซับซ้อนมากจนเกินไป และลักษณะการดักจับมีแนวโน้มที่จะควบคุมความหนาแน่นของอนุภาคได้ดีกว่า หากเทียบกับการดักจับแบบอื่น เช่น แบบร่อง เป็นต้น จากการค้นคว้างานวิจัยที่ศึกษาการดักจับในหลุมทรงสามเหลี่ยมที่ผ่านมาพบว่า ยังมีการศึกษากลไกของของไหลที่กระทำต่อหลุมน้อยมาก จึงอาจจะมีปัจจัยบางอย่างที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักจับหรือไม่อย่างไร เช่น การศึกษาหลุมสามเหลี่ยมต่างชนิดกัน

บทที่ 3 การศึกษาเบื้องต้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างและเตรียมอุปกรณ์ระบบของไหลจุลภาค อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง ขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น เก็บผลการทดลอง สรุปและวิเคราะห์ประเด็นที่น่าสนใจเบื้องต้นเกี่ยวกับการทดลองเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาและพัฒนาต่อไป

3.1 การสร้างระบบของไหลจุลภาค

การสร้างระบบของไหลจุลภาคเริ่มต้นจากการออกแบบชิ้นงานเพื่อสร้างแม่พิมพ์ที่มีลวดลายที่ต้องการ โดยช่องการไหลจุลภาคจะเกิดจากการประกบกันของ PDMS กับกระจกใสลัด หรือ โพลีเมอร์เหลว PDMS ด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการสร้างอุปกรณ์การไหลขนาดจุลภาค

3.1.1 การเตรียมโพลีเมอร์เหลว PDMS (Poly-dimethyl siloxane)

เทโพลีเมอร์เหลว PDMS ลงในถ้วยพลาสติก ผสมให้เข้ากันกับตัวเร่งปฏิกิริยาการแข็งตัวของโพลีเมอร์ (Curing Agent) ในอัตรา 10 : 1 ตามลำดับ จากนั้นใช้แท่งคนผสมให้เข้ากัน โดยสารผสมที่เตรียมนี้จะถูกนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการขึ้นรูปต่อไป อนึ่งของระบบของไหลจุลภาคจำนวนหนึ่งซึ่งประกอบด้วยส่วนบนและล่างประกบกันจะใช้โพลีเมอร์เหลวประมาณ 10-15 กรัม

3.1.2 การเตรียมแม่พิมพ์

ทีมผู้วิจัยเลือกใช้วัสดุอะลูมิเนียมต้นแบบในการทำเป็นแม่พิมพ์ ถูกสร้างลงดลายนผิวโดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า การควบคุมเชิงตัวเลขด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control ; CNC) เป็นการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกล ส่งผลให้ได้ชิ้นงานที่มีความถูกต้องแม่นยำ ใช้หัวกัดขนาดเล็กสุด 250 ไมครอน ซึ่งเครื่องจักรจะผลิตแบบตามซอฟต์แวร์ที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์ โดยจะกล่าวอย่างละเอียดในบทถัดไปมีข้อดีคือ ความแม่นยำของชิ้นงานสูง อย่างไรก็ตามการสร้างแม่พิมพ์ด้วยวิธีนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของราคา และหากแบบมีความละเอียดสูง (ขนาดต่ำกว่า 50 ไมครอน) ค่าใช้จ่ายจะสูงตามด้วย

3.1.3 การสร้างระบบของไหลจุลภาค

3.1.3.1 การขึ้นรูปชิ้นงาน

เมื่อได้แม่พิมพ์ที่มีลวดลายตามต้องการแล้วให้ทำความสะอาดแม่พิมพ์ด้วยสารละลาย IPA (Isopropyl alcohol) ตามด้วยน้ำปราศจากไอออนหลังจากนั้นนำแก๊สไนโตรเจนเป่าเศษน้ำที่ตกค้างในตัวแม่พิมพ์ออกจนหมด เทโพลีเมอร์เหลว PDMS ที่เตรียมไว้แล้วขึ้นต้นในหัวข้อ 3.1.1 เทลงไปในแม่พิมพ์อะลูมิเนียมจนของเหลวกระจายจนทั่วพื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์ จากนั้นนำไปใส่ตู้อบสุญญากาศเพื่อดูดฟองอากาศ (ต่ำกว่า -0.1 MPa) ที่เกิดในโพลีเมอร์เหลวจนหมด ต่อด้วยการอุ่นด้วยความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 10 - 15 นาที (โพลีเมอร์หนัก 5 - 10 กรัม) เพื่อให้โพลีเมอร์เริ่มแข็งตัว [19] เมื่อโพลีเมอร์เริ่มแข็งตัวดีแล้วทำการลอกโพลีเมอร์ออกจากแม่พิมพ์ และทำการตกแต่งขอบด้วยมีดขนาดเล็ก จะได้โพลีเมอร์หนึ่งด้าน ทำซ้ำเช่นเดียวกันกับโพลีเมอร์อีก

ด้าน จากนั้นใช้ตัวเจาะ เจาะรูบนโพลีเมอร์ด้านบนที่ปลายทั้งสองข้างเพื่อสร้างรูทางเข้าและทางออกเตรียมเพื่อใช้เป็นจุดเชื่อมต่อกับท่อทางเดินต่อไป

3.1.3.2 การประกบชิ้นงานเข้าหากัน

ดังกล่าวข้างต้น ชิ้นงานหนึ่งชิ้นประกอบด้วย ชิ้นงานย่อยด้านบนหนึ่งส่วน และ ด้านล่างหนึ่งส่วน ชิ้นงานทั้งคู่จะถูกมาประกบกันเพื่อสร้างเป็นช่องทางการไหลตามที่ได้ออกแบบไว้ ผ่านกรรมวิธีที่เรียกว่า การปรับสภาพผิวด้วยไอออนของก๊าซออกซิเจน (Oxygen plasma treatment) โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

- ใส่ถุงมือและตรวจสอบให้มั่นใจว่าผิวสัมผัสของชิ้นงาน PDMS ไม่มีรอยนิ้วมือหรือฝุ่นติดอยู่
- ใส่ชิ้นงาน PDMS เข้าไปในตู้ออกซิเจนพลาสมา โดยหันหน้าชิ้นงานที่ต้องการประกบกันให้หงายขึ้นเพื่อสัมผัสกับพลาสมา
- เปิดเครื่อง จนเครื่องเข้าอยู่ในโหมดสุญญากาศ ปรับปุ่มช่องของการไหลเข้าจนสีในตู้อบเปล่งแสงสีม่วงซึ่งเป็นผลจากการกำเนิดของพลาสมา จากนั้นทิ้งไว้ 3 นาที
- นำชิ้นงานออกและประกบเข้าหากันทันที โดยการปรับสภาพผิวของชิ้นงานสามารถใส่ชิ้นงานได้หลายชิ้นต่อการปรับผิวหนึ่งครั้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

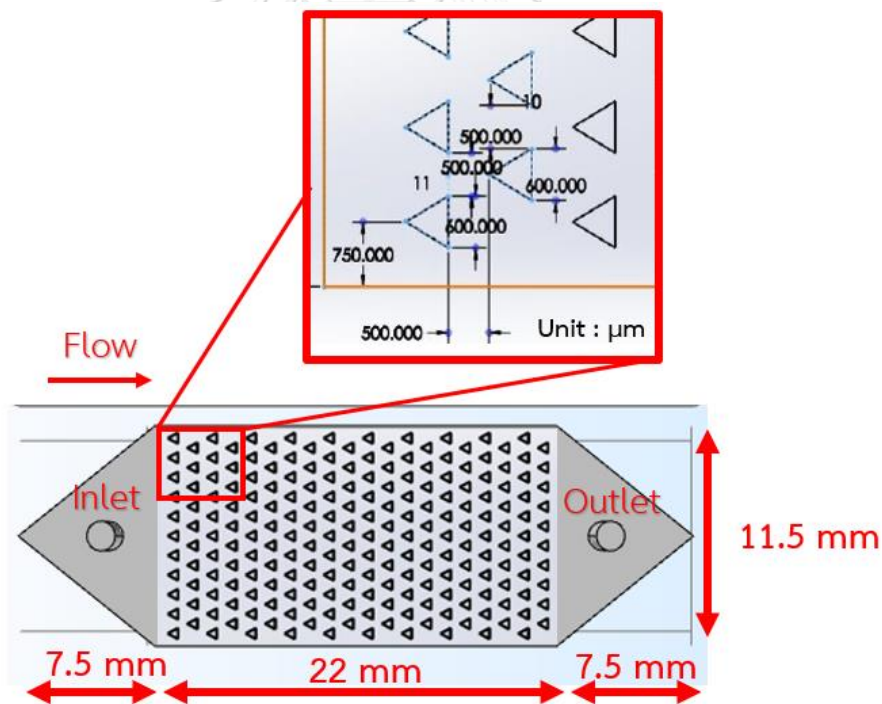
3.1.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของชิ้นงาน

สามารถตรวจสอบชิ้นงานที่พร้อมใช้งาน ผ่านการส่องกล้องขยายที่ทำการสอบเทียบเทียบแล้ว จากนั้นเข้าโหมดการวัดขนาดเพื่อเปรียบเทียบกับขนาดการออกแบบจริง

3.2 การเตรียมการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์สำหรับการบันทึกผล

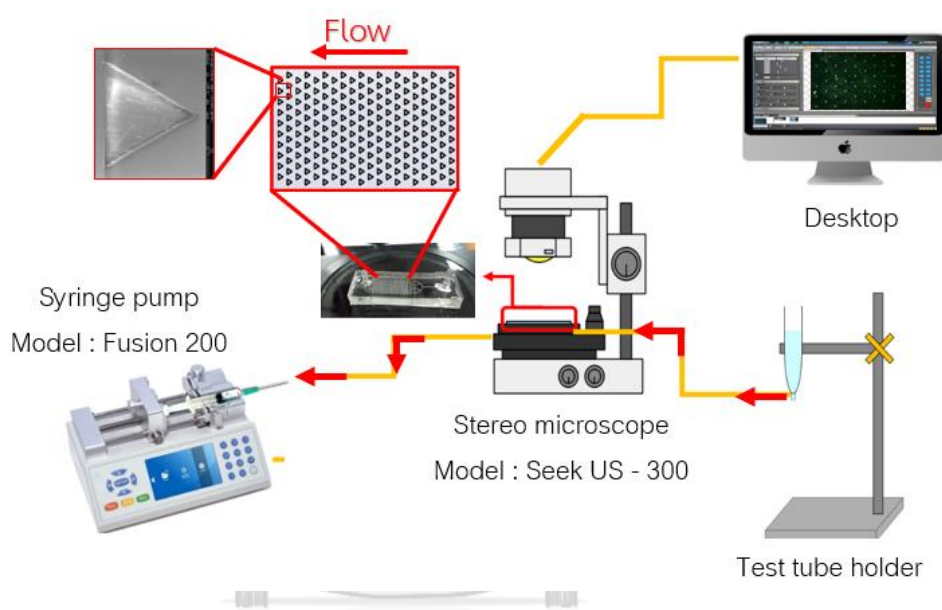
อุปกรณ์สำหรับการบันทึกผล คือ ระบบของไหลจุลภาคสำหรับการดักจับอนุภาคซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการพิจารณาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ภายในประกอบไปด้วยช่องทางเดินของของไหลโดยมีความกว้าง 11.5 mm ความสูง 350 μm และความยาว 22 mm ส่วนปลายฝั่งขาเข้าและออกของช่องทางเดินของของไหลถูกประกอบด้วยสามเหลี่ยมหน้าจั่วยื่นยาวออกมาตามแนวความยาว 7.5 mm เพื่อเป็นพื้นที่ในการเจาะและต่อท่อทางเข้าและออกดังแสดงในรูปที่ 3.2 สำหรับรองรับสารละลายที่ผสมกับเม็ดโพลีเมอร์ โดยการทดลองในส่วนช่องทางของของไหลจะมีชั้นล่างอีกชั้นซึ่งเป็นชั้นที่รวบรวมช่องการไหลแบบหลุมรูปทรงสามเหลี่ยมจุลภาคด้านเท่าขนาด 600 ไมโครเมตร ลึก 300 ไมโครเมตร รวมทั้งสิ้นจำนวน 200 หลุม



รูปที่ 3.2 ภาพรวมเส้นทางการไหลในอุปกรณ์ในระบบของไหลจุลภาค

3.2.2 อุปกรณ์ทดลองส่วนควบ

อุปกรณ์ทดลองส่วนควบคือ อุปกรณ์ที่เป็นส่วนช่วยในการทดลองทั้งหมดยกเว้น ระบบของไหลจุลภาคสำหรับการดักจับอนุภาค โดยอุปกรณ์ทดลองส่วนควบนี้ประกอบด้วย กล้องจุลทรรศน์ใช้ในการสังเกตการเคลื่อนที่และการดักจับของอนุภาคภายในระบบของไหลจุลภาค หลอดฉีดยาเพื่อบรรจุอนุภาคที่เตรียมไว้ ป้อนเพื่อสร้างความดันต่อระบบ และเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมระบบเข้ากับกล้องจุลทรรศน์เพื่อแสดงผล



รูปที่ 3.3 แผนผังภาพรวมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ระบบของไหลจุลภาคถูกต่อเข้ากับอุปกรณ์ส่วนควบดังรูปที่ 3.3 ใช้เทคนิคการดูดย้อนเป็นกลไกในการนำของไหลและอนุภาคเข้าสู่ระบบของไหลจุลภาค โดยมีขั้นตอนดังนี้

- สารละลายบัฟเฟอร์ PBS ค่อยๆถูกฉีดเข้าไปยังระบบของไหลจุลภาคด้วยมือเพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศจนมั่นใจว่ามีสารละลายทั่วทั้งช่องทางไหลและท่อทางเข้าและออก (อาจใช้มือช่วยบีบไล่ฟองอากาศเบาๆขณะฉีด) จากนั้นนำไปเข้าระบบสุญญากาศที่ความดันติดลบ 0.1 Mpa หรือต่ำกว่าเป็นเวลาประมาณ 1 ชม. เพื่อไล่ฟองบางส่วนออก

- สารละลายบัฟเฟอร์ถูกเตรียมโดยผสมสารลดแรงตึงผิว Tween20 4%v/v และอนุภาคพลาสติกขนาด 150 μm ที่ความเข้มข้น 30 50 และ 100 particles/ml จำนวน 10 ml อนึ่ง การใช้ไมโครปิเปตตูดอนุภาคในแต่ละครั้งควรทำอย่างรวดเร็วหลังจากทำการเหวี่ยงอนุภาค เพราะอาจทำให้ความเข้มข้นคลาดเคลื่อนเนื่องจากอนุภาคตกตะกอนเร็วมาก

- ท่อซิลิโคนถูกต่อเข้ากับข้อต่อเพื่อเตรียมเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์ทดสอบ

- ท่อฝั่งขาออกถูกเตรียมโดยนำหลอดฉีดยาเปล่าขนาด 10 ml ต่อกับท่อซิลิโคน จากนั้นติดตั้งบนปั๊มนำปลายอีกข้างหนึ่งของท่อซิลิโคนเสียบเข้าที่เสียบช่องทางออกของอุปกรณ์ทดสอบ

- ท่อฝั่งขาเข้าถูกเตรียมโดยนำปลายหลอดฉีดยาไม่บรรจุก้านต่อเข้ากับท่อซิลิโคน จับปลายยกขึ้นมาให้เท่ากับระดับในหลอดฉีดยาคลายวิธีวัดระดับน้ำ นำสารละลายบัฟเฟอร์ PBS ประมาณ 3 ml เข้าไปแทนที่อากาศในท่อ อาจใช้นิ้วดีดสายซิลิโคนจนฟองอากาศอยู่ในท่อลอยตัวหายไป ต่อด้วยนำสารละลายบัฟเฟอร์และอนุภาคพลาสติกที่เตรียมก่อนหน้าเข้าไปในหลอดฉีดยานั้น จากนั้นลดระดับหลอดฉีดยาลง นำปลายท่อจ่อเตรียมต่อเข้ากับท่อทางเข้าของอุปกรณ์ (สังเกตชั้นตอนนี้ปลายท่อจะมีอากาศเนื่องจากอยู่ระดับที่สูงกว่าหลอดฉีดยา) จากนั้นค่อยๆเพิ่มระดับหลอดฉีดยาขึ้นจนระดับน้ำเริ่มเต็มเต็มที่ปลายท่อ แล้วจึงต่อเข้ากับท่อทางเข้าของอุปกรณ์ ถึงจุดนี้ ของเหลวจะถูกเติมเต็มช่องของการไหลภายในระบบ และ ท่อทางเข้า โดยไม่มีฟองอากาศ

- เริ่มทำการทดลองโดยการเปิดปั๊มแบบดูดจนสารละลายบัฟเฟอร์และอนุภาคพลาสติกที่เตรียมไว้จนหมด 10 ml ภายใต้งैอนไข ความเข้มข้นและ อัตราการไหลที่กำหนด ดังแสดงในตารางที่ 3.1 พร้อมสังเกตปรากฏการณ์ ที่เกิดขึ้นผ่านกล้องจุลทรรศน์

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขสำหรับการทดลองการดักจับอนุภาค

Conditions			
No.	Flow rate [mL/hr]	Concentration [particles/mL]	Time [sec]
1	5	100	120
2	10	30	60
3	15	50	40
4	20	50	30

- บันทึกวีดีโอผลการทดลองด้วยกล้องจุลทรรศน์
- เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ทำการไล่ออนุภาคที่อาจลอยติดอยู่ในช่องการไหลแต่ไม่ได้ถูกดักจับภายในหลุมออก โดยการเพิ่มอัตราการไหลในช่วง 20 - 70 ml/hr พร้อมสังเกตว่าอนุภาคภายในหลุมหลุดออกมาหรือไม่อาจใช้การพลิกคว่ำอุปกรณ์เพื่อให้อนุภาคหลุดออกจากหลุมง่ายขึ้น จากนั้นใช้อุปกรณ์ชุดเดิมทำการทดลองต่อได้
- ภายใต้งี้อเนกประสงค์เดียวกัน ทำการทดลองซ้ำจากนั้นหาค่าเฉลี่ย
- วิเคราะห์ผลการทดลอง

3.4 การเก็บผลการทดลอง

เก็บภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Seek รุ่น US-300 บันทึกวีดีโอตลอดการทดลอง มีความละเอียด 2048 × 1536 พิกเซล

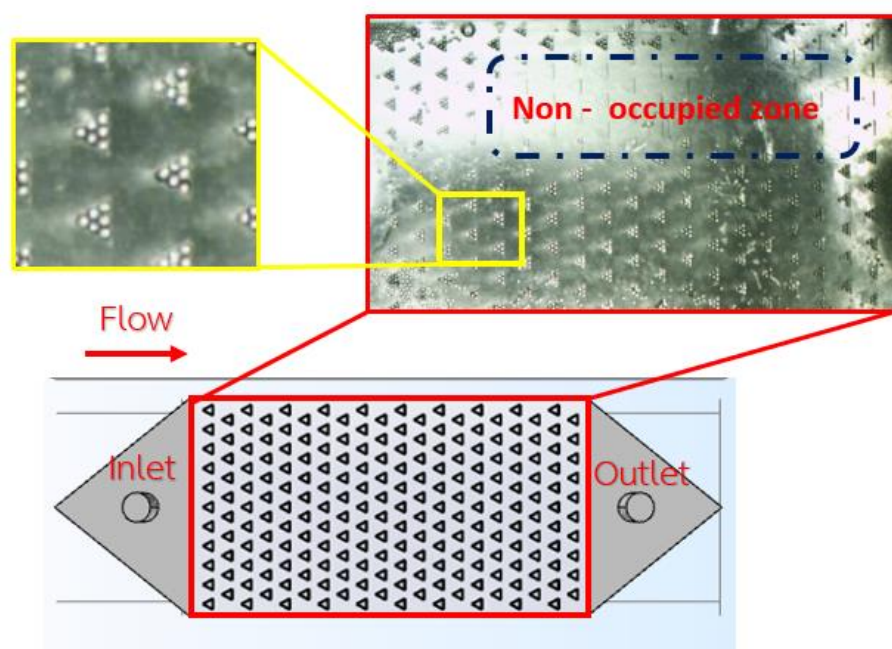
3.5 ผลการทดลอง

ในส่วนนี้อธิบายถึงการวิเคราะห์ผลจากภาพนิ่งที่ได้จากการทดลอง เริ่มจากการนับจำนวนอนุภาคที่ลงสู่หลุมและสังเกตช่วงการดักจับอนุภาคภายใต้งี้อเนกประสงค์ที่แตกต่างกันโดยเก็บข้อมูลจากภาพวีดีโอขณะการทดลอง

3.5.1 ผลการทดลองที่ความเข้มข้น 100 particles/ml

จากการทดลองที่ความเข้มข้น 100 particles/ml ที่อัตราการไหล 5 ml/hr พบว่า เมื่อจบการทดลองครบ 120 นาที ปรากฏว่าดักอนุภาคได้ 162 หลุมจาก 200 หลุมคิดเป็นร้อยละ 81 ของจำนวนหลุมทั้งหมด โดยแบ่งออกเป็นหลุมที่มีอนุภาคเดี่ยวจำนวน 8 หลุม หลุมที่มีอนุภาคคู่จำนวน 5 หลุม และ หลุมที่มีสามอนุภาคขึ้นไปจำนวน 149 หลุม ดังรูปที่ 3.4 จากผลพบว่าอนุภาคที่ผ่านหลุมจะตกลงสู่หลุมทั้งหมดและหลุมที่มีสามอนุภาคขึ้นไปมีจำนวนสูงมาก มีความเป็นไปได้ว่าเกิดจากอัตราการไหลที่ช้าและสารบัพเฟอร์เม็ดพลาสติกมีความเข้มข้นมากเกินไปส่งผลให้อนุภาคถูกดักจับจนแน่นหลุมมากไปกว่านั้นพบว่าบริเวณการดักจับอนุภาคจะอยู่บริเวณขอบชิ้นงาน การทดลองต่อไป

จึงลดความเข้มข้นลงเหลือ 30 - 50 particles / ml และเพิ่มอัตราการไหล 2 เท่า ในการทดลองครั้งต่อไป และบริเวณการดักจับอนุภาคจะอยู่บริเวณขอบชิ้นงาน



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงการดักจับอนุภาคเงื่อนไข ความเข้มข้น 100 particles/ml ที่อัตราการไหล 5 ml/hr

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

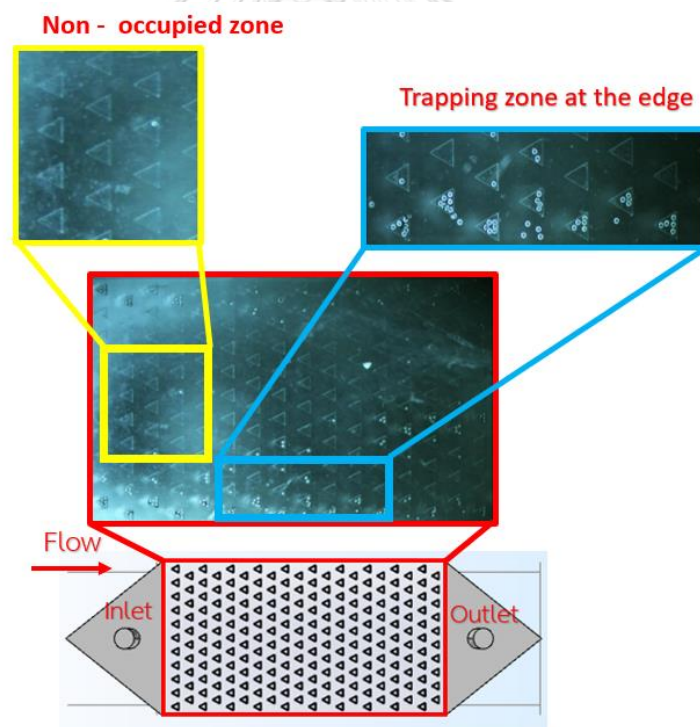
3.5.2 ผลการทดลองที่ความเข้มข้น 30 particles / ml

การทดลองที่ความเข้มข้น 30 particles / ml ที่อัตราการไหล 10ml/hr พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20 นาที มีกลุ่มอนุภาคดังกล่าวไหลมาทางขอบด้านบนมากกว่า (ไม่สม่ำเสมอทั้งหน้าตัด) เมื่อจบการทดลองครบ 60 นาที ปรากฏว่าดักอนุภาคได้ 51 หลุมจาก 200 หลุมคิดเป็นร้อยละ 25.5 ของจำนวนอนุภาคทั้งหมด โดยแบ่งออกเป็นหลุมที่มีอนุภาคเดี่ยวจำนวน 26 หลุม หลุมที่มีอนุภาคคู่จำนวน 12 หลุม และ หลุมที่มีสามอนุภาคขึ้นไปจำนวน 13 หลุม และพบว่าบริเวณการดักจับอนุภาคจะอยู่บริเวณขอบชิ้นงานเหมือนกัน จากผลสามารถวิเคราะห์ได้ว่าความเข้มข้น 30 particles / ml มีแนวโน้มที่ต่ำเกินไปสำหรับการทดลองเนื่องจากจำนวนหลุมและอนุภาคที่ถูกดักจับเมื่อคำนวณเป็น

เปอร์เซ็นต์แล้วอยู่ในเกณฑ์ต่ำ จึงเพิ่มความเข้มข้นเป็น 50 particles / ml ซึ่งเป็นค่าระหว่างความเข้มข้นสองค่าข้างต้นพร้อมปรับเปลี่ยนอัตราการไหลในการทดลองครั้งต่อไป

3.5.3 ผลการทดลองที่ความเข้มข้น 50 particles/ml

การทดลองที่ความเข้มข้น 50 particles / ml ที่อัตราการไหล 15 ml/hr และ 20 ml/hr เมื่อจบการทดลองครบ 40 นาทีที่อัตราการไหล 15 ml/hr ปรากฏว่าดักอนุภาคได้ 90 หลุมจาก 200 หลุมคิดเป็นร้อยละ 45 ของจำนวนหลุมทั้งหมด โดยแบ่งออกเป็นหลุมที่มีอนุภาคเดี่ยวจำนวน 40 หลุม หลุมที่มีอนุภาคคู่จำนวน 15 หลุม และ หลุมที่มีสามอนุภาคขึ้นไปจำนวน 35 หลุม อย่างไรก็ตามบริเวณการดักจับอนุภาคยังคงอยู่ตำแหน่งขอบชิ้นงานดังรูปที่ 3.5

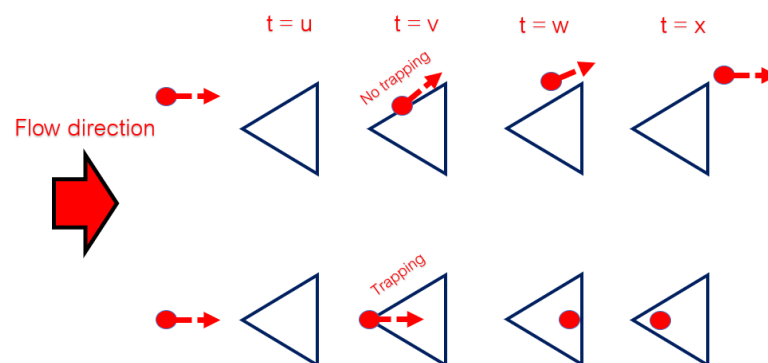


รูปที่ 3.5 ภาพแสดงการดักจับอนุภาคเงื่อนไข ความเข้มข้น 50 particles / ml ที่อัตราการไหล 15ml/hr

สำหรับการทดลองที่ความเข้มข้น 50 particles / ml ที่อัตราการไหล 20 ml/hr พบว่าเมื่อทดลองครบ 30 นาที อุปกรณ์สามารถดักอนุภาคได้ 159 หลุมจาก 200 หลุมคิดเป็นร้อยละ 79.5 ของจำนวนหลุมทั้งหมด โดยแบ่งออกเป็นหลุมที่มีอนุภาคเดียวจำนวน 23 หลุม หลุมที่มีอนุภาคคู่จำนวน 11 หลุม และหลุมที่มีสามอนุภาคขึ้นไปจำนวน 27 หลุม บริเวณการดักจับอนุภาคยังคงอยู่บริเวณขอบชิ้นงาน ผลลัพธ์จากการทดลองที่อัตราการไหล 15 และ 20 ml/hr ยังพบว่าที่อัตราการไหล 20 ml/hr ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อผ่านด้านข้างเอียงสามเหลี่ยมแล้วดึงออกโดยไม่หล่นลงไปหลุมเป็นเช่นนี้เรื่อยไปในทุกหลุมตามแนวเส้นทางการไหล อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านกลางหลุมเท่านั้นจะถูกดักจับดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยจะแตกต่างจากการทดลองที่ใช้อัตราการไหล 15 ml/hr ที่พบว่าอนุภาคส่วนใหญ่ที่ผ่านหลุมไม่ว่าจะเป็นส่วนไหนจะถูกดักลงสู่ก้นหลุมทั้งหมด

การที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านกึ่งกลางสามเหลี่ยมแล้วถูกดักจับและเคลื่อนที่ผ่านขอบเอียงสามเหลี่ยมแล้วถูกดักจับด้วยในกรณีนี้ที่อัตราการไหลต่ำกว่าสามารถสรุปได้ว่าการที่อนุภาคเคลื่อนที่ลงสู่หลุมอาจเกิดจากอิทธิพล 2 ประการคือกลไกการไหลที่ดึงอนุภาคลงสู่หลุมและผลักดันออกจากขอบเอียงอันเกิดจากแรงของของไหล (hydrodynamic force) ในกรณีอัตราการไหล 20 ml/hr และอิทธิพลการเคลื่อนที่ลงหลุมจากแรงที่เกิดจากความหนาแน่นของตัวอนุภาคเอง (gravitational force) ในกรณีอัตราการไหล 15 ml/hr ที่อนุภาคเคลื่อนที่ลงหลุมแม้ในกรณีเคลื่อนที่ผ่านขอบเอียง

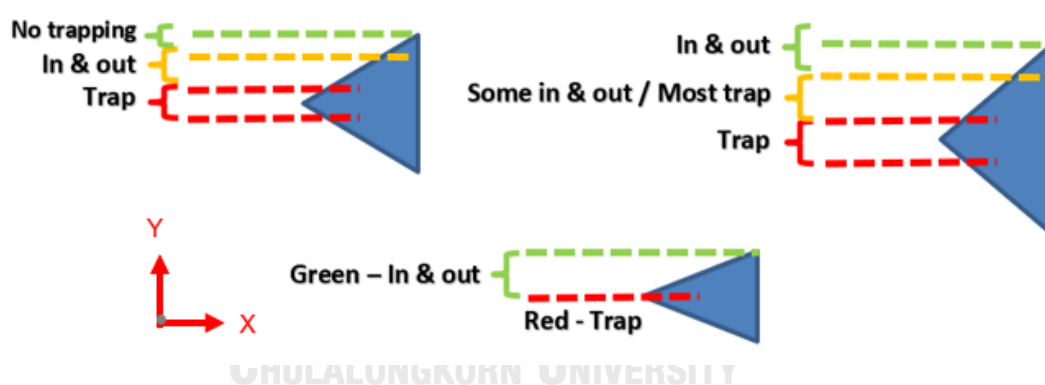
เนื่องจากอนุภาคส่วนใหญ่ถูกดักจับบริเวณกลางหลุมสามเหลี่ยมแต่อนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านขอบเอียงสามเหลี่ยมจะถูกตัวดักด้วยเหตุนี้จึงมีความสนใจอิทธิพลของมุมภายในสามเหลี่ยมซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเดี่ยวได้ โดยได้ทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน และเพิ่มอัตราการไหลสูงขึ้นเป็น 35 ml/hr เพื่อความชัดเจนของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.6 ความเป็นไปได้ในการดักจับอนุภาคเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านหลุมที่ตำแหน่งต่างกัน

3.5.4 ผลการทดลองการดักจับอนุภาคภายในหลุมสามเหลี่ยมสามรูปแบบ

การทดลองการดักจับอนุภาคภายในหลุมจุลภาคสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้านที่อัตราการไหล 35 ml/hr เพื่อศึกษาช่วงของการดักจับอนุภาคภายในหลุมทั้งสามแบบผ่านวิดีโอที่ได้จากการทดลองพบว่าอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณกึ่งกลางของมุมยอดสามเหลี่ยมทั้งสามรูปแบบมีแนวโน้มดักจับอนุภาคได้ดีกว่าหากอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านขอบสามเหลี่ยมดังรูปที่ 3.7 ความเป็นไปได้ในการดักจับอนุภาคเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านหลุมที่ตำแหน่งต่างกันของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน โดยเส้นสีแดง สีเหลือง และ สีเขียวแสดงถึงช่วงการดักจับอนุภาคสู่หลุม ช่วงที่อนุภาคเคลื่อนที่ลงหลุมแล้วตัวดักออกและช่วงที่อนุภาคไม่เคลื่อนที่ลงหลุมเลยตามลำดับ พบว่าสามเหลี่ยมมุมแหลมมีช่วงการดักจับที่แคบที่สุดรองลงมาคือสามเหลี่ยมมุมเท่า และสามเหลี่ยมมุมป้านตามลำดับ อย่างไรก็ตามอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านขอบเอียงของสามเหลี่ยมมุมป้านเพียงรูปแบบเดียวมีโอกาสดักจับอนุภาคได้



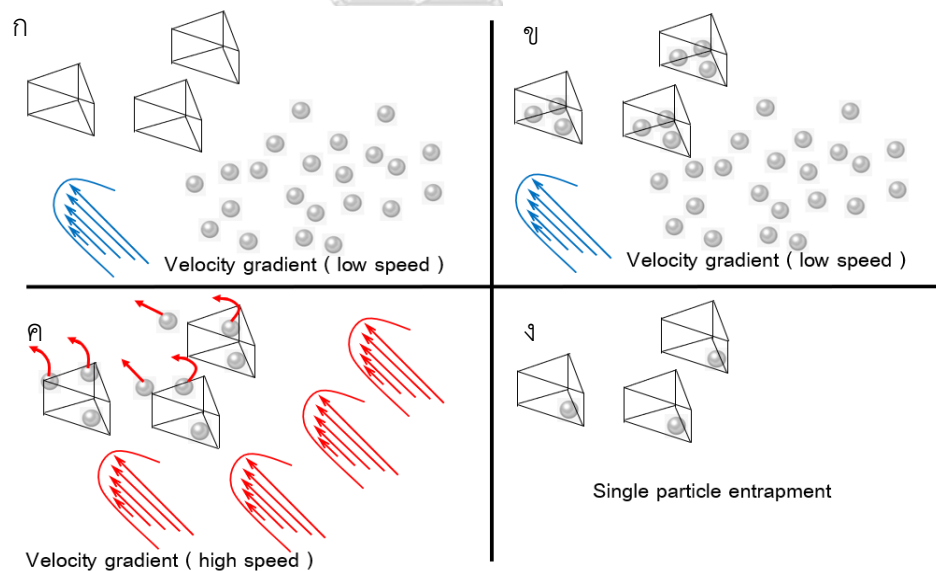
รูปที่ 3.7 ความเป็นไปได้ในการดักจับอนุภาคเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านหลุมที่ตำแหน่งต่างกันของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน

จากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคพลาสติกเดี่ยวภายในหลุมมีความเป็นไปได้ต่ำเนื่องจากสองสาเหตุหลักคือ ระบบช่องการไหลหลักที่กระจายรูปแบบการไหลไม่สม่ำเสมอส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่ไม่สม่ำเสมอทั่วพื้นที่หน้าตัดด้วยและเงื่อนไขความหนาแน่นสูงของอนุภาคพลาสติกขนาด 150 μm ซึ่งจะมีอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงอันเกิดจากความหนาแน่นของตัวอนุภาคเองสูงกว่าแรงการเคลื่อนที่ของของไหลดังกล่าวจนกว่าจะเกิดการดักจับอนุภาคภายในหลุม

อาจเกิดจากค่าแรงโน้มถ่วงจากน้ำหนักอนุภาคไม่ใช่กลไกการไหลที่กระทำต่อหลุมสามเหลี่ยม กล่าวคือหลุมสามารถดักจับอนุภาคได้ต่อเนื่องจนกว่าจะเต็มหลุมในกรณีอัตราเร็วต่ำ

ด้วยเหตุผลดังกล่าวหากต้องการศึกษาการดักจับอนุภาคเดี่ยวจึงต้องพิจารณารูปแบบการดักจับโดยแยกอิทธิพลของแรงทั้งสองออกจากกันเสียก่อน ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดปรับรูปแบบนิยามการดักจับอนุภาคโดยเริ่มจากการดักจับอนุภาคให้เต็มหลุมทุกหลุมด้วยแรงโน้มถ่วงอันเกิดจากความหนาแน่นของตัวอนุภาคเองก่อน (อัตราการไหลต่ำ) ดังรูปที่ 3.8ก-ข จากนั้นเพิ่มอัตราการไหลที่สูงมากขึ้นเพื่อเพิ่มแรงการเคลื่อนที่ของของไหลจนผลักดันอนุภาคให้หลุดออกจากหลุมจนกลายเป็นอนุภาคเดี่ยวดังรูปที่ 3.8ค-ง

ในบทที่ 4 จึงได้มีการศึกษาการจำลองการไหลเกี่ยวกับรูปแบบช่องการไหลต่างกันเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบใหม่ที่สามารถกระจายการไหลได้อย่างสม่ำเสมอ อีกทั้งยังศึกษาหลักการไหลที่กระทำต่อหลุมสามเหลี่ยมสามชนิดเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่อาจส่งผลต่อการผลักดันอนุภาคออกจากหลุมจนเหลืออนุภาคเดี่ยวต่อไป



รูปที่ 3.8 ลำดับการดักจับอนุภาคเดี่ยวภายในหลุมเริ่มจากขั้นตอน (ก) ถึง (ง) ตามลำดับโดย (ก) การเริ่มดักจับอนุภาคโดยอัตราการไหลต่ำ, (ข) อนุภาคถูกดักจับจนแน่นเต็มหลุม, (ค) ใช้อัตราการไหลสูงดันอนุภาคบางส่วนออกจากหลุม, (ง) ดักจับอนุภาคเดี่ยวภายในหลุม

3.6 สรุปผล

ในบทที่สามเป็นการกล่าวนำขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ รวมไปถึงการทดลองเบื้องต้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับการสร้างอุปกรณ์ของของไหลระบบจุลภาค การวางแผนหารูปแบบ และเงื่อนไขการทดลอง และการปรับปรุงแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต โดยทั่วไปแล้ว อุปกรณ์ในระบบของไหลจุลภาคมักถูกสร้างขึ้นมาจากการแข็งตัวของวัสดุโพลีเมอร์ PDMS ผ่านตัวแบบแม่พิมพ์ที่ถูกสร้างลวดลาย จากนั้นนำวัสดุโพลีเมอร์ที่ได้ทำการเชื่อมประสานติดกันเพื่อก่อให้เกิดช่องทางการไหล ต่อด้วยการเตรียมการทดลองโดยใช้หลักการดูดย้อนกลับ

จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมกับสภาวะระบบนี้อยู่ที่ 50 particles/ml เพราะเป็นช่วงความเข้มข้นที่ทำให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพดักจับมากที่สุดและง่ายต่อการศึกษาและพบว่าอัตราการไหลที่มีค่าสูงเกินไปอาจพัดพาอนุภาคหลุดออกจากหลุมสามเหลี่ยม ในขณะที่อัตราการไหลที่ต่ำเกินไปอาจดักจับอนุภาคที่มากเกินไปเช่นกัน โดยอนุภาคที่เคลื่อนผ่านกลางหลุมมีโอกาสถูกดักจับมากที่สุดส่วนอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านขอบจะเคลื่อนที่หลุดออกไป โดยสามเหลี่ยมมุมแหลมมีช่วงการดักจับอนุภาคที่แคบที่สุด อย่างไรก็ตามตำแหน่งของหลุมที่ดักจับอนุภาคได้ส่วนใหญ่แล้วจะอยู่บริเวณขอบของของทางการไหลของอุปกรณ์ ส่งผลให้พื้นที่ตำแหน่งกลาง ไม่มีการดักจับอนุภาคมากไปกว่านั้นยังพบว่าหลุมสามารถดักจับอนุภาคได้ต่อเนื่องจนกว่าอนุภาคจะเต็มหลุมซึ่งหากต้องการดักจับอนุภาคเดี่ยวอาจต้องเปลี่ยนรูปแบบนิยามการดักจับอนุภาค กล่าวคือดักจับอนุภาคจนเต็มหลุมก่อนจากนั้นใช้อัตราการไหลสูงผลักดันอนุภาคออกจนเหลืออนุภาคเดี่ยว

จากการทดลองดังกล่าวข้างต้นสามารถยืนยันได้ว่า อุปกรณ์ในระบบของไหลจุลภาคที่สร้างขึ้น สามารถทำการทดสอบและเก็บผลได้จริง ทั้งนี้ได้มีการกล่าวถึงการออกแบบใหม่ รวมไปถึงการสร้างโมเดลจำลองการไหลอย่างละเอียดในบทถัดไป เพื่อศึกษาเส้นทางการไหลของของไหลและกลไกการไหลบริเวณหลุมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับ

บทที่ 4

กระบวนการจำลองการไหลและการออกแบบ

บทนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการออกแบบระบบและการจำลองการไหลโดยใช้คอมพิวเตอร์ แบ่งออกเป็นสามหัวข้อใหญ่ๆคือ การจำลองการไหลเบื้องต้น การออกแบบระบบและสรุปผล ส่วนแรกเป็นการออกแบบระบบหรือช่องทางการไหลเพื่อนำแบบไปสร้างเป็นแม่พิมพ์ต้นแบบ ซึ่งถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรมเขียนแบบ Solidwork® 2015 ส่วนที่สองเป็นการจำลองการไหลเบื้องต้นโดยใช้โปรแกรมจำลองการไหลด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics® version 5.3 ภายใต้คุณสมบัติและเงื่อนไขข้อกำหนดต่างๆ และเปรียบเทียบความแตกต่างของแบบเก่าและแบบใหม่ นำผลลัพธ์มาวิเคราะห์และสรุปเพื่อหาเงื่อนไขที่ส่งผลให้การทดลองมีประสิทธิภาพและต่อบัณฑิตุประสงค์มากที่สุด อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการตีกรอบตัวแปรการศึกษาต่างๆให้แคบลง เพื่อลดระยะเวลา และค่าใช้จ่ายในการสร้างชิ้นงานรวมไปถึงการทดลองจริง

4.1 การจำลองการไหลเบื้องต้น

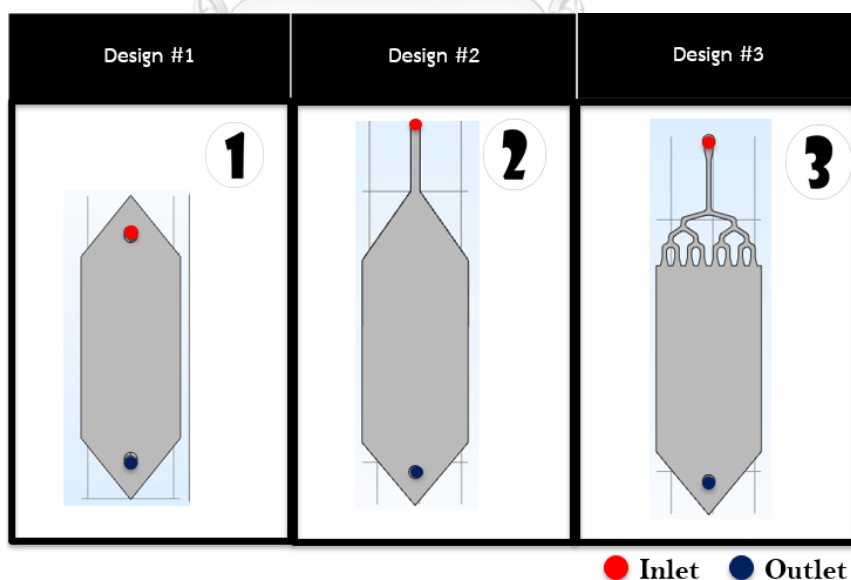
ปัจจุบันได้มีโปรแกรมสำเร็จรูปทางการค้ามากมายที่ใช้สำหรับการจำลองการไหลของของไหล เช่น โปรแกรม COMSOL Multiphysics® และ ANSYS® ซึ่งมีความสะดวกต่อการใช้งานเป็นอย่างมาก เป็นที่นิยมสำหรับวิศวกรและนักออกแบบทั่วไปเพื่อ ศึกษาแนวโน้มของของไหลภายในระบบที่ออกแบบแทนการทดลองจริง นำมาสู่การประหยัดเวลาและงบประมาณการศึกษาเป็น อย่างไรก็ตาม การใช้โปรแกรมจำลองการไหลอาจเป็นดาบสองคมหากใช้บนพื้นฐานความไม่เข้าใจที่มาซึ่งผลลัพธ์ เนื่องจากการใส่ค่าตั้งต้นที่ผิดคอมพิวเตอร์นั้นย่อมสามารถให้ผลลัพธ์ได้เช่นเดียวกัน ซึ่งผลลัพธ์นั้นก็คือผลลัพธ์ที่ผิดดังคำกล่าวที่ว่า Garbage In, Garbage Out (GIGO) ในสำนวนภาษาอังกฤษ ดังนั้น ผู้ใช้จึงควรตระหนักว่า เราควรใช้ความรู้พื้นฐานในวิชาเชิงวิศวกรรม เช่น ศาสตร์ Finite element และ Computational fluid dynamic (CFD) ควบคู่กับการใช้โปรแกรมไปด้วยเสมอเพื่อความเข้าใจ ที่มาของผลลัพธ์อันนำไปสู่การใช้งานที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ทั้งนี้โปรแกรมจำลองการไหล COMSOL Multiphysics® จะถูกนำมากล่าวถึงโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 รูปทรงเรขาคณิต

โมเดลสามมิติโดยสามารถวาดผ่านโปรแกรมจำลองการไหลโดยตรง หรือ วาดแบบผ่านโปรแกรมเขียนแบบแล้วนำเข้าสู่โปรแกรมจำลองการไหลภายหลัง ดังภาคผนวก ก และ ข ตามลำดับ โดยจะแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ รูปทรงเรขาคณิตช่องการไหลหลักและรูปทรงเรขาคณิตหลุมสามเหลี่ยม

4.1.1.1 รูปทรงเรขาคณิตช่องการไหล

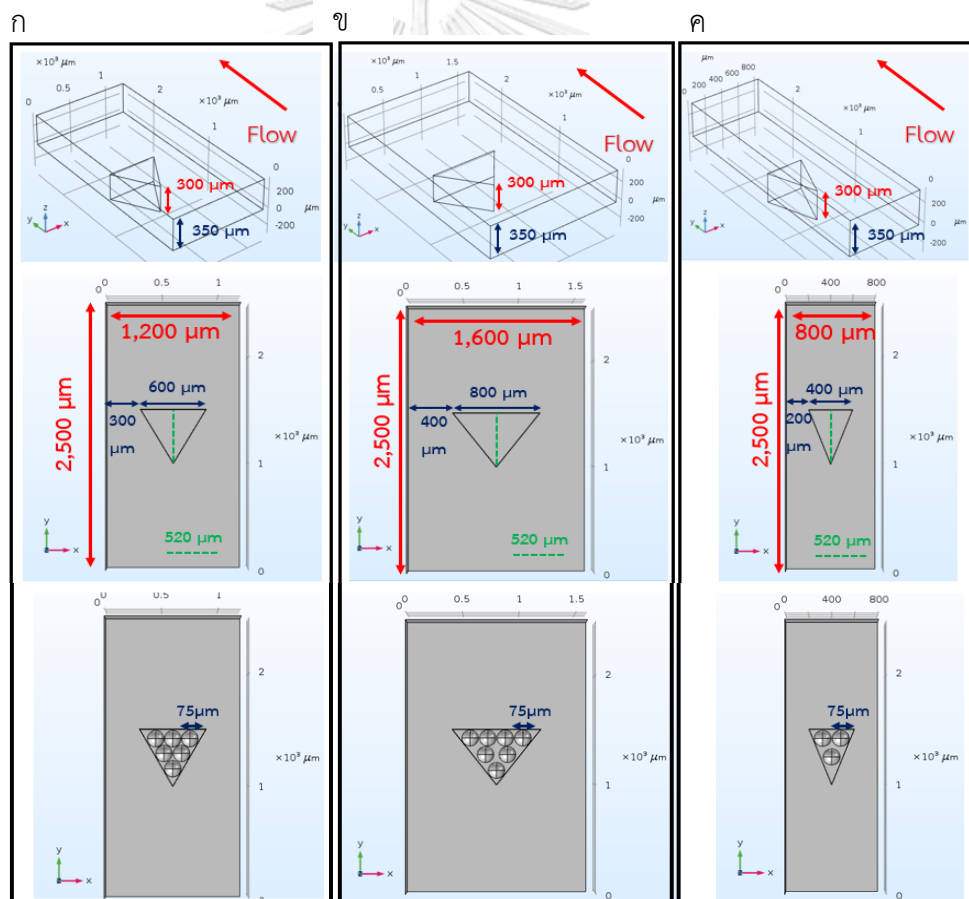
โมเดลช่องการไหลหลักจุลภาคถูกแบ่งพิจารณาออกเป็น 3 รูปแบบดังนี้รูปแบบที่ 1 ช่องการไหลทางเข้าแบบสามเหลี่ยมและมีท่อต่อตรงจากด้านบน รูปแบบที่ 2 ช่องการไหลทางเข้าแบบสามเหลี่ยมและมีท่อต่อตรงจากด้านหน้าและรูปแบบที่ 3 ช่องการไหลทางเข้าแบบท่อแยกและมีท่อต่อตรงจากด้านหน้าดังแสดงในรูปที่ 4.1 รูปแบบที่ 1 และ 2 มีช่องการไหลหลักมีความกว้าง 11.5 mm และ ความยาว 22 mm สำหรับกรณีรูปแบบที่ 3 มีช่องการไหลหลักมีความกว้าง 12.52 mm และ ความยาว 22 mm จุดสีแดงและสีน้ำเงินแสดงช่องการไหลขาเข้าและขาออกตามลำดับ



รูปที่ 4.1 รูปทรงเรขาคณิตช่องการไหลหลักจุลภาค

4.1.1.2 รูปทรงเรขาคณิตหลุมสามเหลี่ยม

หลุมสามเหลี่ยมมีมุมภายในต่างกัน 3 รูปแบบ คือ สามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้านและแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบย่อย คือ โมเดลที่เป็นหลุมเปล่าและโมเดลที่มีอนุภาคอัดแน่นภายในหลุม โดยหลุมมีความลึก 300 μm ความยาวลักษณะจำเพาะ 520 μm และความยาวฐาน 600 400 800 μm ตามลำดับ ปากหลุมเชื่อมติดบริเวณผิวล่างกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งทำหน้าที่แทนช่องการไหลมีความหนา 350 μm และมีความยาว 1,200 μm โดยความกว้างของช่องการไหลหลักมีความกว้าง 1,200 800 1,600 μm สำหรับโมเดลสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้านตามลำดับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคภายในหลุมยาว 75 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โมเดลจำลองการไหลเรขาคณิตหลุมจุลภาคสำหรับ (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมป้าน, (ค) สามเหลี่ยมมุมแหลม

4.1.2 การกำหนดคุณสมบัติ

การจำลองการไหลภายในระบบนี้ ของไหลจะถูกกำหนดเป็น น้ำบริสุทธิ์ (ความหนาแน่น 998.2 kg/m³, ความหนืด 0.001 kg/m s) และกำหนดให้การไหลเป็นแบบราบเรียบ ดังได้กล่าวในภาคผนวกหมวด ค

4.1.3 การกำหนดเงื่อนไข

การกำหนดเงื่อนไขที่ใกล้เคียงกับสภาวะการทดลองจริง ส่งผลให้ผลลัพธ์การคำนวณที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดลองมากขึ้น อีกทั้งการกำหนดเงื่อนไขที่ดียังสามารถลดระยะเวลาการคำนวณโดยมีความแม่นยำของผลลัพธ์คงเดิม โดยจะแบ่งการกำหนดเงื่อนไขออกเป็น 2 หัวข้อได้แก่ หัวข้อการไหลแบบราบเรียบและการตั้งค่าเมช

4.1.3.1 การกำหนดเงื่อนไขการไหลแบบราบเรียบ

การกำหนดเงื่อนไขการไหลแบบราบเรียบแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อย่อยดังนี้ Wall, Inlet, Symmetry และ Outlet ตามลำดับ ซึ่งแต่ละหัวข้อย่อยนี้เกิดจากการคลิกขวาในหัวข้อ Laminar flow จากนั้นเลือกหัวข้อย่อยดังกล่าว

- Wall เป็นการกำหนดขอบผนังของระบบ ในส่วนนี้ระบุให้ผนังเป็นแบบไม่มีการลื่นไถล (No slip condition)

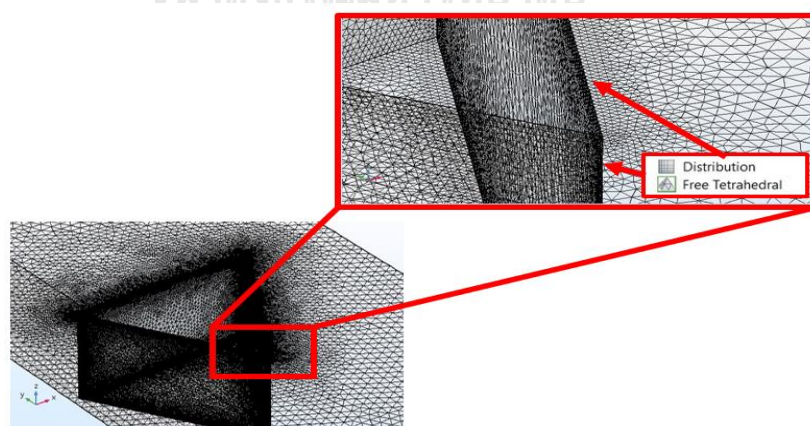
- Inlet เป็นการกำหนดพื้นผิวทางเข้าของของไหล โดยกำหนดในรูปแบบความเร็วคงที่โดยมีอัตราการไหลเท่ากับ 35 และ 350 ml/hr และเป็นกรไหลที่พัฒนาสมบูรณ์ (Fully develop) นับตั้งแต่ทางเข้า

- Symmetry เป็นการกำหนดความสมมาตรให้แก่ระบบในตำแหน่งขอบ มีความจำเป็นอย่างมากสำหรับการระบบที่มีความสมมาตรอยู่แล้วโดยการวาดแบบเพียงแค่ครึ่งเดียวแล้วกำหนดว่าขอบนั้นมีความสมมาตร ระบบจะรับรู้เปรียบเสมือนว่าเป็นภาพสะท้อน (Mirror) เต็มทั้งระบบ แม้ว่ารูปจะถูกวาดเพียงครึ่งเดียว มีข้อดีคือประหยัดเวลา และลดจำนวนเอลิเมนต์ของเมชกว่าเท่าตัว

- Outlet เป็นการกำหนดพื้นผิวทางออกของของไหล กำหนดให้การไหลทางออกมีลักษณะตั้งฉากกับผิวทางออก (Normal flow) และ ไม่ให้มีการไหลย้อนกลับ ณ.ตำแหน่งนี้ (Suppress back flow)

4.1.3.2 การกำหนดเงื่อนไขการตั้งค่าเมช

การกำหนดเมชจะทำการกำหนดความละเอียดเมชของภาพรวมระบบในหัวข้อ Finer และ กำหนดความละเอียดเมชในหลุมสูงกว่าบริเวณช่องทางเดินของของไหลเนื่องจากบริเวณหลุมเป็นจุดสนใจและเป็นจุดสำคัญในการพิจารณาการไหล โดยการกำหนดการกระจายตัวของเมชเพิ่มขึ้นมาเพิ่มบนขอบของหลุมสามเหลี่ยม ส่งผลให้จำนวนเอลิเมนต์ของเมช ณ บริเวณนั้นมีความหนาแน่นมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.3 จากนั้นทำการศึกษาให้มั่นใจว่าการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์จากเงื่อนไขนี้แทบจะไม่ส่งผลต่อผลการคำนวณอีกต่อไป (Grid independent study) เพื่อยืนยันว่าผลลัพธ์ที่ได้และจำนวนเอลิเมนต์ที่มี อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมและเชื่อถือได้ต่อการวิเคราะห์ต่อไป โดยจำนวนเมชของโมเดลอยู่ที่ประมาณ 1,800,000 – 2,000,000 เอลิเมนต์สำหรับกรณีโดเมนหลุม และ 500,000 – 700,000 เอลิเมนต์สำหรับกรณีช่องการไหล อย่างไรก็ตามการใช้คำสั่งกำหนดการกระจายตัวของเมชอาจส่งผลต่อเมชที่อยู่ตำแหน่งติดกันแต่มีขนาดของเมชแตกต่างกันมากเกินไปทำให้การคำนวณมีผลคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงได้

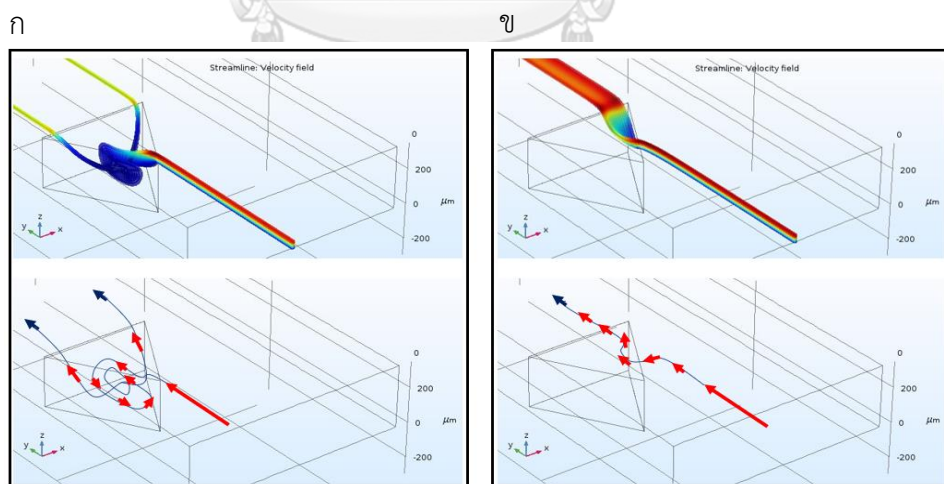


รูปที่ 4.3 รูปแบบความละเอียดของการติเมช โดยเส้นสีฟ้าของภาพขยายทางด้านขวาเป็นส่วนของการเพิ่มความหนาแน่นของเมชด้วยคำสั่ง Mesh distribution

4.1.4 ผลของการจำลองการไหล

ผลจากการจำลองการไหลใช้การแสดงผลผ่านการพล็อตเส้นการไหล (Streamlines) และเส้นสีแสดงเค้าโครง (Contour) ของการหมุนวน (Vorticity) ภายในหลุมและช่องการไหล พบว่ากำหนดอัตราเร็วขาเข้าของของไหลมากกว่าและน้อยกว่า 35 ml/hr อยู่ 10 เท่า ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของการไหลภายในช่องการไหลหลัก กลไกการไหลผ่านหลุมแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การไหลเปลี่ยนทิศทางการไหลลงหลุมฝั่งด้านหน้าจากนั้นวกกลับออกจากหลุมด้านหลัง ดังรูปที่ 4.4ก ซึ่งการไหลลงสู่หลุมเป็นกลไกสำหรับการดักจับอนุภาคโดยตรง การไหลรูปแบบที่สอง คือ การไหลบริเวณขอบหลุม เมื่อของไหลเคลื่อนที่มาชนตำแหน่งขอบหลุมส่งผลให้การไหลที่ตำแหน่งขอบนั้นเกิดการหมุนวนขึ้น โดยมีแกนการหมุนในทิศทางเดียวกับการไหลดังรูปที่ 4.4ข การไหลนี้จะทำหน้าที่กักให้อนุภาคอยู่ตรงกลางภายในหลุมและผลักดันอนุภาคที่อยู่ด้านข้างออกจากหลุม

เนื่องจากการจำลองการไหลมีจุดประสงค์เพื่อศึกษากลไกการไหลเพื่อผลักดันอนุภาคให้หลุดออกจากหลุมจนเหลืออนุภาคเดียว ด้วยสาเหตุนี้การจำลองการไหลภายในหลุมจากนี้ไปจะกำหนดความเร็วเฉลี่ยขาเข้าเท่ากับ 350 ml/hr ซึ่งเป็นความเร็วสูงเพื่อใช้ในเงื่อนไขการทดลอง โดยเริ่มจากการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของของไหลภายในช่องการไหลหลักเพื่อศึกษาการกระจายตัวของ การไหลจากนั้นศึกษาพฤติกรรมของการไหลภายในหลุมทรงสามเหลี่ยมต่างชนิดกัน



รูปที่ 4.4 เส้นความเร็วการไหล (m/s) ผ่านหลุม (รูปบน) และแนวเส้นทางการไหลของการไหลภายในหลุม (รูปล่าง) สำหรับกรณี (ก) การหมุนวนภายในหลุมจูลักษณะรูปทรงสามเหลี่ยม, (ข) การหมุนวนควงที่ตำแหน่งขอบทั้งสองข้าง

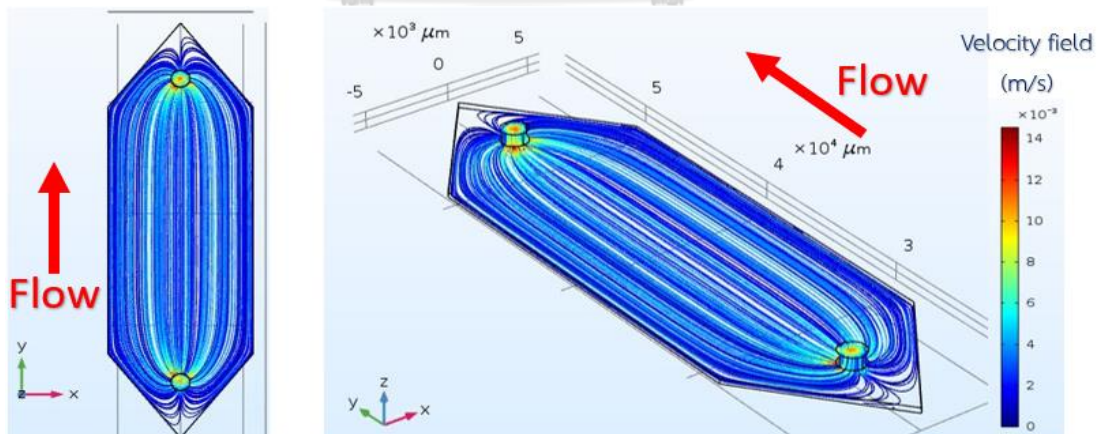
4.1.4.1 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของของไหลภายในช่องการไหลหลัก

การแสดงผลการกระจายตัวของความเร็วภายในโดเมนการไหลมีทิศทางตามแนวแกน Y โดยจะแสดงผลเป็นระนาบ XY เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์ในการเลือกรูปแบบช่องการไหลหลักที่เหมาะสมโดยแบ่งรูปแบบช่องการไหลเป็น 3 รูปแบบและมีผลการจำลองดังนี้

4.1.4.1.1 รูปแบบช่องการไหลทางเข้าแบบสามเหลี่ยมและมีท่อต่อตรงจากด้านบน

รูปแบบช่องการไหลแบบที่ 1 พบว่าเส้นทางการไหลเดินทางผ่านท่อลงมาสู่พื้นจะกระจายตัวออกตามแนวรัศมีที่อ่อนไปชนขอบทรงสามเหลี่ยมก่อนจะไหลไปสู่ช่องการไหลหลัก จากนั้นเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงบริเวณช่องการไหลหลักก่อนจะโค้งเล็กน้อยออกจากช่องการไหลหลักไป จึงส่งผลให้เส้นการไหลมีความหนาแน่นที่บริเวณขอบดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยของไหลบริเวณกลางช่องการไหลหลักมีความเร็วประมาณ 0.02 m/s ในขณะที่ความเร็วบริเวณขอบช่องการไหลอยู่ที่ประมาณ 0.005 - 0.01 m/s

จากผลดังกล่าวหากอนุภาคไหลไปตามเส้นการไหลแล้ว อนุภาคส่วนใหญ่จะไหลไปตามขอบของช่องการไหลทำให้ประสิทธิภาพการดักจับลดต่ำลงในสุดดังได้แสดงผ่านผลการทดลองบทที่ 3

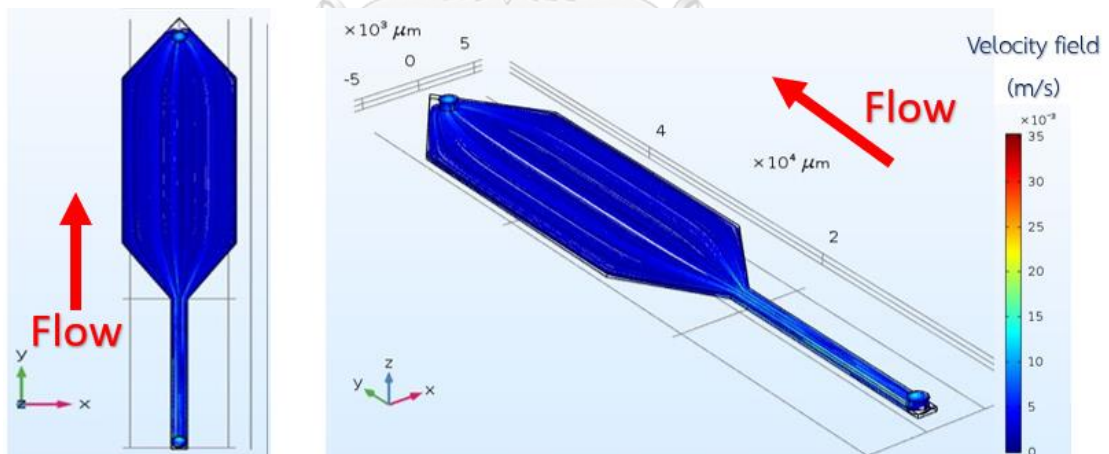


รูปที่ 4.5 ผลลัพธ์การจำลองการไหลแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของเส้นความเร็วภายในช่องการไหลทางเข้าแบบสามเหลี่ยมและมีท่อต่อตรงจากด้านบน

4.1.4.1.2 รูปแบบช่องการไหลทางเข้าแบบสามเหลี่ยมและมีท่อต่อตรงจากด้านหน้า

จากการสร้างแบบจำลองการไหลรูปแบบช่องการไหลที่ 2 พบว่า เส้นทางการไหลของของไหลเคลื่อนที่ตามทิศแกน Y เมื่อถึงช่องการไหลหลักเส้นความเร็วของไหลบริเวณช่วงแรกของช่องการไหลหลักมีลักษณะโค้งเล็กน้อยจากนั้นเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงผ่านช่องการไหลหลักก่อนจะไหลโค้งอีกครั้งและวกออกจากช่องการไหลหลักออกไปและมีการกระจายตัวของของไหลค่อนข้างสม่ำเสมอแสดงในรูปที่ 4.6 โดยความเร็วของของไหลทั่วทั้งหน้าตัดภายในช่องการไหลหลักมีความเร็วสม่ำเสมอที่ประมาณ 0.005 – 0.01 m/s

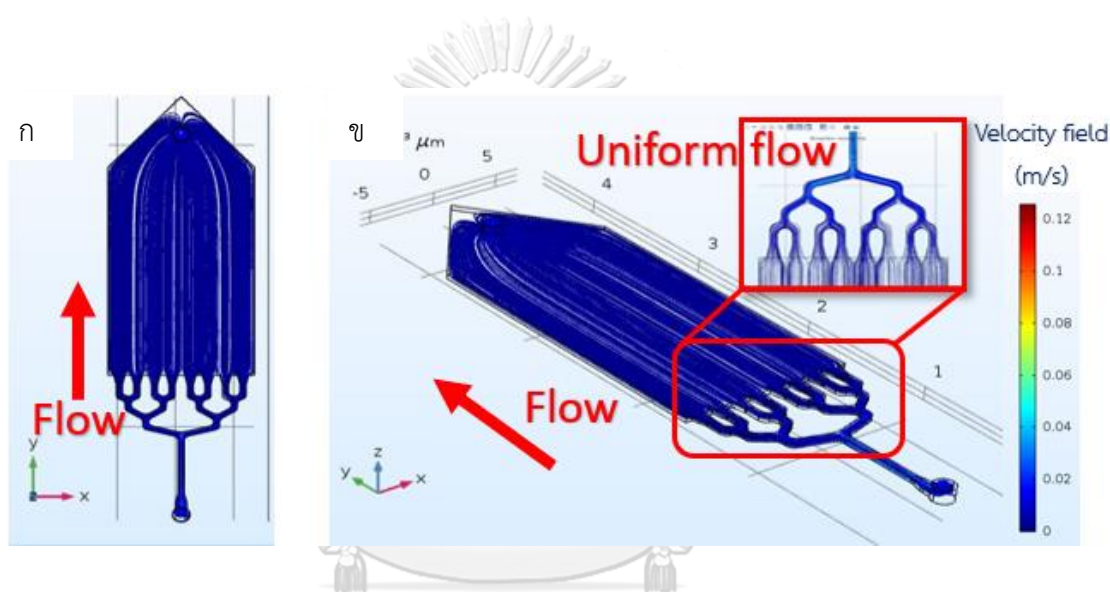
จากผลการจำลองพบว่าการกระจายตัวช่วงบริเวณฝั่งต้นของช่องการไหลหลักมีลักษณะเส้นการไหลที่โค้งเล็กน้อยเนื่องจากอิทธิพลของขอบเอียงสามเหลี่ยมฝั่งทางเข้าและทางออก ด้วยเหตุผลดังกล่าวอาจส่งผลต่อรูปแบบการไหลภายในหลุมสามเหลี่ยมได้ในการศึกษารูปแบบช่องการไหลต่อไป จึงสนใจในการออกแบบช่องทางเข้าที่สามารถกระจายเส้นความเร็วภายในช่องการไหลหลักให้มีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงมากขึ้น



รูปที่ 4.6 ผลลัพธ์การจำลองการไหลแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของเส้นความเร็วภายในช่องการไหลทางเข้าแบบสามเหลี่ยมและมีท่อต่อตรงจากด้านหน้า

4.1.4.1.3 รูปแบบช่องการไหลทางเข้าแบบท่อแยกและมีท่อต่อตรงจากด้านหน้า

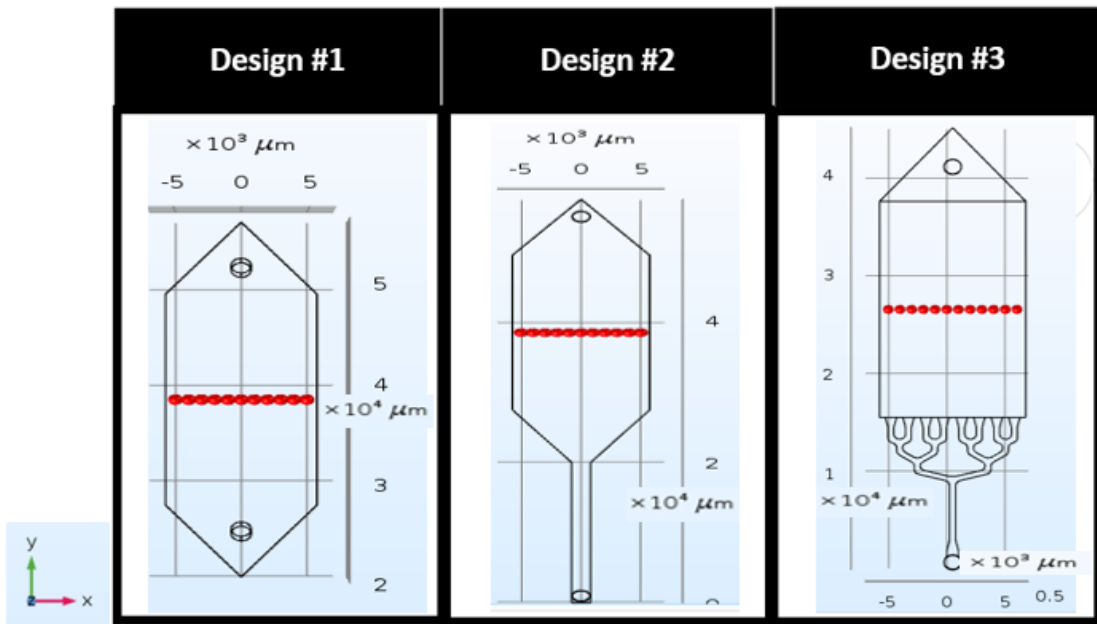
รูปแบบช่องการไหลแบบที่ 3 พบว่าจากผลการจำลองการไหลพบว่าการออกแบบท่อทางเข้าลักษณะเป็นท่อตรงและแยกออกเป็นท่อย่อยจำนวน 2, 4 และ 8 ท่อ ตามลำดับ ความหนาแน่นของเส้นทางการไหลของของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านช่องทางการไหลหลักมีลักษณะเป็นเส้นตรงและสม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าตัด (Uniform flow) ดังรูปที่ 4.7 และมีเส้นการไหลเป็นเส้นตรงต่อเนื่องผ่านช่องการไหลหลักก่อนจะโค้งเล็กน้อยช่วงบริเวณท้ายของช่องทางออก โดยความเร็วของของไหลทั่วทั้งหน้าตัดภายในช่องการไหลหลักมีความเร็วสม่ำเสมอที่ประมาณ $0.005 - 0.01$ m/s



รูปที่ 4.7 ผลลัพธ์การจำลองการไหลแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของเส้นความเร็วภายในช่องการไหลทางเข้าแบบท่อแยกและมีท่อต่อตรงจากด้านหน้า

4.1.4.1.4 กราฟการกระจายตัวความเร็วของของไหลภายในช่องการไหลทั้งสามรูปแบบ

การแสดงผลการกระจายตัวของความเร็วภายในโดเมนการไหลมีทิศทางการไหลตามแนวแกน Y โดยจะแสดงผลเป็นจุดตำแหน่งผ่านรูปแบบกราฟบนระนาบ XY ที่ระดับความสูง $Z = 175$ μm ณ ตำแหน่งความยาวกลางช่องการไหลหลัก $Y = 11,000$ μm และเก็บค่าทุกช่วง X ตั้งแต่ $-5,000$ μm ถึง $5,000$ μm ดังรูปที่ 4.8 ทั้งนี้ขนาดของความเร็วที่แสดงในกราฟจะแสดงเป็นสัดส่วนของความเร็วจุดใด ๆ ต่อค่าความเร็วเฉลี่ย เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของความเร็วของของไหลภายในช่องการไหลทั้ง 3 รูปแบบและมีผลการจำลองดังนี้



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งการเก็บค่าความเร็วของของไหลภายในช่องการไหล



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงสัดส่วนความเร็วต่อความเร็วเฉลี่ยภายในช่องการไหลหลักจุลภาค

จากผลกระจายตัวของความเร็วภายในช่องการไหลรูปแบบต่างกันมีความเร็วภายในช่องการไหลหลักใกล้เคียงกันยกเว้นรูปแบบที่ 3 มีความเร็วต่ำกว่าเล็กน้อยเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดช่องการไหลใหญ่กว่า แต่เมื่อแสดงค่าสัดส่วนของความเร็วจุดใดๆต่อค่าความเร็วเฉลี่ยและตำแหน่งจุดแล้วพบว่า

ช่องการไหลรูปแบบที่ 1 2 และ 3 มีค่าความเป็ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มของมูลอยู่ที 0.038 0.043 และ 0.027 ตามลำดับ ดังนั้นการกระจายตัวความเร็วของของไหลภายในช่องการไหลรูปแบบที่ 3 มีความสม่ำเสมอมากทีสุดทั้ทั้งหน้าตัดดังรูปที่ 4.9

ลักษณะการออกแบบช่องทางเข้าส่งผลต่อการกระจายตัวอย่างยิ่งแต่รูปแบบการไหลภายในช่องการไหล โดยอิทธิพลการออกแบบช่องทางเข้าลักษณะสามเหลี่ยมส่งผลให้การกระจายตัวของเส้นความเร็วการไหลฝั่งต้นและหลังช่องการไหลหลักมีลักษณะโค้ง ดังนั้นมีความเป็นไปได้ทีลักษณะการไหลดังกล่าวจะส่งผลต่อกลไกการไหลภายในหลุมที่แตกต่างออกไป ทั้งนี้หากพิจารณาถึงผลทีเกิดขึ้นในการกระจายตัวของรูปแบบช่องการไหลทีมีท่อแยก นั้นจะเกิดความสม่ำเสมอของารไหลทั้ช่องการไหลหลักและมีการกระจายตัวความเร็วของของไหลสม่ำเสมอมากทีสุด ดังนั้นการเลือกออกแบบชิ้นงานใหม่รูปแบบที่ 3 อาจนำไปสู่การศึกษาการดักจับอนุภาคให้มีประสิทธิภาพได้โดยลำดับถัดไป จะกล่าวถึงการวิเคราะห์การไหลภายในหลุมรวมถึงความสำคัญของการเคลื่อนที่ของไหลในลักษณะเป็นเส้นตรงและสม่ำเสมอภายในช่องการไหลหลัก

4.1.4.2 พฤติกรรมการไหลภายในหลุมทรงสามเหลี่ยมต่างชนิดกัน

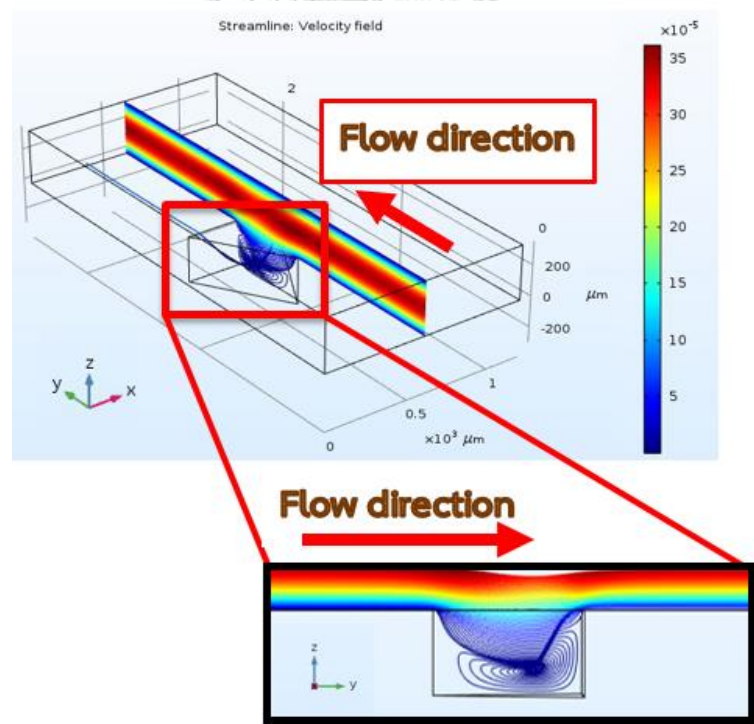
การแสดงผลเลือกการแสดงเส้นการเคลื่อนที่ของไหลตามทิศทางแกน Y และ เส้นแสดงเค้าโครงของการหมุนวนของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้านเป็นหลัก เส้นการเคลื่อนที่ของของไหลจะแสดงผล ณ ตำแหน่งต่างๆของช่องการไหลและลักษณะการหมุนวนของของไหลจะแสดงผลภายในหลุม ณ ตำแหน่งต่างๆ

4.1.4.2.1 การเคลื่อนที่ของของไหลบริเวณปากหลุมทีระดับความสูงต่างกัน

จากผลการจำลองการไหลพบว่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของของไหลทีบริเวณปากหลุมหรือบริเวณพื้นช่องการไหลมีความเป็นไปได้สูงในการดักจับอนุภาคและโอกาสในการดักจับลดลงเมื่อตำแหน่งการเคลื่อนที่ของของไหลมีระดับทีสูงขึ้นจากปากหลุม เนื่องจากของไหลทีเคลื่อนที่ผ่านระดับบริเวณปากหลุมจะมีการไหลวนลงสู่หลุมรูปสามเหลี่ยมทั้งสามรูปแบบเป็นเหตุให้อนุภาคถูกดักจับตามลักษณะการไหลดังกล่าว แต่เส้นการไหลที่อยู่สูงขึ้นไปจากระดับปากหลุมจะไม่มีารไหลวนเกิดขึ้นส่งผลให้อนุภาคทีเคลื่อนที่อยู่ระดับเส้นการไหลดังกล่าวอาจไม่ถูกดักจับ ทั้งนี้ได้แสดงผลเส้นทางการ

ไหลที่ระดับความสูงต่างกันตามทิศทางแกน Z ณ ตำแหน่งบริเวณกึ่งกลางของรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 4.10 ลักษณะเส้นการเคลื่อนที่ของของไหลที่ระดับความสูงต่างๆ แสดงให้เห็นว่าเส้นสีฟ้าแสดงการเคลื่อนที่ของของไหลบริเวณปากหลุมมีการไหลวนลงสู่หลุมในขณะที่เส้นการเคลื่อนที่สีอื่นที่ระดับความสูงสูงกว่าปากหลุมไม่มีการไหลวนเกิดขึ้น

จากการทดลองเบื้องต้นยังให้ผลลัพธ์สอดคล้องเกี่ยวกับระดับความสูงที่มีอิทธิพลต่อการดักจับอนุภาคโดยระดับบริเวณปากหลุมมีโอกาสมากกว่าระดับอื่น อย่างไรก็ตามอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านกลางหลุมมีโอกาสถูกดักจับจากสูงในขณะที่อนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านขอบหลุมกลับตัวออกจากหลุม โดยเฉพาะหลุมสามเหลี่ยมมุมแหลม ส่งผลให้มีความสนใจศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณนี้ผ่านโปรแกรมจำลองการไหลบริเวณด้านล่างของช่องการไหล(บริเวณปากหลุม)ว่าเหตุใดสามเหลี่ยมทั้งสามรูปแบบมีช่วงการดักจับอนุภาคที่แตกต่างกัน

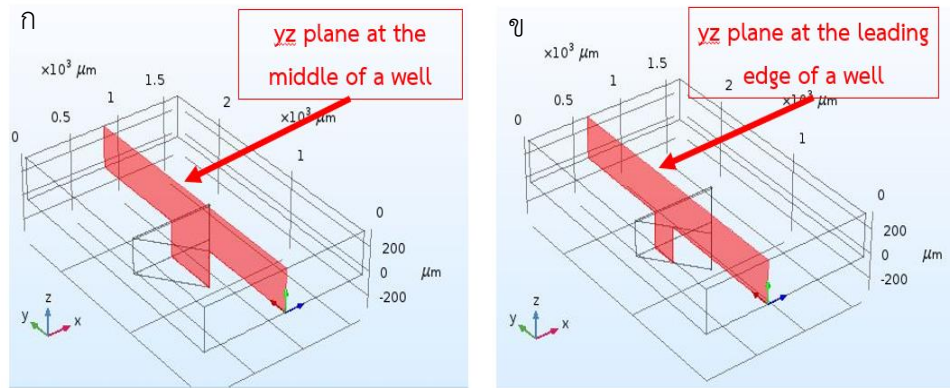


รูปที่ 4.10 ลักษณะเส้นการเคลื่อนที่ของของไหลที่ระดับความสูงต่างๆ

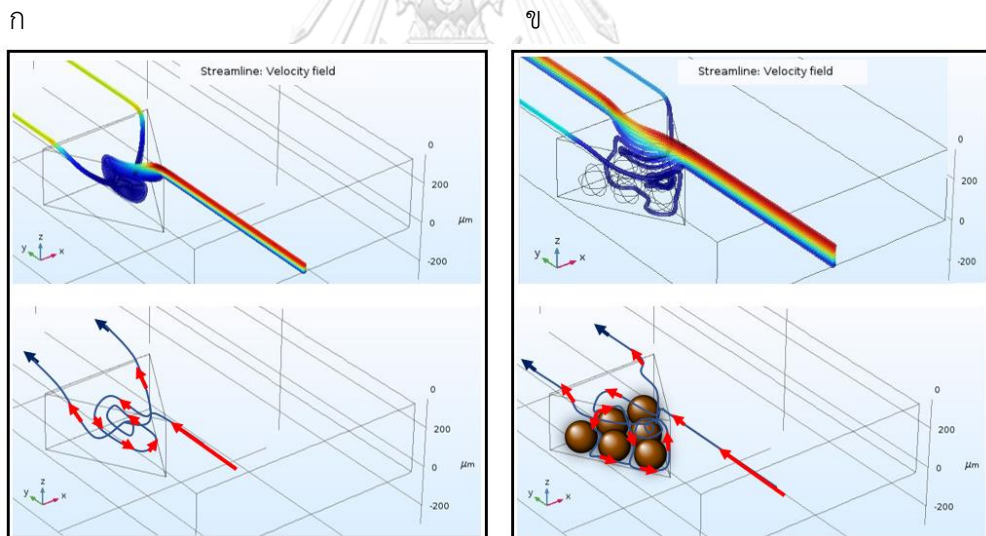
4.1.4.2.2 การเคลื่อนที่ของของไหลลงสู่หลุม

เมื่อของไหลเคลื่อนที่ตามทิศทางแกน Y ผ่านหลุม ของไหลตำแหน่งใกล้พื้นช่องการไหลจะเคลื่อนที่ลงสู่หลุม และเกิดการหมุนวนภายในหลุมมีแกนตั้งฉากกับทิศทางการไหล โดยการแสดงผลเส้นความเร็วเกิดจากการสร้างภาพตัดขวางตามระนาบ YZ แสดงการกระจายตัวของการหมุนตามแนว X ของของไหลภายในหลุมที่ตำแหน่งกึ่งกลางของหลุมและตำแหน่งขอบของสามเหลี่ยมที่ระยะกึ่งกลางระหว่างจุดยอดและจุดฐานของสามเหลี่ยมตามแนวแกน X โดยสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้านมีระยะระนาบห่างจากระนาบกลางหลุมตามแนวแกน X ที่ $-150 \mu\text{m}$ - $100 \mu\text{m}$ และ $-200 \mu\text{m}$ ตามลำดับดังรูปที่ 4.11 และแบ่งการแสดงผลเป็นสองกลุ่มข้อมูลคือ กลุ่มข้อมูลที่ไม่มีอนุภาคอัดแน่นภายในหลุมและกลุ่มที่มีอนุภาคภายในหลุม

จากรูปที่ 4.12 แสดงเส้นความเร็วการไหลภายในหลุม สำหรับกรณีที่ไม่มีอนุภาคภายในเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านกลางหลุมสามเหลี่ยมของไหลที่อยู่บริเวณพื้นช่องการไหลจะหมุนตัวลงสู่หลุมทั้งฝั่งต้นและฝั่งผนังหลุมด้านหลัง โดยของไหลจะเคลื่อนที่ขนานกับผนังฝั่งหลังลงสู่พื้นหลุมและเคลื่อนมาฝั่งหน้าหลุมจนชนขอบฝั่งหน้าจากนั้นเคลื่อนที่ขึ้นไปบริเวณปากหลุม ณ ตำแหน่งนี้เองจะเกิดการชนกับเส้นการไหลหลักซึ่งมีความเร็วสูงส่งผลให้ของไหลวกกลับมาในหลุมอีกครั้งวนซ้ำเรื่อยไปจนเกิดเป็นการหมุนวนภายในหลุมขึ้น โดยมีแนวการหมุนในทิศทางแกน X ปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้การหมุนวนเกิดการกระจายเป็นวงกว้างมีจุดศูนย์กลางบริเวณกลางหลุมจากนั้นของไหลจะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างหลุมทั้งสองออกจากหลุมไปในที่สุด สำหรับในกรณีที่ไม่มีอนุภาคภายในหลุมจะเกิดการมุดตัวของของไหลลงสู่หลุมเช่นเดียวกันแต่ของไหลที่มุดตัวลงสู่พื้นหลุมฝั่งผนังด้านหลังจะเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคจนถึงฝั่งด้านหน้าหลุมจากนั้นเคลื่อนที่ขึ้นไปบริเวณปากหลุมจนไปชนกับเส้นการไหลหลักเหมือนกันแต่ลักษณะการมุดตัวจะมุดลงมาชนกันอนุภาคส่งผลให้เกิดการหลุมวนบริเวณเหนืออนุภาคที่วางตัวบริเวณฝั่งต้นหลุม เป็นการหมุนวนที่มีการกระจายตัวต่ำกว่าก่อนของไหลจะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างหลุมทั้งสองออกจากหลุมไปในที่สุด



รูปที่ 4.11 การแสดงผลระนาบจากการสร้างภาพตัดขวางตามระนาบ YZ ที่ตำแหน่ง (ก) กึ่งกลางของหลุม, (ข) ขอบของสามเหลี่ยม



รูปที่ 4.12 เส้นความเร็วการไหล (m/s) หมุนวนภายในหลุมจุลภาครูปทรงสามเหลี่ยม (รูปบน) และแนวเส้นทางการไหลของการไหลภายในหลุม (รูปล่าง) สำหรับกรณี (ก) มีอนุภาคภายในหลุม, (ข) ไม่มีอนุภาคภายในหลุม

- ระบายตำแหน่งกลางหลุม ไม่มีอนุภาคภายในหลุม

สามเหลี่ยมมุมเท่า : เส้นความเร็วแสดงการเคลื่อนที่ของของไหลบริเวณพื้นช่องการไหล(เส้นสีฟ้า)ซึ่งมีความเร็วการไหลอยู่ที่ประมาณ $0.005 - 0.01$ m/s ได้เคลื่อนตัวผ่านบริเวณปากหลุมจากนั้นหมุนวนลงสู่หลุมทันที เส้นความเร็วบางส่วนที่เคลื่อนที่อยู่สูงกว่าระดับพื้นช่องการไหลเล็กน้อยจะเคลื่อนที่ลงชนกับผนังฝั่งด้านหลังหลุมก่อนจากนั้นเปลี่ยนทิศทางมาฝั่งด้านหน้าหลุมและเกิดการหมุนวนมีขนาดกว้างตั้งแต่ฝั่งหลังหลุมถึงฝั่งต้นหลุม โดยมีจุดศูนย์กลางการหมุนวนอยู่บนบริเวณกลางหลุมก่อนที่จะไหลออกจากหลุมทางฝั่งด้านหลังดังรูปที่ 4.13ก

สามเหลี่ยมมุมแหลม : เส้นความเร็วการเคลื่อนที่ของของไหลบริเวณพื้นช่องการไหลจะเกิดการหมุนวนลงสู่หลุมทันทีโดยมีความเร็วการไหลอยู่ที่ประมาณ $0.005 - 0.01$ m/s เส้นความเร็วบางส่วนที่เคลื่อนที่อยู่สูงกว่าระดับพื้นช่องการไหลเล็กน้อยจะเคลื่อนที่ลงชนกับผนังฝั่งด้านหลังหลุมก่อนจากนั้นเปลี่ยนทิศทางมาฝั่งด้านหน้าหลุมโดยไม่เคลื่อนที่ย้อนกลับมาจนถึงฝั่งหน้าหลุมแต่จะวนกลับทำให้เกิดความหนาแน่นของการหมุนวนบริเวณฝั่งหลังหลุม ซึ่งเป็นบริเวณเดียวกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางการหมุนวนก่อนที่จะไหลออกจากหลุมทางฝั่งด้านหลังโดยการหมุนวนมีขนาดกว้างตั้งแต่ฝั่งหลังหลุมถึงฝั่งต้นหลุมดังรูปที่ 4.13ข

สามเหลี่ยมมุมป้าน : เส้นความเร็วการเคลื่อนที่ของของไหลบริเวณพื้นช่องการไหลจะเกิดการหมุนวนลงสู่หลุมทันทีโดยมีความเร็วการไหลอยู่ที่ประมาณ $0.005 - 0.01$ m/s เส้นความเร็วบางส่วนที่เคลื่อนที่อยู่สูงกว่าระดับพื้นช่องการไหลเล็กน้อยจะเคลื่อนที่ลงชนกับผนังฝั่งด้านหลังหลุมก่อนจากนั้นเปลี่ยนทิศทางมาจนสุดฝั่งด้านหน้าหลุม จากวนกลับทำให้เกิดการหมุนวนซึ่งมีขนาดกว้างตั้งแต่ฝั่งหลังหลุมถึงฝั่งต้นหลุม โดยมีจุดศูนย์กลางการหมุนวนอยู่บนบริเวณกลางหลุมแต่เอียงมาฝั่งหน้าหลุมเล็กน้อยก่อนที่จะไหลออกจากหลุมทางฝั่งด้านหลังดังรูปที่ 4.13ค

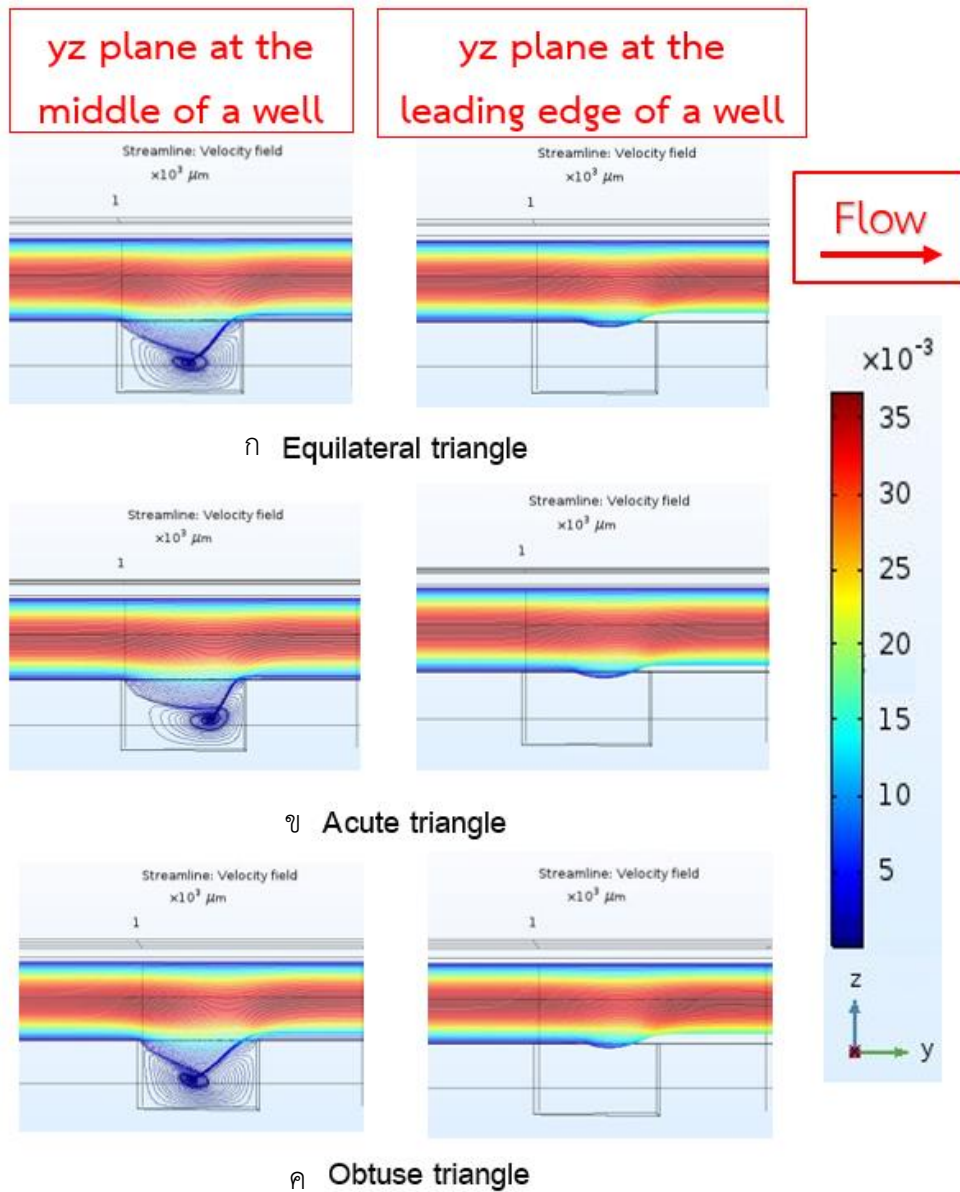
- ระบายตำแหน่งขอบหลุม ไม่มีอนุภาคภายในหลุม

เส้นความเร็วการเคลื่อนที่ของของไหลบริเวณพื้นช่องการไหลของหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลมและสามเหลี่ยมมุมป้านมีลักษณะเหมือนกันคือของไหลจะมุดตัวลงสู่หลุมบริเวณปากหลุมเท่านั้นจากนั้นจะเคลื่อนที่ออกจากหลุมทางฝั่งด้านหลังอย่างไรก็ตามความเร็วของไหลที่

เคลื่อนที่ออกจากทางฝั่งหลังหลุมนั้นกลับมีความเร็วเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่าจากความเร็วเริ่มต้นก่อน
 มุดตัวสู่หลุมอยู่ที่ประมาณ 0.015 m/s ดังรูปที่ 4.13ก-ค

จากผลลัพธ์ของเส้นความเร็วบนระนาบ XY ที่ตำแหน่งกลางหลุมสามเหลี่ยมที่มีมุมภายใน
 แตกต่างกัน พบว่าความเร็วบริเวณพื้นช่องการไหลมีความเร็วใกล้เคียงกัน เส้นการไหลบางส่วนเกิด
 การหมุนวนภายในหลุม ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงตำแหน่งจุดศูนย์กลางของการหมุนพบว่าระดับความสูงจุด
 ศูนย์กลางการหมุนของสามเหลี่ยมมุมเท่าและมุมป้านมีระดับใกล้เคียงกันคือตำแหน่งกลางหลุมใน
 ขณะที่สามเหลี่ยมมุมแหลมมีระดับความสูงมากกว่าเล็กน้อยซึ่งมีความใกล้เคียงกับเส้นการไหลหลักอ้างอิง
 จากระดับพื้นหลุมตามทิศทางแกน Z ดังนั้นมีความเป็นไปได้หากอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านหลุมสามเหลี่ยม
 มุมแหลม ณ ตำแหน่งกลางหลุมมีโอกาสสูงหลุมตามแรงหมุนวนและวกหลับออกจากหลุมมากกว่า
 เมื่อเทียบกับหลุมรูปทรงอื่น หากพิจารณาจุดศูนย์กลางของการหมุนวนภายในหลุมตามระยะแกน Y
 แล้วพบว่าสามเหลี่ยมมุมแหลมซึ่งมีมุมภายในมุมยอดต่ำจะเกิดตำแหน่งจุดศูนย์กลางการหมุนวนเอียง
 ไปทางบริเวณท้ายหลุม สามเหลี่ยมมุมป้านซึ่งมีมุมภายในมุมยอดสูงเกิดจุดศูนย์กลางการหมุนวน
 บริเวณฝั่งหน้า และสามเหลี่ยมมุมเท่าเกิดจุดศูนย์กลางบริเวณกลางหลุม ดังนั้นอนุภาคที่เคลื่อนที่ลง
 สามเหลี่ยมมุมป้านมีแนวโน้มถูกดักจับภายในหลุมมากกว่าสามเหลี่ยมมุมเท่าและสามเหลี่ยมมุมแหลม
 ตามลำดับเนื่องจากการดักจับอนุภาคบริเวณฝั่งต้นหลุมที่มีขอบทั้งสองข้างของสามเหลี่ยมทำหน้าที่
 คล้ายกำแพงประคองอนุภาคไว้ในขณะที่การเริ่มดักจับอนุภาคภายในหลุมบริเวณฝั่งหลังไม่มีขอบ
 ด้านข้างดังกล่าวอาจส่งผลให้อนุภาคควออกจากหลุมตามเส้นการไหลหลักในที่สุด

จากผลลัพธ์ของเส้นความเร็วบนระนาบ XY ที่ตำแหน่งขอบหลุมของสามเหลี่ยมทั้งสามชนิด
 พบว่ามีความสอดคล้องกันคือเส้นความเร็วมุดตัวลงสู่หลุมเล็กน้อยจากนั้นไหลออกจากหลุมไป ดังนั้น
 หากอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งนี้ไม่ความเป็นไปได้สูงที่จะไม่ถูกดักจับ



รูปที่ 4.13 เส้นความเร็วการไหล (m/s) ผ่านหลุมที่ระนาบตำแหน่งกลางหลุม (รูปซ้าย) และระนาบตำแหน่งข้างหลุม (รูปขวา) สำหรับกรณี (ก) หลุมสามเหลี่ยมด้านเท่า, (ข) หลุมสามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) หลุมสามเหลี่ยมมุมป้าน

- ระบายตำแหน่งกลางหลุม มีอนุภาคภายในหลุม

สามเหลี่ยมมุมเท่า : เส้นความเร็วแสดงการเคลื่อนที่ของของไหลบริเวณพื้นช่องการไหลซึ่งมีความเร็วการไหลอยู่ที่ประมาณ $0.005 - 0.01 \text{ m/s}$ ได้เคลื่อนตัวผ่านบริเวณปากหลุมจากนั้นเส้นความเร็วบางส่วนเคลื่อนที่ลงหลุมเล็กน้อยและไหลออกฝั่งหลังหลุม เส้นความเร็วอีกส่วนมุดตัวลงสู่หลุมจนชนผนังฝั่งหลังหลุมและเคลื่อนที่ลงสู่ก้นหลุมจากนั้นเส้นความเร็วบางส่วนเคลื่อนที่เรียบพื้นหลุมรอบอนุภาคไปทิศฝั่งหน้าหลุมก่อนที่จะวกกลับขึ้นมารวมกับเส้นการไหลหลักส่งผลให้เกิดการหมุนวนแต่ขนาดการกระจายตัวมีขนาดเล็กบริเวณฝั่งต้นหลุมเหนืออนุภาคโดยระดับความสูงของศูนย์กลางการหมุนวนอยู่บริเวณสูงกว่าระดับกลางหลุมเล็กน้อย ก่อนจะไหลออกจากหลุมทางฝั่งหลังหลุมดังรูปที่ 4.14ก

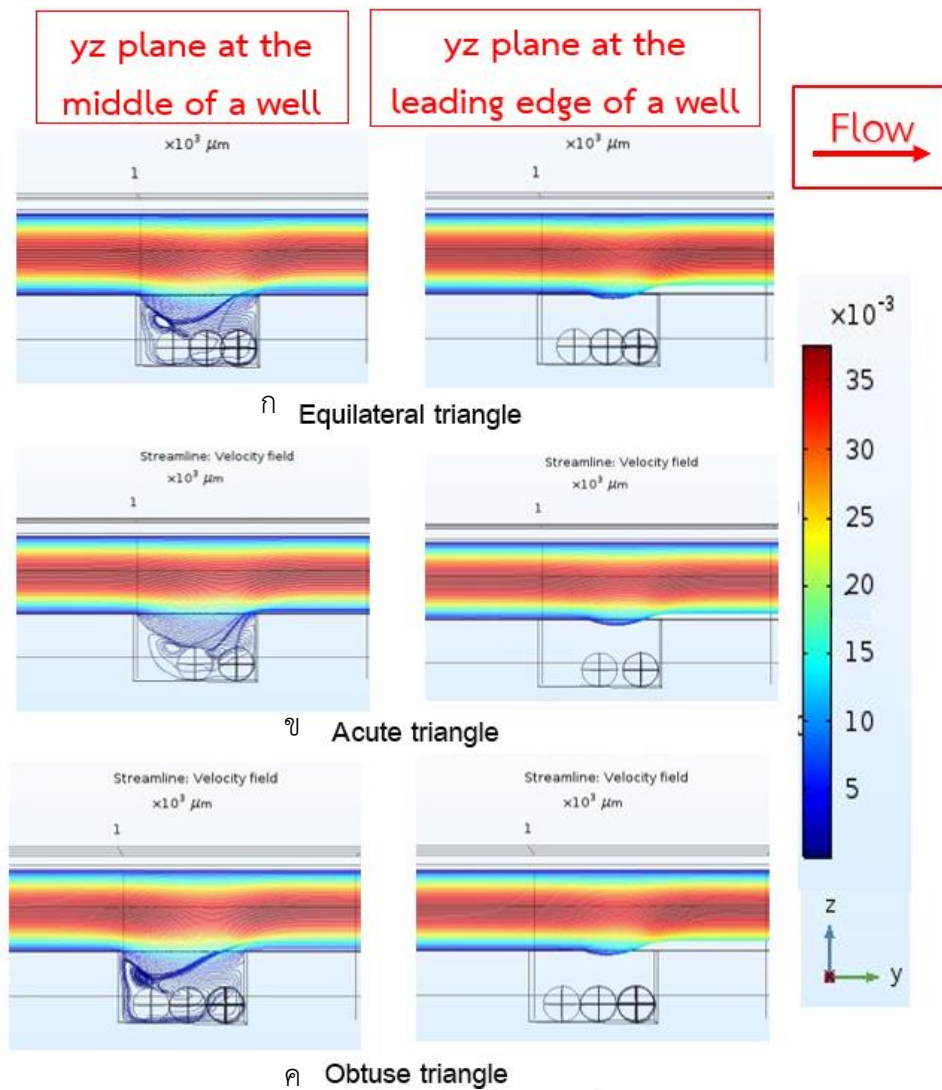
สามเหลี่ยมมุมแหลม : เส้นความเร็วแสดงการเคลื่อนที่ของของไหลบริเวณพื้นช่องการไหลซึ่งมีความเร็วการไหลอยู่ที่ประมาณ $0.005 - 0.01 \text{ m/s}$ ได้เคลื่อนตัวผ่านบริเวณปากหลุมจากนั้นเส้นความเร็วบางส่วนเคลื่อนที่ลงหลุมเล็กน้อยและไหลออกฝั่งหลังหลุม เส้นความเร็วบางส่วนมุดตัวลงสู่หลุมกระทั่งชนผนังด้านหลังก่อนจะเคลื่อนที่ลงสู่ก้นหลุมและไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคเรียบพื้นหลุมไปฝั่งต้นหลุมและเกิดการกระจายหมุนวนเล็กน้อยบริเวณเหนืออนุภาคก่อนเส้นความเร็วบางส่วนมุดตัวชนผนังฝั่งหลังและเคลื่อนที่เหนืออนุภาคไปทิศหน้าหลุมจนกระทั่งชนอนุภาคฝั่งหน้าหลุมจากนั้นเกิดการหมุนวนเกิดขึ้นก่อนจะไหลออกจากหลุมไปโดยระดับความสูงของศูนย์กลางการหมุนวนอยู่บริเวณกลางหลุมดังรูปที่ 4.14ข

สามเหลี่ยมมุมป้าน : เส้นความเร็วแสดงการเคลื่อนที่ของของไหลมีลักษณะคล้ายกับกรณีหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าโดยเส้นการไหลบริเวณพื้นช่องการไหลบางส่วนจะไหลชนผนังฝั่งหลังหลุมจากนั้นเคลื่อนที่ลงสู่พื้นหลุมไปและเคลื่อนที่เรียบพื้นหลุมไปฝั่งหน้าหลุมก่อนจะไหลขึ้นทิศปากหลุมจนปะทะกับเส้นการไหลหลักจนเกิดการหมุนวนขนาดเล็กก่อนจะไหลออกจากหลุมในฝั่งหลังหลุมดังรูปที่ 4.14ค

- ระบายตำแหน่งขอบหลุม มีอนุภาคภายในหลุม

เส้นความเร็วการเคลื่อนที่ของของไหลบริเวณพื้นช่องการไหลของหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลมและสามเหลี่ยมมุมป้านมีลักษณะเหมือนกันและมีผลลัพธ์เหมือนกับกรณีไม่มีอนุภาคภายในหลุมสามเหลี่ยมคือของไหลจะมุดตัวลงสู่หลุมบริเวณปากหลุมเท่านั้นจากนั้นจะเคลื่อนที่ออกจากหลุมทางฝั่งด้านหลังอย่างไรก็ตามความเร็วของๆไหลที่เคลื่อนที่ออกจากทางฝั่งหลังหลุมนั้นก็กลับมีความเร็วเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่าจากความเร็วเริ่มต้นก่อนมุดตัวสู่หลุมอยู่ที่ประมาณ 0.015 m/s ดังรูปที่ 4.14ก-ค

จากผลลัพธ์ของเส้นความเร็วบนระนาบ XY ที่ตำแหน่งกลางหลุมสามเหลี่ยมที่มีมุมภายในแตกต่างกันในกรณีมีอนุภาคภายในหลุม พบว่าเส้นความเร็วบริเวณพื้นช่องการไหลของสามเหลี่ยมทุกแบบยังคงเกิดการหมุนวนแต่ขนาดจะเล็กกว่ามากหากเทียบกับกรณีหลุมที่ไม่มีอนุภาค มากไปกว่านั้นระดับความสูงของจุดศูนย์กลางการหมุนวนยังอยู่ในระดับที่ใกล้ปากหลุมและเส้นการไหลหลักมาก ดังนั้นหากหลุมสามเหลี่ยมมีการดักจับอนุภาคจนเต็มหลุมแล้วจะไม่สามารถดักจับอนุภาคได้เพิ่มอีก เพราะอาจจะถูกเส้นการไหลหลักดันออกจากหลุม ในขณะที่เส้นความเร็วบนระนาบ XY ที่ตำแหน่งขอบหลุมของสามเหลี่ยมทั้งสามชนิดมีผลลัพธ์เช่นเดียวกับกรณีหลุมที่มีอนุภาคภายใน

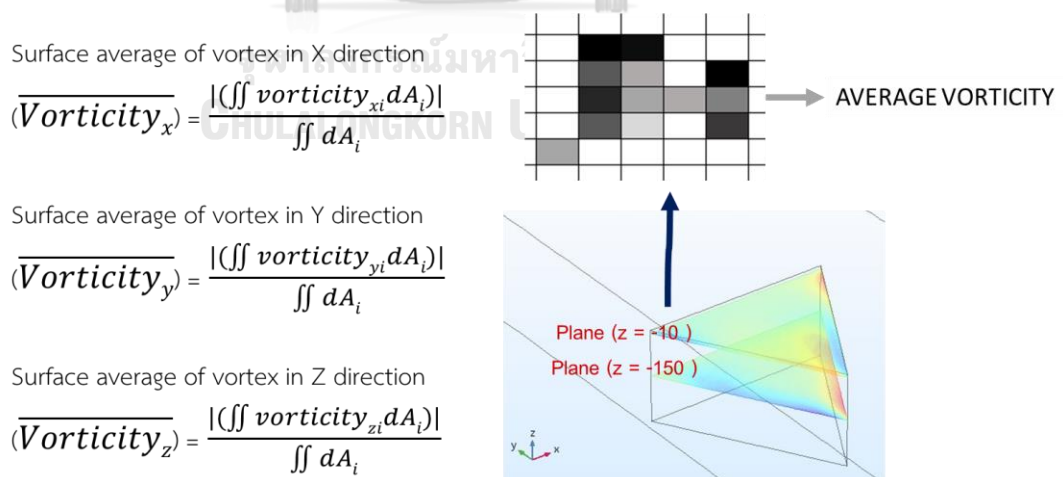


รูปที่ 4.14 เส้นความเร็วการไหล (m/s) ผ่านหลุมที่ระนาบตำแหน่งกลางหลุม (รูปซ้าย) และระนาบตำแหน่งข้างหลุม (รูปขวา) สำหรับกรณี (ก) หลุมสามเหลี่ยมด้านเท่า, (ข) หลุมสามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) หลุมสามเหลี่ยมมุมป้าน

4.1.4.2.3 การกระจายตัวการหมุน

การแสดงผลกระจายตัวของการหมุนนั้นจะแบ่งการแสดงผลออกมาเป็นสามแนวแกน คือ แกน X Y และ Z โดยจะแสดงผลเป็นระนาบความลึก 10, 150 และ 300 μm สำหรับหลุมกรณีสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ความลึก 300 μm ซึ่งจะวัดจากหลุมจุลภาคลงมาในกรณีที่ไม่มือนุภาคภายในหลุมและมีอนุภาคภายในหลุมเพื่อใช้ศึกษากลไกการตกจับและผลักดันอนุภาคออกจากหลุม

ภาพเส้นสีแสดงขนาดและเค้าโครงของการกระจายตัวหมุนจากผลการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างหลุมสามเหลี่ยมทั้งสามแบบโดยในแต่ละระนาบความลึกใช้มาตราส่วนรูปแท่ง (Scale bar) เดียวกันและแสดงขนาดของการหมุนวนสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดขึ้นไว้ตำแหน่งมุมล่างขวาของรูปสามเหลี่ยมดังนั้นมาตราส่วนของสีอาจจะไม่ครอบคลุมค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าการหมุนในแต่ละรูปในส่วนของการแสดงผลขนาดการกระจายตัวการหมุนเป็นการแสดงผลขนาดการกระจายตัวการหมุนเฉลี่ยเทียบพื้นที่ผิว (Surface average of vorticity) ซึ่งเกิดจากการนำค่าสัมบูรณ์ของขนาดการหมุนคูณด้วยพื้นที่แต่ละจุดแล้วนำค่าทั้งหมดมารวมกันจากนั้นนำค่าดังกล่าวไปหาค่าเฉลี่ยโดยหารด้วยพื้นที่ทั้งหมดดังรูปที่ 4.15 โดยที่สีโหมดขาวดำ (Grayscale) ภายในกริดแสดงถึงขนาดของการหมุนที่แตกต่างกันในแต่ละจุด



รูปที่ 4.15 วิธีการเก็บค่าขนาดการกระจายตัวการหมุนเฉลี่ยเทียบพื้นที่ผิว

- หลุมจุลภาคที่ระดับความลึก 10 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม

แกน X : สามเหลี่ยมมุมเท่า ๓ ตำแหน่งด้านหน้าและด้านท้ายของหลุมเกิดลักษณะของการหมุนในทิศทางขนานกับผนังด้านท้ายหลุมในทิศแกน -X พื้นที่การหมุนมีขนาดสูงบริเวณมุมยอดและขอบด้านหน้าบางส่วนลดลงช่วงกลางสามเหลี่ยมก่อนจะมีขนาดสูงขึ้นบริเวณขอบด้านท้ายทั้งหมดของสามเหลี่ยม แต่บริเวณด้านท้ายของด้านเอียงสามเหลี่ยมจะมีการหมุนวนในลักษณะกลับทิศกระจายตัวเพียงเล็กน้อย โดยสามเหลี่ยมมุมแหลมและมุมป้านเกิดการหมุนวนในลักษณะเดียวกันแต่ความรุนแรงของการหมุนจะต่ำกว่าและสูงกว่าตามลำดับดังรูปที่ 4.16ก

แกน Y : ลักษณะการหมุนสามเหลี่ยมมุมเท่าด้านหน้าหลุมจะมีลักษณะการหมุนจากด้านล่างหมุนเข้าหาผนังทั้งสองข้างของหลุม ขนาดการหมุนนั้นจะเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเริ่มออกห่างจากผนังนอกจากนี้บริเวณด้านท้ายของหลุมจะมีลักษณะการหมุนกลับทิศแต่มีพื้นที่การกระจายตัวที่ต่ำกว่า โดยขนาดและลักษณะของการหมุนนี้มีค่าใกล้เคียงกันในสามเหลี่ยมสามรูปแบบดังรูปที่ 4.16ข

แกน Z : สามเหลี่ยมมุมเท่ามีลักษณะการหมุนเข้าหาผนังของหลุมในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาในบริเวณพื้นที่สีแดงและหมุนตามเข็มนาฬิกาบริเวณพื้นที่สีน้ำเงิน โดยที่บริเวณขอบเอียงสามเหลี่ยมจะเกิดการกระจายตัวการหมุนรุนแรงแลลดลงเมื่อระยะเริ่มห่างจากผนังจนกระทั่งแทบไม่มีการหมุนวนบริเวณกลางหลุมส่งผลให้บริเวณพื้นที่และขนาดที่เกิดการหมุนวนของสามเหลี่ยมมุมป้านมีค่าต่ำกว่าสามเหลี่ยมมุมเท่าแหลมและมุมแหลมตามลำดับดังรูปที่ 4.16ค

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- หลุมจุลภาคที่ระดับความลึก 150 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม

แกน X : สามเหลี่ยมมุมเท่า ๓ ตำแหน่งมุมยอดและเชิงเอียงรวมไปถึงช่วงกลางของขอบด้านท้ายของหลุมมีลักษณะการหมุนวนขนานกับผนังด้านท้ายในทิศ +X แต่ช่วงกลางของสามเหลี่ยมมีการกระจายตัวการหมุนเช่นเดียวกันแต่มีลักษณะเป็นวงกว้างและกลับทิศทางโดยมีขนาดสูงสุดอยู่ที่ 37.2 s^{-1} และมีขนาดลดลงเมื่อระยะเริ่มห่างจากจุดศูนย์กลาง โดยสามเหลี่ยมมุมแหลมและสามเหลี่ยมมุมป้านมีลักษณะการหมุนวนคล้ายกันแต่มีขนาดต่ำกว่าและมากกว่าเพียงเล็กน้อยตามลำดับดังรูปที่ 4.17ก

แกน Y : ลักษณะการหมุนสามเหลี่ยมมุมเท่าจะมีลักษณะการหมุนจากด้านล่างม้วนออกจากผนังทั้งสองข้างของหลุมกินพื้นที่กว้างตามขอบเอียงตั้งแต่ฝั่งหน้าจนถึงท้ายหลุมโดยขนาดการหมุนนั้นจะเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเริ่มออกห่างจากผนัง สามเหลี่ยมมุมแหลมจะเกิดพื้นที่การกระจายตัวการหมุนและมีขนาดต่ำกว่าในขณะที่สามเหลี่ยมมุมป้านเกิดการกระจายตัวการหมุนและมีขนาดสูงที่สุดดังรูปที่ 4.17ข

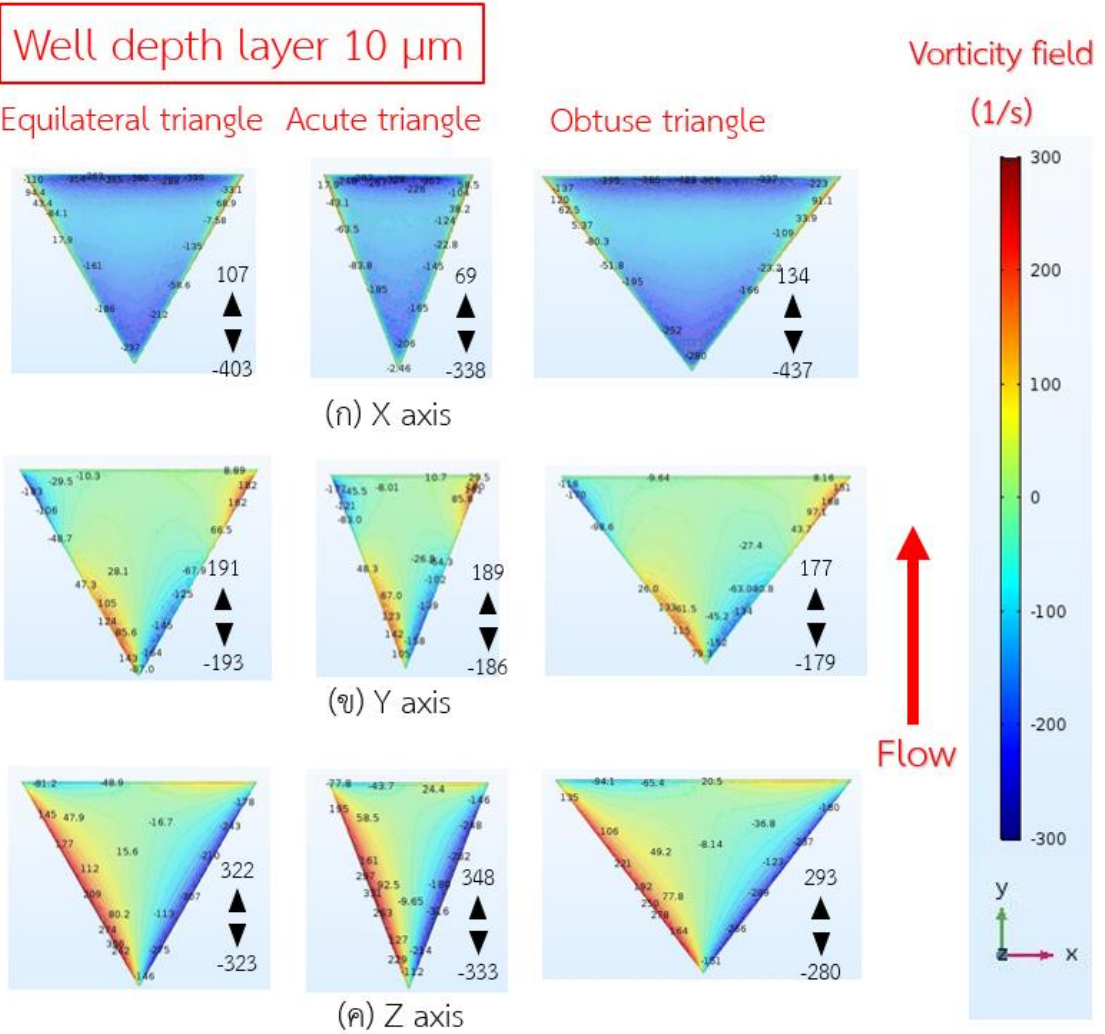
แกน Z : สำหรับสามเหลี่ยมมุมเท่าการกระจายตัวการหมุนเกิดขึ้นฝั่งท้ายและบริเวณกลางบางช่วงของสามเหลี่ยมมีลักษณะการหมุนเข้าหาผนังของหลุมในทิศทางตามเข็มนาฬิกาในบริเวณพื้นที่สีแดงและหมุนตามเข็มนาฬิกาบริเวณพื้นที่สีน้ำเงิน โดยสามเหลี่ยมมุมป้านมีขนาดและพื้นที่การกระจายตัวการหมุนสูงสุดในขณะที่สามเหลี่ยมมุมแหลมมีขนาดและพื้นที่การกระจายตัวต่ำมากรูปที่ 4.17ค

- หลุมจุลภาคที่ระดับความลึก 300 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม

แกน X : สามเหลี่ยมมุมเท่า ณ ตำแหน่งช่วงกลางของสามเหลี่ยมมีการกระจายตัวการหมุนในทิศทางแกน +X และมีขนาดลดลงเมื่อระยะเริ่มห่างจากศูนย์กลางคล้ายการหมุนในระนาบความลึก 150 μm โดยสามเหลี่ยมมุมแหลมและสามเหลี่ยมมุมป้านมีลักษณะการหมุนวนคล้ายกันแต่มีขนาดต่ำกว่าและมากกว่าเพียงเล็กน้อยตามลำดับดังรูปที่ 4.18

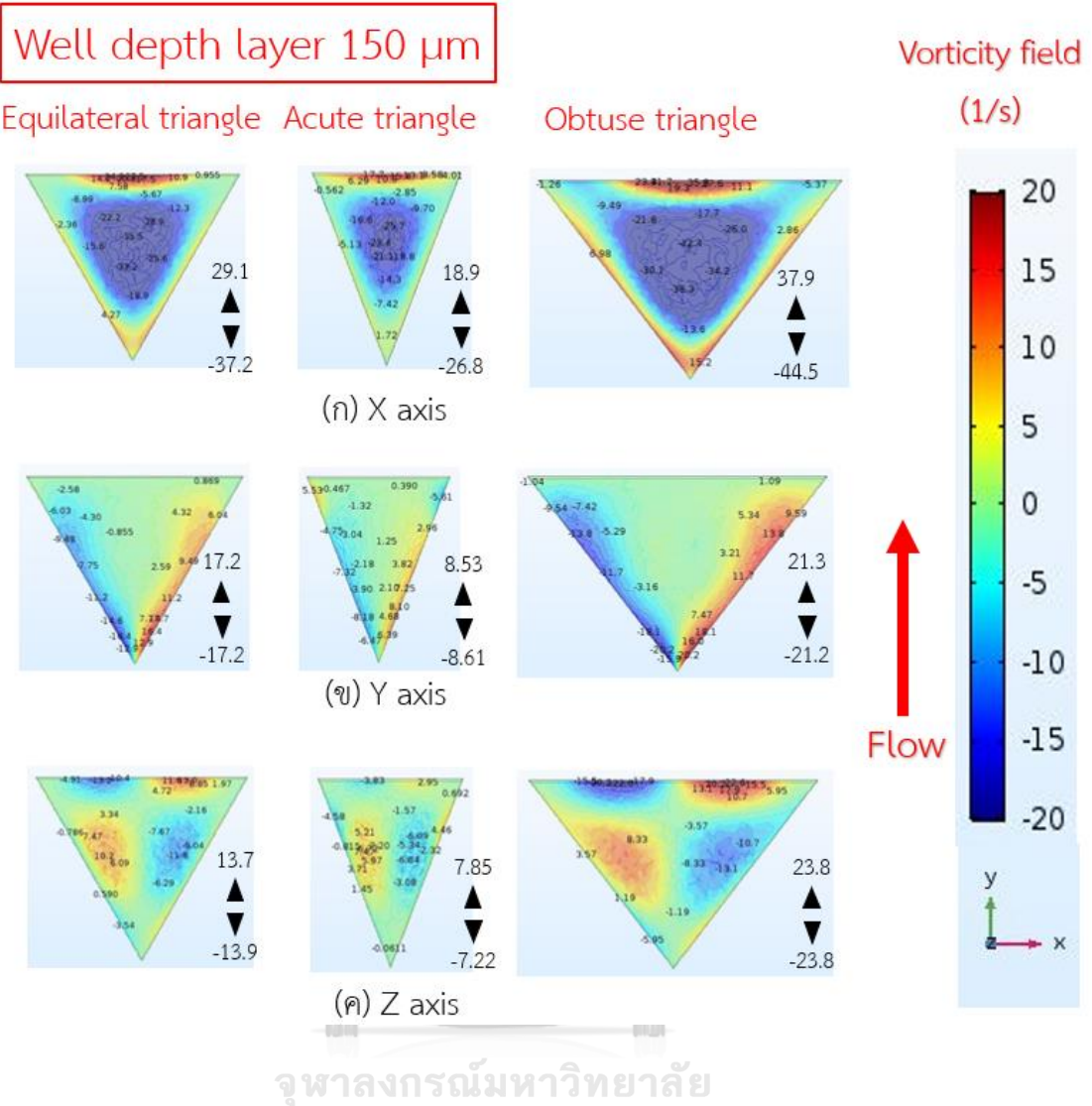
แกน Y : สามเหลี่ยมมุมเท่ามีลักษณะการกระจายตัวการหมุนตามแนวขอบเอียงและฝั่งท้ายของสามเหลี่ยมโดยมีศูนย์กลางขนาดการหมุนสูง ณ ตำแหน่งห่างจากขอบเล็กน้อยจากนั้นขนาดลดลงตามระยะห่างจากศูนย์กลาง สามเหลี่ยมทั้งหมดมีรูปแบบการหมุนคล้ายกันโดยสามเหลี่ยมมุมป้านมีพื้นที่การกระจายตัวและขนาดสูงสุดตลอดลงมาคือสามเหลี่ยมมุมเท่าและสามเหลี่ยมมุมแหลมตามลำดับ

แกน Z : สามเหลี่ยมทั้งสามรูปแบบมีค่าขนาดการหมุนเข้าใกล้ศูนย์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.16 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 10 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

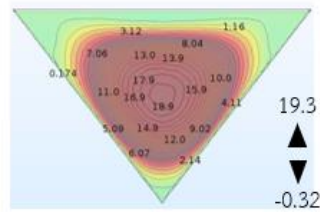
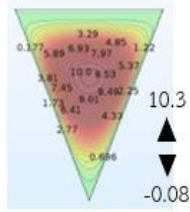
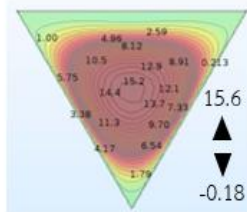


รูปที่ 4.17 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 150 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

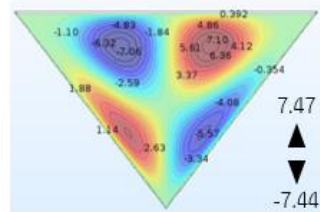
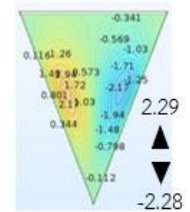
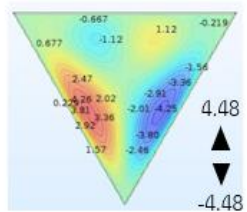
Well depth layer 300 μm

Equilateral triangle Acute triangle

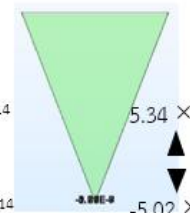
Obtuse triangle

Vorticity field
(1/s)

(ก) X axis

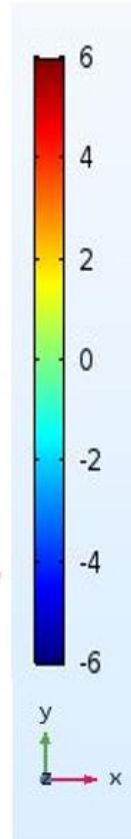


(ข) Y axis



(ค) Z axis

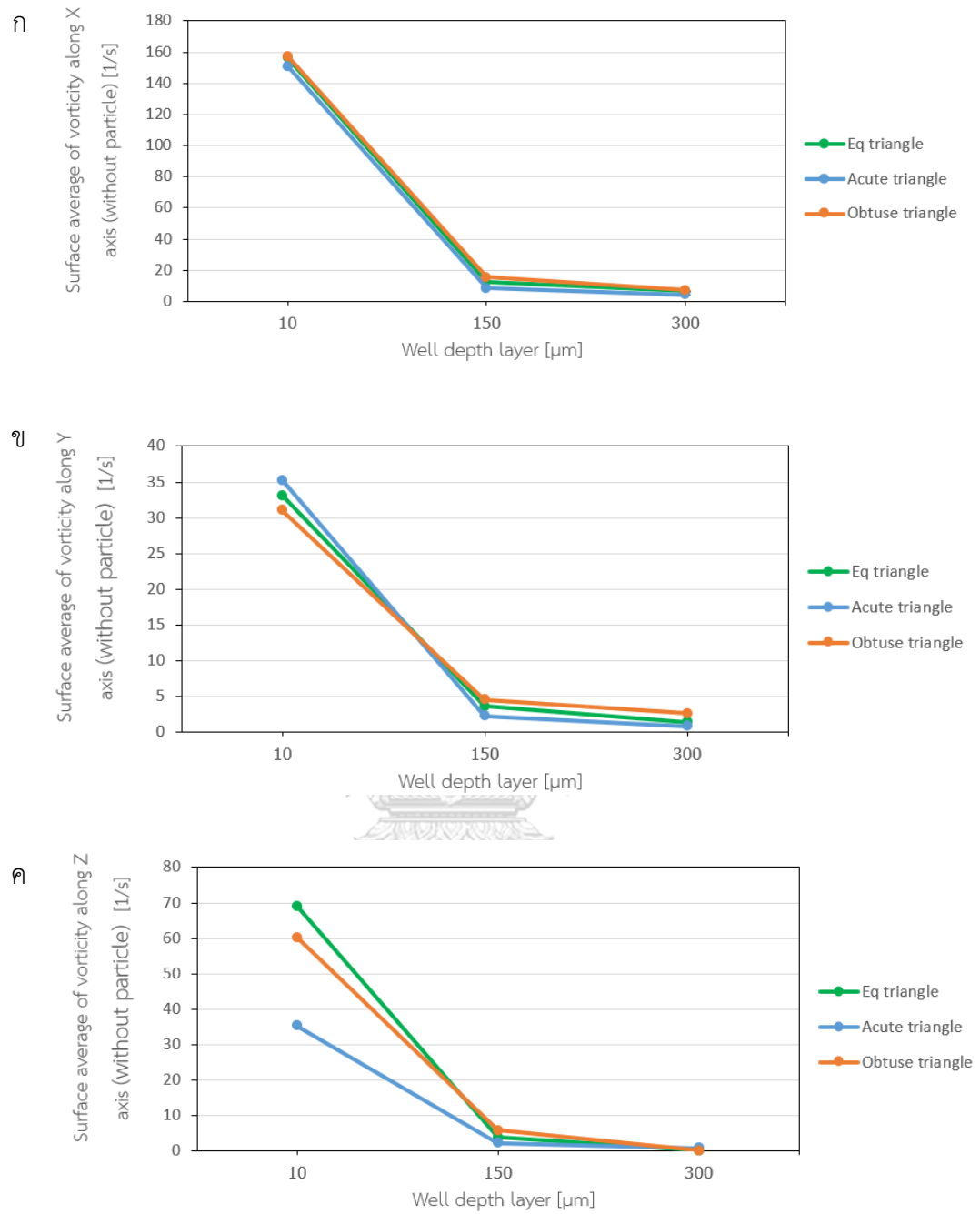
Flow



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.18 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 300 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



รูปที่ 4.19 กราฟขนาดการกระจายตัวการหมุนภายในหลุมเฉลี่ยเทียบพื้นที่ผิวระนาบความลึกต่างๆ ไม่มีอนุภาคภายในหลุม สำหรับกรณี (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

จากผลของการแสดงการกระจายตัวการหมุนพบว่าหลุมทั้งสามรูปแบบมีการกระจายตัวการหมุนที่คล้ายกันโดยทั้งสามแนวแกนนั้น หากสังเกตรูปแบบการหมุนที่ระนาบความลึก 10 μm พบว่าผลลัพธ์มีความสอดคล้องกับรูปแบบการเคลื่อนที่ของของไหลลงสู่หลุมในหัวข้อที่ 4.1.4.2.2 โดยแนวแกน X แสดงให้เห็นถึงการหมุนวนของของไหลที่ติงอนุภาคหมุนลงไปสู่หลุมทำให้เกิดการดักจับดังรูปที่ 4.4ก ในขณะที่แนวแกน Y แสดงถึงการหมุนวนบริเวณขอบที่รุนแรงหากอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านบริเวณดังกล่าวอาจจะไม่ถูกแรงหมุนวนดันอนุภาคออกไปดังรูปที่ 4.4ข บริเวณบริเวณด้านหลังของหลุมจะมีการหมุนวนลักษณะกลับทิศหากนำไปพิจารณาพร้อมกับการหมุนตามแนวแกน Z แล้ว พบว่าบริเวณด้านหลังหลุมจะเป็นการหมุนวนในทิศออกจากหลุมซึ่งได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.1.4.2.2 ว่าหลังจากของไหลหมุนวนภายในหลุมแล้วจะหมุนตัวไปด้านหลังทั้งสองข้างของสามเหลี่ยม โดยพฤติกรรมการไหลออกจากหลุมดังกล่าวสามารถอธิบายเพิ่มเติมผ่านระนาบความลึก 50 μm ดังภาคผนวกรูปที่ 39ข-ค นอกจากนี้ยังพบว่าช่วงบริเวณกึ่งกลางของสามเหลี่ยมมีการกระจายตัวการหมุนน้อยที่สุด ซึ่งหากอนุภาคเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งนี้อนุภาคจะไม่หลุดออกจากหลุมได้ แต่หากอนุภาคเคลื่อนที่ไปบริเวณขอบซึ่งมีการหมุนวนสูงอนุภาคอาจหลุดออกจากหลุมในที่สุด

หากพิจารณารูปขนาดการกระจายตัวการหมุนภายในหลุมเฉลี่ยระนาบดังรูปที่ 4.19ข ซึ่งเป็นแนวการหมุนตามทิศทางการไหล มีความเป็นไปได้ที่หลุมสามเหลี่ยมมุมป้านจะดักจับอนุภาคได้ดีที่สุดเนื่องจากบริเวณระนาบความลึก 10 μm (บริเวณใกล้ปากหลุม) มีขนาดแรงหมุนวนเฉลี่ยต่ำในขณะที่สามเหลี่ยมมุมเท่าและมุมแหลมมีขนาดเพิ่มขึ้นตามลำดับอย่างไรก็ตามระนาบความลึกหลุมที่มากขึ้นขนาดแรงหมุนสามเหลี่ยมมุมป้านจะสูงขึ้นมากกว่าสามเหลี่ยมรูปแบบอื่นมีความเป็นไปได้ว่าอนุภาคภายในจะถูกดันออกจากหลุมได้ง่ายกว่าสามเหลี่ยมมุมเท่าและสามเหลี่ยมมุมแหลมที่มีขนาดแรงหมุนวนเฉลี่ยที่ระนาบดังกล่าวลดต่ำลงตามลำดับ

จากผลลัพธ์การจำลองการไหลทำให้สามารถวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการดักจับอนุภาคภายในสามเหลี่ยมทั้งสามรูปแบบ ทั้งนี้ยังได้ทำแบบจำลองการไหลหลุมสามเหลี่ยมที่มีอนุภาคภายในเพื่อศึกษาการกระจายตัวการหมุนภายในหลุมสามเหลี่ยมมากขึ้น

- หลุมจุลภาคที่ระดับความลึก 10 μm มีอนุภาคภายในหลุม

แกน X : สามเหลี่ยมมุมเท่า ๓ ตำแหน่งด้านหน้าและด้านท้ายของหลุมเกิดลักษณะของการหมุนในทิศทางขนานกับผนังด้านท้ายหลุมในทิศแกน -X พื้นที่การหมุนมีขนาดสูงบริเวณมุมยอดและขอบด้านหน้าบางส่วนลดลงช่วงกลางสามเหลี่ยมก่อนจะมีขนาดสูงขึ้นบริเวณขอบด้านท้ายทั้งหมดของสามเหลี่ยม แต่บริเวณด้านท้ายของด้านเอียงสามเหลี่ยมจะมีการหมุนวนในลักษณะกลับทิศกระจายตัวเพียงเล็กน้อย โดยสามเหลี่ยมมุมแหลมและมุมป้านเกิดการหมุนวนในลักษณะเดียวกันแต่ความรุนแรงของการหมุนจะต่ำกว่าและสูงกว่าตามลำดับ ปรากฏการณ์นี้เกิดลักษณะเดียวกันกับกรณีไม่มีอนุภาคภายในหลุมทั้งในเรื่องรูปแบบการหมุนวนและขนาดดังรูปที่ 4.15ก

แกน Y : ลักษณะการกระจายตัวการหมุนวนและขนาดของหลุมทั้งสามคล้ายกับกรณีไม่มีอนุภาคภายในหลุม กล่าวคือลักษณะการหมุนสามเหลี่ยมมุมเท่าจะมีลักษณะการหมุนจากด้านล่างหมุนเข้าหาผนังทั้งสองข้างของหลุมโดยขนาดการหมุนนั้นจะเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อระยะเริ่มห่างจากผนังนอกจากนี้บริเวณด้านท้ายของหลุมจะมีลักษณะการหมุนกลับทิศแต่มีพื้นที่การกระจายตัวที่ต่ำกว่า โดยขนาดและลักษณะของการหมุนนี้มีค่าใกล้เคียงกันในสามเหลี่ยมทั้งสามรูปแบบดังรูปที่ 4.15ข

แกน Z : ลักษณะการกระจายตัวการหมุนและขนาดของสามเหลี่ยมทั้งสามคล้ายกับกรณีไม่มีอนุภาคภายในหลุม กล่าวคือสามเหลี่ยมมุมเท่ามีลักษณะการหมุนเข้าหาผนังของหลุมในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาในบริเวณพื้นที่สีแดงและหมุนตามเข็มนาฬิกาบริเวณพื้นที่สีน้ำเงิน โดยที่บริเวณขอบเอียงสามเหลี่ยมจะเกิดการกระจายตัวการหมุนรุนแรงและมีลดลงเมื่อระยะเริ่มห่างออกจากผนังจนกระทั่งแทบไม่มีการหมุนวนบริเวณกลางหลุมส่งผลให้บริเวณพื้นที่และขนาดที่เกิดการหมุนวนของสามเหลี่ยมมุมป้านมีค่าต่ำกว่าสามเหลี่ยมมุมเท่าและมุมแหลมตามลำดับดังรูปที่ 4.15ค

- หลุมจุลภาคที่ระดับความลึก 150 μm มีอนุภาคภายในหลุม

แกน X : สามเหลี่ยมมุมเท่ามีการกระจายตัวการหมุนกว้างช่วงกลางของสามเหลี่ยมมีทิศทางขนานกับผนังท้ายผนังโดยมีแกนการหมุนในทิศ -X และมีขนาดสูงสุดอยู่ที่ 39.8 s^{-1} ขนาดลดลงเมื่อระยะเริ่มห่างจากจุดศูนย์กลาง โดยสามเหลี่ยมมุมแหลมและสามเหลี่ยมมุมป้านมีลักษณะการหมุนวน

คล้ายกันแต่มีขนาดต่ำกว่าและมากกว่าเพียงเล็กน้อยตามลำดับ ในขณะที่ตำแหน่งท้ายหลุมเหนืออนุภาคบริเวณใกล้มุมยอดทั้งสามจะเกิดการหมุนวนในทิศทางตรงกันข้ามแต่มีการกระจายตัวเพียงเล็กน้อยเท่านั้นดังรูปที่ 4.21ก

แกน Y : สามเหลี่ยมมุมเท่าเกิดการหมุนวนลักษณะม้วนเข้าหาผนังหลุมทั้งสองข้างโดยตำแหน่งการหมุนวนอยู่บริเวณเหนืออนุภาคทั้งหมดยกเว้นอนุภาคที่อยู่มุมยอดฝั่งต้นน้ำของสามเหลี่ยม กล่าวคือขนาดการหมุนวนมีความรุนแรงสูงเหนืออนุภาคที่วางตัวช่วงกลางและท้ายหลุมเท่านั้นโดยสามเหลี่ยมมุมป้านมีขนาดและพื้นที่การกระจายตัวการหมุนวนมากสุดในขณะที่สามเหลี่ยมมุมแหลมเกิดการกระจายตัวการหมุนวนต่ำมาดังรูปที่ 4.21ข

แกน Z : สามเหลี่ยมมุมเท่ามีการกระจายตัวการหมุนวนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาในกรณีสีแดงและทิศทางตามเข็มนาฬิกาในกรณีสีน้ำเงินซึ่งการหมุนวนกระจายตัวหนาแน่นที่สุดบริเวณช่วงกลางและผนังด้านท้ายของสามเหลี่ยมแต่มีขนาดการหมุนวนที่ต่ำมากอยู่ที่ประมาณ 18 s^{-1}

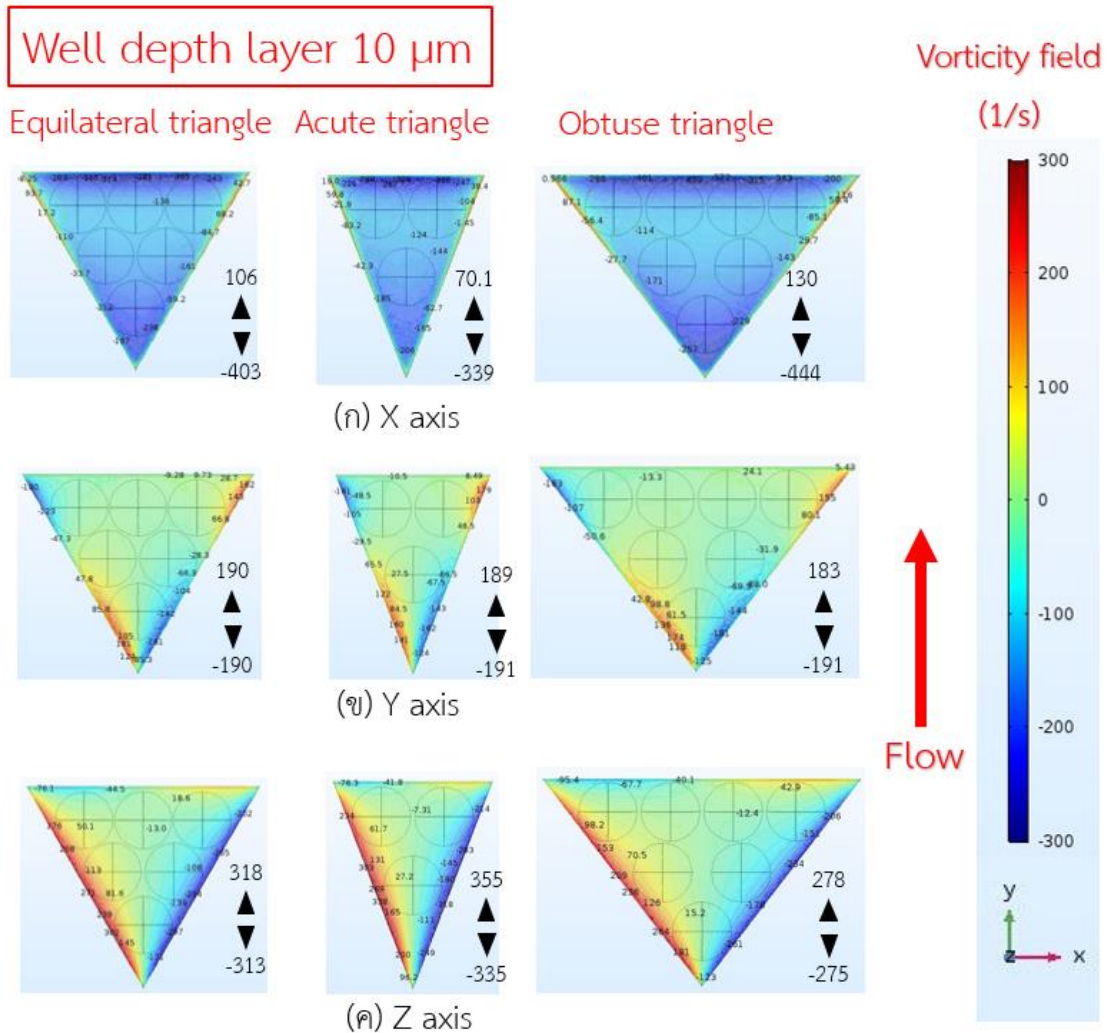
โดยสามเหลี่ยมมุมป้านมีขนาดและพื้นที่การกระจายตัวการหมุนวนมากสุดในขณะที่สามเหลี่ยมมุมแหลมเกิดการกระจายตัวการหมุนวนต่ำมาดังรูปที่ 4.21ค

- หลุมจุลภาคที่ระดับความลึก $300 \mu\text{m}$ มีอนุภาคภายในหลุม

แกน X : สามเหลี่ยมมุมเท่ามีการกระจายตัวการหมุนวนขนานกับผนังด้านหลังตามแนวแกน +X โดยมีตำแหน่งการกระจายตัวการหมุนวนอยู่ระหว่างอนุภาคและขอบของสามเหลี่ยม ในขณะที่สามเหลี่ยมที่เหลือเกิดการหมุนวนเช่นเดียวกันแต่สามเหลี่ยมมุมป้านมีขนาดและพื้นที่การกระจายตัวของการหมุนวนบริเวณมุมยอดฝั่งต้นน้ำกว้างยาวลึกลงไปถึงบริเวณกลางหลุมดังรูปที่ 4.22ก

แกน Y : สามเหลี่ยมมุมแหลมเกิดการกระจายตัวการหมุนวนในทิศทางม้วนเข้าหาขอบผนังเอียงแต่การกระจายตัวอยู่บริเวณช่องว่างระหว่างอนุภาคและผนังหลุมโดยมีขนาดสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 4.47 s^{-1} สามเหลี่ยมทั้งสามมีรูปแบบการกระจายตัวเหมือนกัน โดยสามเหลี่ยมมุมแหลมมีขนาดที่ต่ำกว่าประมาณสองเท่าในขณะที่สามเหลี่ยมมุมป้านมีขนาดการกระจายตัวมากกว่าเกือบสองเท่าดังรูปที่ 4.22ข

แกน Z : ขนาดการหมุนวนของสามเหลี่ยมทั้งสามรูปแบบเข้าใกล้ศูนย์ดังรูปที่ 4.22ค



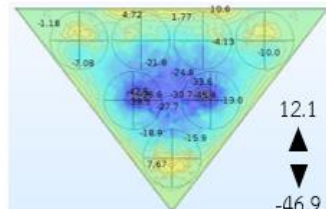
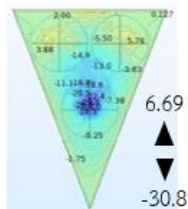
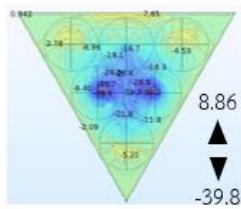
รูปที่ 4.20 การกระจายตัวการหมุนวน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 10 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

Well depth layer 150 μm

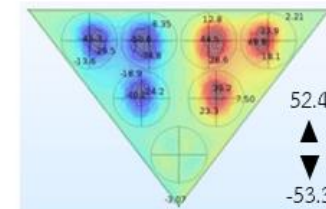
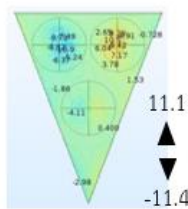
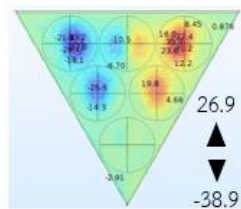
Equilateral triangle Acute triangle Obtuse triangle

Vorticity field

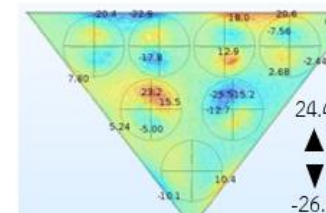
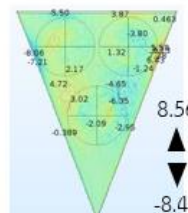
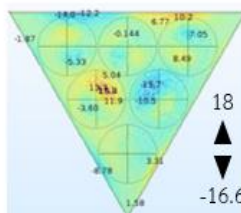
(1/s)



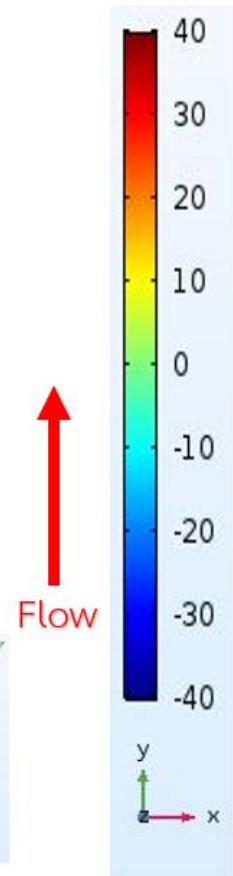
(ก) X axis



(ข) Y axis



(ค) Z axis



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

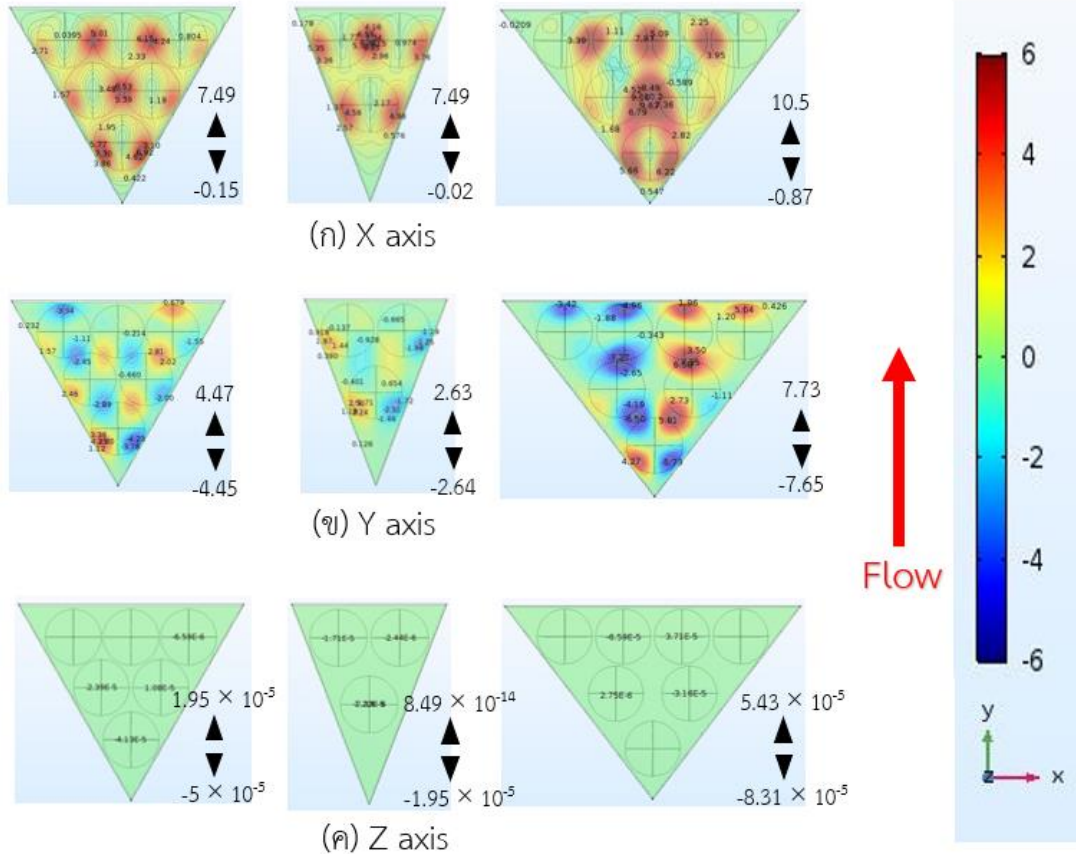
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.21 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 150 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

Well depth layer 300 μm

Equilateral triangle Acute triangle Obtuse triangle

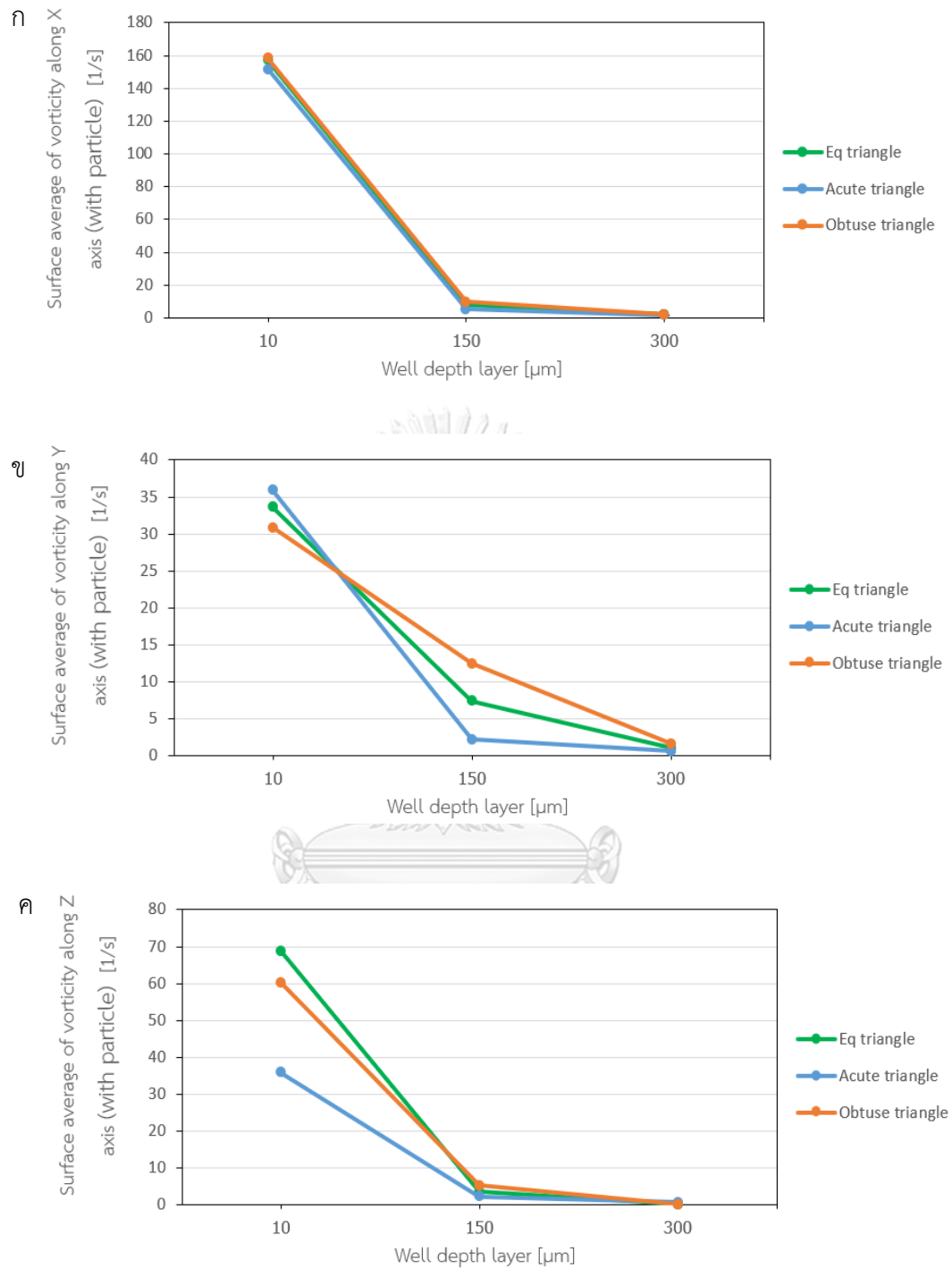
Vorticity field
(1/s)



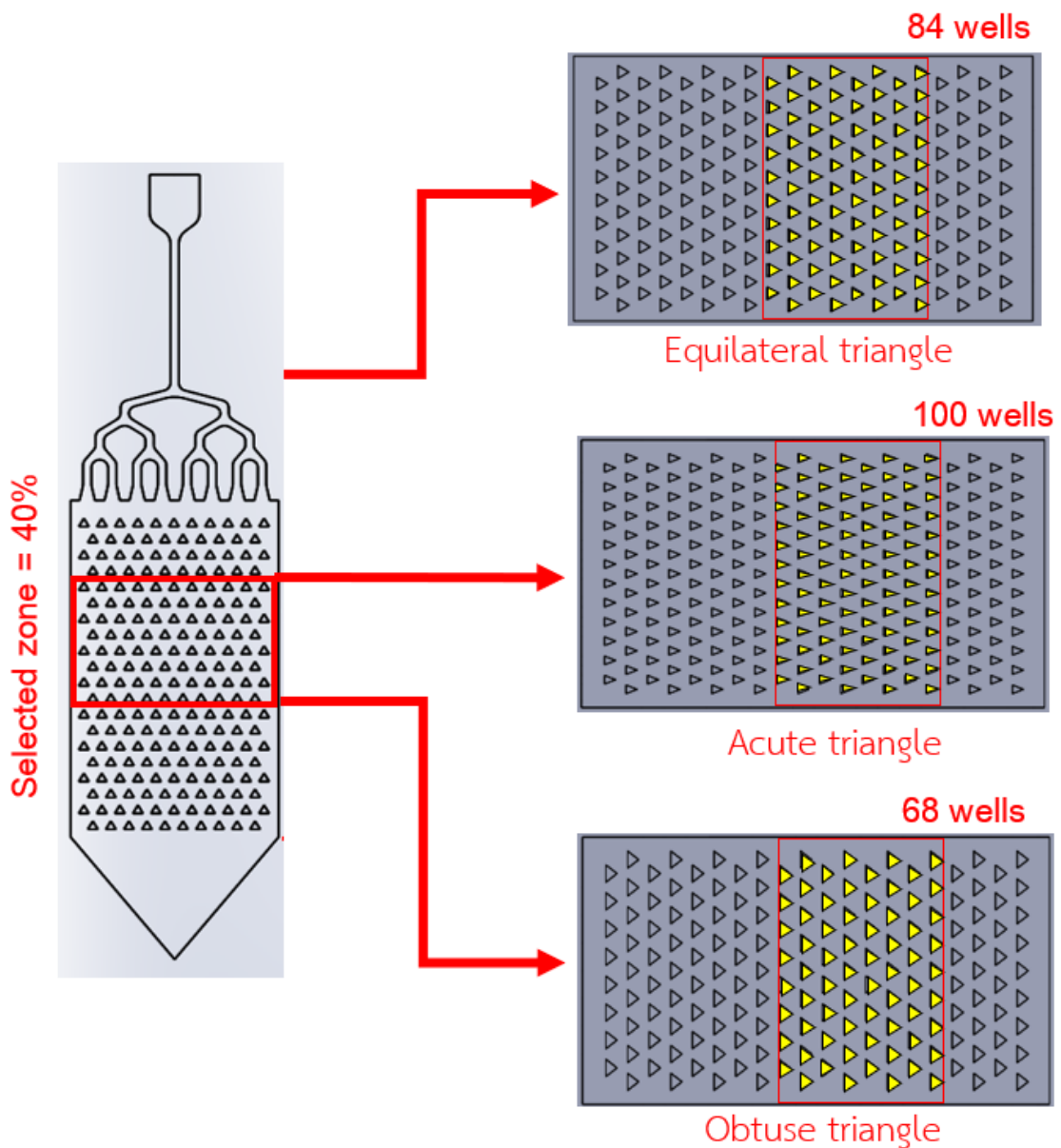
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.22 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 300 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



รูปที่ 4.23 กราฟขนาดการกระจายตัวการหมุนภายในหลุมเฉลี่ยเทียบพื้นที่ผิวระนาบความลึกต่างๆ มีอนุภาคภายในหลุม สำหรับกรณี (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



รูปที่ 4.24 พื้นที่เก็บผลการทดลองในกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้านสำหรับการทดลองระยะสั้น

จากผลการจำลองการไหลสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้านในกรณีไม่มีอนุภาคภายในหลุม พบว่าที่ระนาบความลึกหลุม $10\ \mu\text{m}$ มีการกระจายตัวการหมุนภายในหลุมเฉลี่ยเทียบพื้นที่ผิวไม่ต่างจากกรณีไม่มีอนุภาคภายในหลุมดังรูปที่ 4.19ก-ค หากอนุภาคที่ถูกดัก

จับเกิดขยับตัวลงสูงขึ้นจากพื้นหลุมอาจจะถูกการหมุนวนทั้งสามแนวแกนกระตุ้นจนเคลื่อนที่ลอยปะทะเส้นการไหลหลักบริเวณปากหลุมซึ่งมีความเร็วสูงหลุดออกจากหลุมไปได้

ในระนาบความลึกหลุม $150 \mu\text{m}$ ในกรณีมีอนุภาคภายในหลุมของหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าแต่ละสามเหลี่ยมมุมป้านตามแนวแกน Y พบว่าการกระจายตัวการหมุนดังกล่าวอาจดันอนุภาคออกทั้งหมดได้เหลือเพียงอนุภาคเดียวและยังมีความเป็นไปได้ว่าอนุภาคเดียวที่เหลืออยู่จะถูกกักไว้บริเวณมุมยอดฝั่งต้นน้ำดังกล่าวเนื่องจากการหมุนวนตามแนวแกน X ช่วยดันมาฝั่งด้านหน้าหลุมรวมกับการหมุนวนทั้งสองข้างตามแนวขอบของสามเหลี่ยมจากฝั่งซ้ายมาฝั่งหน้าตามแนวแกน Y ช่วยประคองให้อนุภาคอยู่ตรงกลางได้แต่หากแรงเกิดความไม่สมดุลระหว่างด้านใดด้านหนึ่งจนส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่ออกจากมุมยอดแล้วอนุภาคอาจจะหลุดออกจากหลุมได้ในขณะที่สามเหลี่ยมมุมป้านมีขนาดและการกระจายตัวการหมุนวนที่ระดับความลึกต่างๆมากกว่าสามเหลี่ยมด้านเท่าอนุภาคจึงอาจจะถูกดันออกได้ง่ายกว่าในขณะที่สามเหลี่ยมมุมแหลมมีความเป็นไปได้สูงที่จะกักเก็บอนุภาคไว้ในหลุมได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสามเหลี่ยมทั้งหมดเนื่องจากมีขนาดและการกระจายตัวการหมุนที่ระนาบต่างๆต่ำมาก ดังนั้นการศึกษาจำลองการไหลหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าอาจจะสามารถดักจับอนุภาคเดียวได้มีประสิทธิภาพมากที่สุดในขณะที่หลุมสามเหลี่ยมมุมป้านอาจจะไม่สามารถดักจับอนุภาคได้เลยหรือดักจับได้น้อยมากและสามเหลี่ยมมุมแหลมมีความสามารถในการกักเก็บอนุภาคไว้ในหลุมได้สูงที่สุด

หากพิจารณารูปขนาดการกระจายตัวการหมุนภายในหลุมเฉลี่ยระนาบเปรียบเทียบในกรณีที่ไม่ใช่อนุภาคและมีอนุภาคภายในหลุมดังรูปที่ 4.19x และรูปที่ 4.23x ที่ระนาบความลึก $150 \mu\text{m}$ พบว่าในกรณีมีอนุภาคภายในหลุม สามเหลี่ยมมุมป้านมีขนาดแรงหมุนวนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างมาก สามเหลี่ยมมุมเท่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่สามเหลี่ยมมุมแหลมแทบจะไม่เพิ่มขึ้นเลย ซึ่งหากพิจารณารวมกันกับตำแหน่งการกระจายตัวของการหมุนดังรูปที่ 4.21x แล้ว พบว่าพื้นที่การหมุนจะกระจายอยู่เหนือบริเวณอนุภาคยกเว้นอนุภาคด้านหน้าหลุมส่งผลให้อนุภาคตำแหน่งนี้อาจไม่ถูกดันออกจนกลายเป็นอนุภาคเดียวที่ถูกดักจับภายในหลุมได้

เหตุผลดังกล่าวส่งผลให้อนุภาคภายในสามเหลี่ยมมุมแหลมมีความเป็นไปได้ต่ำที่จะถูกดันออกจากหลุมเช่นเดียวกันเนื่องจากมีพื้นที่การกระจายตัวและขนาดการหมุนต่ำมาก ในขณะที่สามเหลี่ยมมุมป้านมีขนาดแรงหมุนวนเฉลี่ยสูงอาจดันอนุภาคหลุดออกจากหลุมได้มากที่สุด ในขณะที่มุมเท่ามีความได้เปรียบเรื่องความสมดุลของด้าน มีขนาดและพื้นที่การกระจายการหมุนที่สมดุล ส่งผลให้แรงหมุนวนอาจจะผลักดันอนุภาคออกบางส่วนจนเหลืออนุภาคเดียวได้

จากผลกระการกระจายตัวของเส้นความเร็วของรูปแบบช่องการไหลที่มีท่อแยกฝั่งขาเข้าและทางออกแบบสามเหลี่ยมพบว่าการไหลบริเวณช่วงฝั่งท้ายช่องการไหลยังมีลักษณะโค้งเล็กน้อยถึงแม้การไหลหลักจะมีลักษณะขนานกันก็ตามเพื่อความสอดคล้องกันระหว่างการจำลองการไหลภายในหลุมและการทดลองจึงมีแนวคิดในการเลือกช่วงเก็บข้อมูลโดยเลือกเก็บข้อมูลในช่วงที่มีเส้นการไหลผ่านเป็นลักษณะเส้นตรงมากที่สุดดังนั้นจึงเลือกช่วงกลางของช่องการไหลหลักโดยตามแนวยาวนับจากฝั่งด้านหน้ามา 4 แถวของหลุม และขยับจากฝั่งด้านหลังมา 8 แถวของหลุมดังรูปที่ 4.24 โดยจำนวนหลุมภายในช่วงเก็บข้อมูลของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้านมี 84, 100 และ 68 หลุมตามลำดับซึ่งคิดเป็นประมาณร้อยละ 40 ของจำนวนหลุมทั้งหมด ทั้งนี้เหตุผลที่เลือกตัดช่วงท้ายช่องการไหลเนื่องจากหลีกเลี่ยงเส้นการไหลในลักษณะโค้งและตัดช่วงหน้าของช่องการไหลเพื่อให้มั่นใจว่าของไหลมีเส้นการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่งพื้นของช่องการไหล โดยลำดับต่อไปจะกล่าวถึงการออกแบบระบบทั้งช่องการไหลและหลุมโดยมีรายละเอียดต่อไปนี้

4.2 การออกแบบแม่พิมพ์

โดยทั่วไปการสร้างช่องทางการไหลจุลภาคเกิดจากการนำชิ้นงานที่มีลวดลายของช่องการไหลประกบกันกับชิ้นงานอีกชิ้นหรือประกบกับกระจกใสลัด เพื่อสร้างระบบของช่องการไหล โดยชิ้นงานเหล่านี้จะถูกขึ้นรูปมาจากแม่พิมพ์ต้นแบบ ดังกล่าวในบทที่ 3 อนึ่งการออกแบบและวาดรูปทรงเรขาคณิตเพื่อใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ต้นแบบนี้ถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรมเขียนแบบ Solidwork® 2015 โดยมีรายละเอียดในการออกแบบดังนี้

4.2.1 การออกแบบแม่พิมพ์ส่วนบน

แม่พิมพ์ส่วนบนถูกสร้างเพื่อทำหน้าที่หลักเพื่อกำหนดเงื่อนไขเรื่องความสูงของผนังช่องทางเดิน และ ลวดลายช่องทางเดินของของไหล ซึ่งความสูงดังกล่าวจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยเปลี่ยนแปลงความสูงของแม่พิมพ์ในส่วนนี้

- ขนาดของแม่พิมพ์ส่วนบนแบบเก่า (Previous design : Top)

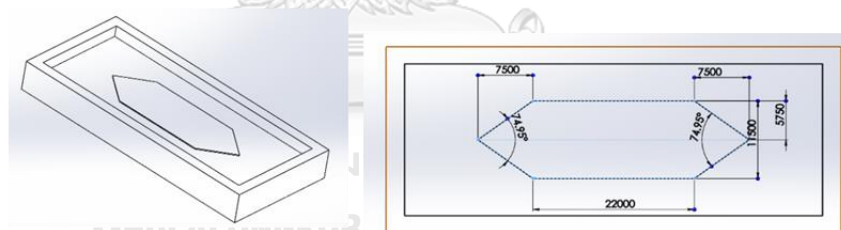
รูปร่างโดยรวมของแม่พิมพ์ส่วนบนมีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมผืนผ้าแนวนอนจากนั้นถูกประกบปลายด้วยสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่มุมทั้งสองด้าน (ทำหน้าที่เป็นช่องทางเข้าและทางออก) ดังรูปที่ 4.25 โดย

ขนาดของสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้ มีความกว้าง 11.5 mm ความยาว 22 mm และความสูง (ณ ตำแหน่งช่อง การไหล) 250 μm

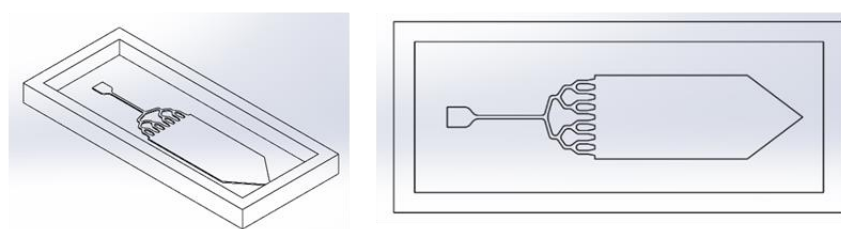
- ขนาดของแม่พิมพ์ส่วนบนแบบใหม่ (New design : Top)

เนื่องจากแบบของแม่พิมพ์ส่วนบนแบบเก่ามีข้อเสียบางประการ จึงได้ทำการออกแบบเพิ่มเติมอีก 3 รูปแบบด้วยกัน (กล่าวในหัวข้อ 4.1.4.1) รูปร่างโดยรวมของแม่พิมพ์ส่วนบนแบบใหม่ que เลือก นำมาใช้งานมีความแตกต่างจากแบบเดิมในส่วนช่องทางเข้า (Inlet port) เพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอในการไหลทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดภายในช่องการไหล จากเดิมช่องทางเข้าเป็นสามเหลี่ยมหน้าจั่วแต่ในแบบ ใหม่ได้ออกแบบท่อแยกออกมาจากท่อหลักจากหนึ่งท่อกลายเป็น 8 ท่อ ดังรูปที่ 4.25 ก่อนจะ เชื่อมต่อกับส่วนที่เป็นช่องการไหลหลักดั้งเดิม ทั้งนี้เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของการไหลทั่วทั้ง พื้นที่หน้าตัด ดัง โดยช่องการไหลหลักมีความกว้าง 12.52 mm ความยาว 22 mm และความสูง (ณ ตำแหน่งช่องการไหล) 350 μm ส่วนที่เป็นท่อแยกเล็กมีความกว้างของท่อ 500 μm รวมความยาว ท่อจุดเริ่มต้นจนถึงปลายท่อทางแยกทั้ง 8 ยาว 26 mm

Top mold (previous design)



Top mold (new design)



รูปที่ 4.25 ภาพการออกแบบชิ้นงานด้านบน

4.2.2 การออกแบบแม่พิมพ์ส่วนล่าง

แม่พิมพ์ส่วนล่างถูกสร้างเพื่อทำหน้าที่ในการสร้างช่องทางเดินของของไหล และ ตำแหน่งของ หลุมจุลภาครูปทรงสามเหลี่ยม

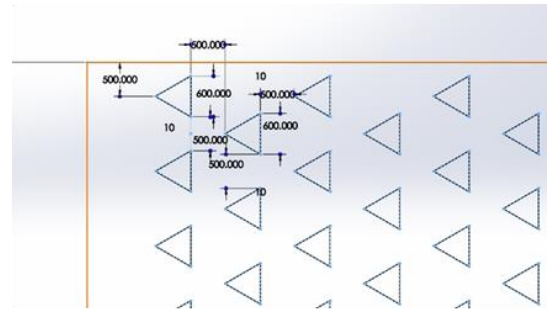
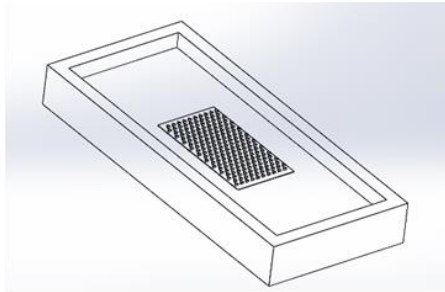
- ขนาดของแม่พิมพ์ส่วนล่างแบบเก่า (Previous design : Bottom)

แม่พิมพ์ส่วนล่างนี้มีฐานเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเช่นเดียวกับส่วนแบบแม่พิมพ์ส่วนบนคือมีความกว้าง 11.5 mm และ ความยาว 22 mm แต่จะมีความหนาอยู่เพียงแค่ 100 μm บนฐานนี้มี สามเหลี่ยมมุมเท่าเท่าอันมีความสูง 300 μm เรียงตัวเป็นฟิสิกส์จำนวน 200 ตำแหน่ง ด้านกว้างของฐานมีจำนวน 10 ตำแหน่ง และด้านยาวของฐานมีจำนวน 20 ตำแหน่ง สามเหลี่ยมด้านเท่าอันมีความยาวด้านละ 600 μm ระยะจากปลายหัวของสามเหลี่ยมถึงขอบฐานด้านกว้างและด้านยาวมีขนาด 1 mm และ 500 μm ตามลำดับดังรูปที่ 4.26

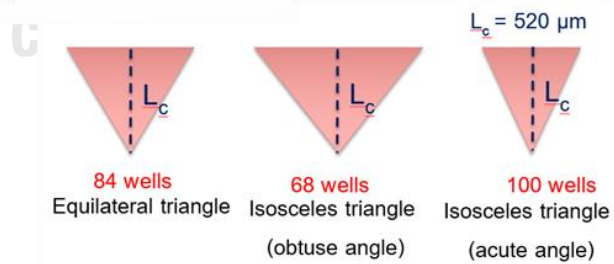
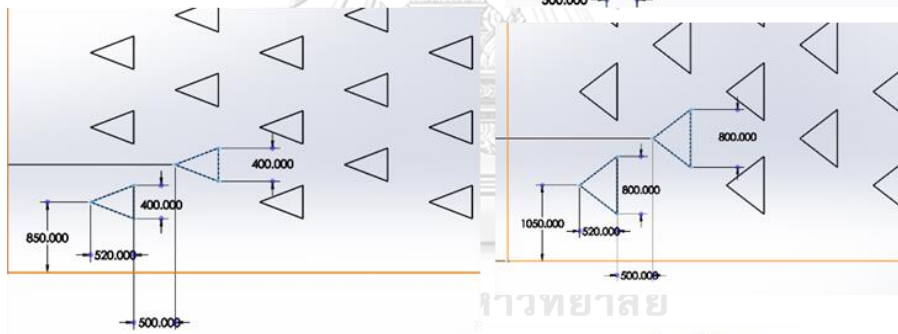
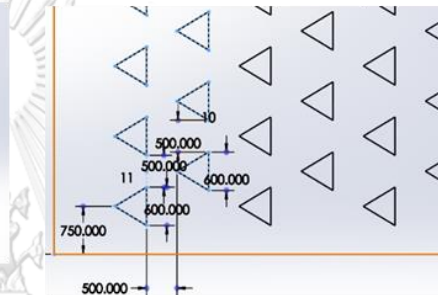
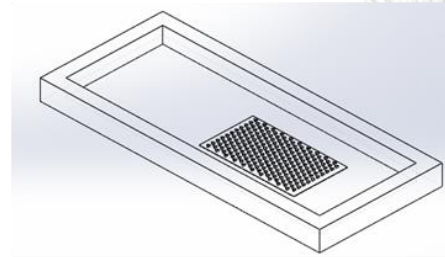
- ขนาดของแม่พิมพ์ส่วนล่างแบบใหม่ (New design : Bottom)

แม่พิมพ์ส่วนล่างที่ถูกออกแบบมาใหม่นี้มีความเหมือนกันทุกประการกับแม่พิมพ์ส่วนล่างแบบเดิมแต่มีขนาดด้านต่างๆเท่ากับแม่พิมพ์ส่วนบนแบบใหม่และมีรูปแบบสามเหลี่ยมที่มีมุมภายในแตกต่างกันเพิ่มขึ้น คือ สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้านโดยสามเหลี่ยมทั้งสามรูปแบบมีความสูงหรือความยาวลักษณะจำเพาะ (L_c) เท่ากันคือ 520 μm ฐานของสามเหลี่ยมมุมเท่า มุมแหลม และมุมป้านยาว 600, 400 และ 800 μm ตามลำดับ และมีจำนวนหลุม 210, 250 และ 170 ตามลำดับ จำนวนตามความกว้าง 11, 13 และ 9 แถว ตามลำดับ ระยะห่างของฐานแต่ละอันของสามเหลี่ยมทุกแบบมีระยะที่ 500 μm และจำนวนตามความยาว 20 แถว ส่วนตำแหน่งกลุ่มสามเหลี่ยมจะเลื่อนไปทางด้านหลังเล็กน้อยเพื่อเหลือพื้นที่ด้านหน้ามากพอสำหรับท่อทางเข้าที่ได้ ออกแบบใหม่ดังรูปที่ 4.26

Bottom mold (previous design)



Bottom mold (new design)



รูปที่ 4.26 ภาพการออกแบบชิ้นงานด้านล่าง (หลุมสามเหลี่ยม)

4.3 สรุปผล

การคำนวณทางคอมพิวเตอร์ของอุปกรณ์ดักจับอนุภาคเพื่อนำมาใช้เป็นตัวช่วยในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับ โดยการจำลองการไหลได้แบ่งออกเป็น การจำลองการไหลภายในช่องการไหลหลัก 3 รูปแบบและภายในหลุมรูปทรงสามเหลี่ยมที่มีมุมภายในแตกต่างกัน 3 รูปแบบเป็นการจำลองการไหลแบบ 3 มิติเมื่อทำการจำลองการไหลและแสดงผลออกมาในรูปของเส้นความเร็วและลักษณะการหมุนของของไหล พบว่าพฤติกรรมการกระจายตัวของเส้นความเร็วภายในช่องการไหลหลักมีความแตกต่างกันเนื่องจากจากอิทธิพลของการออกแบบรูปร่างทางเข้าและทางออก และพบว่าระดับการเส้นของเส้นการไหลที่มุดตัวเข้าสู่หลุมจะอยู่ระดับพื้นช่องการไหลดังนั้นการออกแบบช่องการไหลหลักที่ความสูงไม่มากส่งผลให้อาจจะดักจับอนุภาคได้ดีกว่า ทั้งนี้ได้เลือกช่วงเก็บข้อมูลของการทดลองบริเวณกลางของช่องการไหลหลักเพื่อหลีกเลี่ยงเส้นการไหลโค้งซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักจับ เมื่อทำการพิจารณาผลการจำลองการไหลภายในหลุมและแสดงผลออกมาในรูปเส้นความเร็วและการหมุนของของไหล พบว่าช่วงดักจับอนุภาคอยู่ช่วงกลางของสามเหลี่ยม สามเหลี่ยมมุมป้านจะมีระยะที่กว้างสุดรองลงมาคือสามเหลี่ยมมุมเท่าและมุมแหลมตามลำดับและพบว่าหลุมทั้งสามชนิดที่ได้กล่าวมาเกิดการหมุนในลักษณะคล้ายคลึงกันแต่ต่างกันในเรื่องขนาดและพื้นที่การกระจายตัวที่เกิดขึ้นทั้งในกรณีหลุมไม่มีอนุภาคและหลุมมีอนุภาคภายใน โดยหลุมขนาดใหญ่จะมีขนาดและการกระจายการหมุนสูงบริเวณพื้นหลุมและมีขนาดต่ำบริเวณปากหลุม

จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลและผลที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับดักจับอนุภาค ทำให้สรุปการออกแบบอุปกรณ์การดักจับดังนี้ ช่องการไหลรูปแบบทางเข้าแบบท้อแยกเนื่องจากมีลักษณะการกระจายตัวของการไหลขนานเป็นเส้นตรงทั่วช่องการไหลหลักมากที่สุด ในกรณีหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้านมีฐานยาว 600, 400 และ 800 μm ตามลำดับ มีความสูงหรือเส้นความยาวลักษณะจำเพาะ 520 μm เพื่อศึกษาความแตกต่างของอิทธิพลการหมุนของของไหลภายในหลุม และการกระจายตัวของการหมุนของสามเหลี่ยมมุมเท่า มีขนาดและการกระจายตัวการหมุนระดับกลางเมื่อเทียบกับสามเหลี่ยมมุมแหลมและสามเหลี่ยมมุมป้าน จึงส่งผลให้หลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าดังกล่าวผลักตันอนุภาคจากหลุมได้บางส่วนและมีโอกาสดักจับอนุภาคได้มากกว่าหลุมอื่น หลุมสามเหลี่ยมมุมแหลมมีโอกาสผลักตันอนุภาคได้ต่ำในขณะที่หลุมสามเหลี่ยมมุมป้านอาจจะตันอนุภาคออกจากหลุมจนหมด

บทที่ 5

ผลการทดลอง

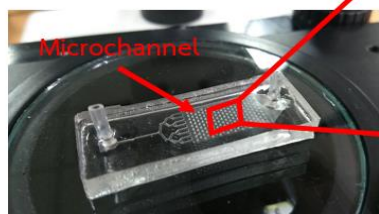
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองของอุปกรณ์ที่ได้ศึกษาและทำการออกแบบใหม่ซึ่งกระบวนการติดตั้งอุปกรณ์จะมีลักษณะเหมือนกับการศึกษาเบื้องต้น (บทที่3) โดยอุปกรณ์ใหม่ประกอบไปด้วยส่วนช่องการไหลหลักรูปแบบมีท่อแยกฝั่งขาเข้าแยกออกเป็น 8 ท่อย่อยก่อนจะเข้าสู่ช่องการไหลหลัก และพื้นช่องการไหลหลักมีหลุมสามเหลี่ยมวางตัวเรียงอยู่ด้านล่างสลับพื้นปลา ซึ่งรูปร่างหลุมสามเหลี่ยมนี้มีสามรูปแบบคือ สามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน ซึ่งแต่ละขนาดมีความลึกหลุม 300 μm และมีความสูงหรือความยาวลักษณะจำเพาะ 520 μm ทั้งนี้ได้ตัดรอบพื้นที่เก็บข้อมูลช่วงกลางช่องการไหลหลัก อย่างไรก็ตามรูปแบบการทดลองได้เปลี่ยนแปลงจากการศึกษาเบื้องต้นเล็กน้อย จากเดิมดักจับอนุภาคภายในหลุมทันทีเปลี่ยนเป็นการดักจับอนุภาคภายในหลุมให้เต็มแน่นทุกหลุมก่อน จากนั้นใช้กลไกของของไหลที่อัตราการไหลสูงดันอนุภาคออกจากหลุมดังได้กล่าวแล้วในบทที่ 4 ตามเวลาที่กำหนดจึงนิยามอนุภาคที่ไหลภายในหลุมเป็นอนุภาคที่ถูกดักจับ โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) ผลการทดลองดักจับอนุภาคระยะสั้น ทำการทดลองภายในระยะเวลา 30 วินาที โดยเก็บผลทุก 5 วินาที 2) ผลการทดลองดักจับอนุภาคระยะยาว ทำการทดลองภายในระยะเวลา 2 นาที โดยเก็บผลทุก 15 วินาที

5.1 อุปกรณ์ดักจับอนุภาคแบบใหม่และวิธีการทดลอง

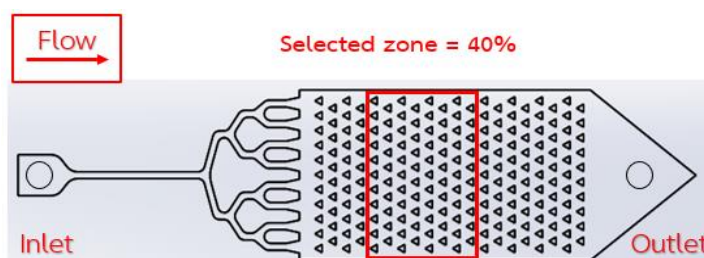
หลังจากวิเคราะห์การคำนวณด้วยระบบคอมพิวเตอร์แล้วสามารถสรุปพารามิเตอร์และรูปร่างของอุปกรณ์การดักจับได้ดังรูปที่ 5.1ก โดยช่องการไหลหลักจะมีความกว้าง 12.5 mm ความยาว 22 mm และความสูง 350 μm ซึ่งบริเวณด้านล่างของพื้นช่องการไหลจะมีหลุมสามเหลี่ยมวางเรียงตัวลักษณะพื้นปลาโดยมีหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้าน (ในหนึ่งอุปกรณ์มีหลุมเพียงชนิดเดียว) ความลึก 300 μm สำหรับดักจับอนุภาคขนาด 150 μm

ขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์เหมือนกันกับการทดลองเบื้องต้นแต่รูปแบบการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยโดยจะทำการดักจับอนุภาคให้เต็มหลุมก่อนจากนั้นเพิ่มอัตราการไหลของไหลสูงขึ้นที่ 350 และ 500 ml/hr ผลักดันอนุภาคออกจากหลุมอนุภาคที่เหลืออยู่ภายในหลุมหลังจากการทดลองถือเป็นอนุภาคที่ถูกดักจับ เริ่มจากเตรียมความเข้มข้นของสารละลายเม็ดพลาสติก

อยู่ที่ 1,200 – 1,500 อนุภาค / ml ประมาณ 2 – 3 ml ใช้อัตราการไหลต่ำประมาณ 7 – 10 ml/hr เพื่อลดโมเมนต์ความเฉื่อยของอนุภาคส่งผลให้อนุภาคกระจายตัวทั่วพื้นที่หน้าตัดช่องการไหลหลัก เมื่อดักจับอนุภาคได้เต็มหลุมแล้วเพิ่มระดับสารละลายจนมีปริมาตร 15 ml จากนั้นเพิ่มอัตราการไหล แบ่งเป็นสองเงื่อนไขคือ 350 และ 500 ml/hr เป็นระยะเวลา 30 วินาที เก็บผลทุกๆ 5 วินาทีสำหรับ กรณีการทดลองดักจับอนุภาคระยะสั้นจากนั้นทำซ้ำ 6 รอบและเพิ่มอัตราการไหล 2 นาทีเก็บผลทุกๆ 15 วินาทีสำหรับกรณีการทดลองดักจับอนุภาคระยะยาวจากนั้นทำซ้ำ 2 รอบแล้วนำผลที่ได้มานับ เพื่อดูประสิทธิภาพการดักจับโดยใช้วิธีนับจากภาพนิ่งที่ได้จากวิดีโอโดยเลือกช่วงดักจับอนุภาคบริเวณ ช่วงกลางของช่องการไหลดังรูปที่ 5.1 ข ซึ่งจำนวนหลุมในหนึ่งภาพมีจำนวน 84, 100, 68 หลุมสำหรับ กรณีสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้านตามลำดับคิดเป็นร้อยละ 40 ของจำนวนหลุมทั้งหมด ซึ่งหลักการนับจะนับจากจำนวนหลุมที่สามารถดักจับอนุภาคจำนวนเดี่ยว อนุภาคคู่ และตั้งแต่สามอนุภาคขึ้นไป เพื่อนำมาใช้เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของอุปกรณ์โดยผลการ ทดลองจะกล่าวถึงผลลัพธ์จากการดักจับอนุภาคออกจากหลุมที่อัตราการไหลสูงเท่านั้น



ก



ข

รูปที่ 5.1 (ก) อุปกรณ์ดักจับอนุภาค, (ข) ตำแหน่งการเก็บผลการทดลองสำหรับการทดลองระยะสั้น

5.2 การแปรผลการทดลอง

การเก็บผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 4 ชุดข้อมูลคือ จำนวนหลุมที่ดักจับอนุภาคเดี่ยว จำนวนหลุมที่ดักจับอนุภาคคู่ จำนวนหลุมที่ดักจับอนุภาคตั้งแต่สามอนุภาคขึ้นไป และจำนวนหลุมเปล่าดังภาพในภาคผนวก ข หลังจากได้ข้อมูลแล้วจะนำมาแปรผลโดยคิดเป็นอัตราส่วนโดยเป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนหลุมของชุดข้อมูลที่ต้องการศึกษาต่อจำนวนหลุมทั้งหมดที่มีอยู่ เช่น หากสามเหลี่ยมมุมแหลมมีจำนวนหลุมทั้งหมด 100 หลุม แต่วินาทีที่ 15 จำนวนสามเหลี่ยมมุมแหลมสามารถดักจับอนุภาคเดี่ยว คู่ สามขึ้นไป และไม่มีอนุภาค คือ 10, 45, 43 และ 2 หลุม ตามลำดับ อัตราส่วนของจำนวนหลุมของสามเหลี่ยมมุมแหลมวินาทีที่ 15 สำหรับการดักจับเดี่ยว คู่ สามขึ้นไป และไม่มีอนุภาค คือ 0.1, 0.45, 0.43 และ 0.02 ตามลำดับ โดยจากนี้ไปการแสดงผลการทดลองจะแสดงในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเวลาและจำนวนหลุมในกรณีต่างกัน

5.3 ผลการทดลองดักจับอนุภาคระยะสั้น

5.3.1 ผลการทดลองการดักจับอนุภาคระยะสั้น อัตราการไหล 350 ml/hr

ผลการทดลองดักจับอนุภาคของหลุมทั้งสามรูปแบบระยะสั้นที่อัตราการไหล 350 ml/hr พบว่าตำแหน่งการดักจับอนุภาคกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งอุปกรณ์ เมื่อเวลาผ่านไป 30 วินาทีที่จำนวนหลุมที่มีมากกว่าสามอนุภาคขึ้นไปของสามเหลี่ยมมุมเท่ามีปริมาณสูงสุด รองลงมาคือสามเหลี่ยมมุมป้านและสามเหลี่ยมมุมแหลมซึ่งคิดเป็นร้อยละ 100, 92.2 และ 83.8 ตามลำดับ จำนวนหลุมที่มีอนุภาคคู่ของสามเหลี่ยมมุมแหลมมีปริมาณสูงสุด รองลงมาคือสามเหลี่ยมมุมป้านและสามเหลี่ยมมุมเท่าซึ่งคิดเป็นร้อยละ 13.7, 3.4 และ 0 ตามลำดับ จำนวนหลุมที่มีอนุภาคเดี่ยวสูงสุดคือสามเหลี่ยมมุมแหลม รองลงมาคือสามเหลี่ยมมุมป้านและสามเหลี่ยมมุมเท่าซึ่งคิดเป็นร้อยละ 2.5, 2 และ 0 ตามลำดับและสามเหลี่ยมที่เป็นหลุมเปล่าสูงสุดคือสามเหลี่ยมมุมป้าน รองลงมาคือสามเหลี่ยมมุมเท่าซึ่งเท่ากับสามเหลี่ยมมุมแหลมซึ่งคิดเป็นร้อยละ 0.2, 0 และ 0 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามความแตกต่างของจำนวนหลุมในการดักจับอนุภาคมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้นซึ่งคิดเป็นอยู่ในช่วงร้อยละ 10 – 20 ดังรูปที่ 5.2 และ รูปที่ 5.4

ทั้งนี้อัตราการไหล 350 ml/hr มีอัตราการไหลต่ำเกินกว่าจะผลักดันอนุภาคภายในหลุมออกภายในเวลา 30 วินาทีเนื่องจากประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของหลุมที่มีสามอนุภาคขึ้นไปยังคงสูง

ทั้งสามเหลี่ยมทั้งสามแบบ แสดงให้เห็นถึงอนุภาคส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในหลุมจึงได้เพิ่มเพิ่มอัตราการไหล เป็น 500 ml/hr เพื่อเพิ่มการผลักดันอนุภาคออกจากหลุมจนเป็นอนุภาคเดี่ยว

5.3.2 ผลการทดลองการดักจับอนุภาคระยะสั้น อัตราการไหล 500 ml/hr

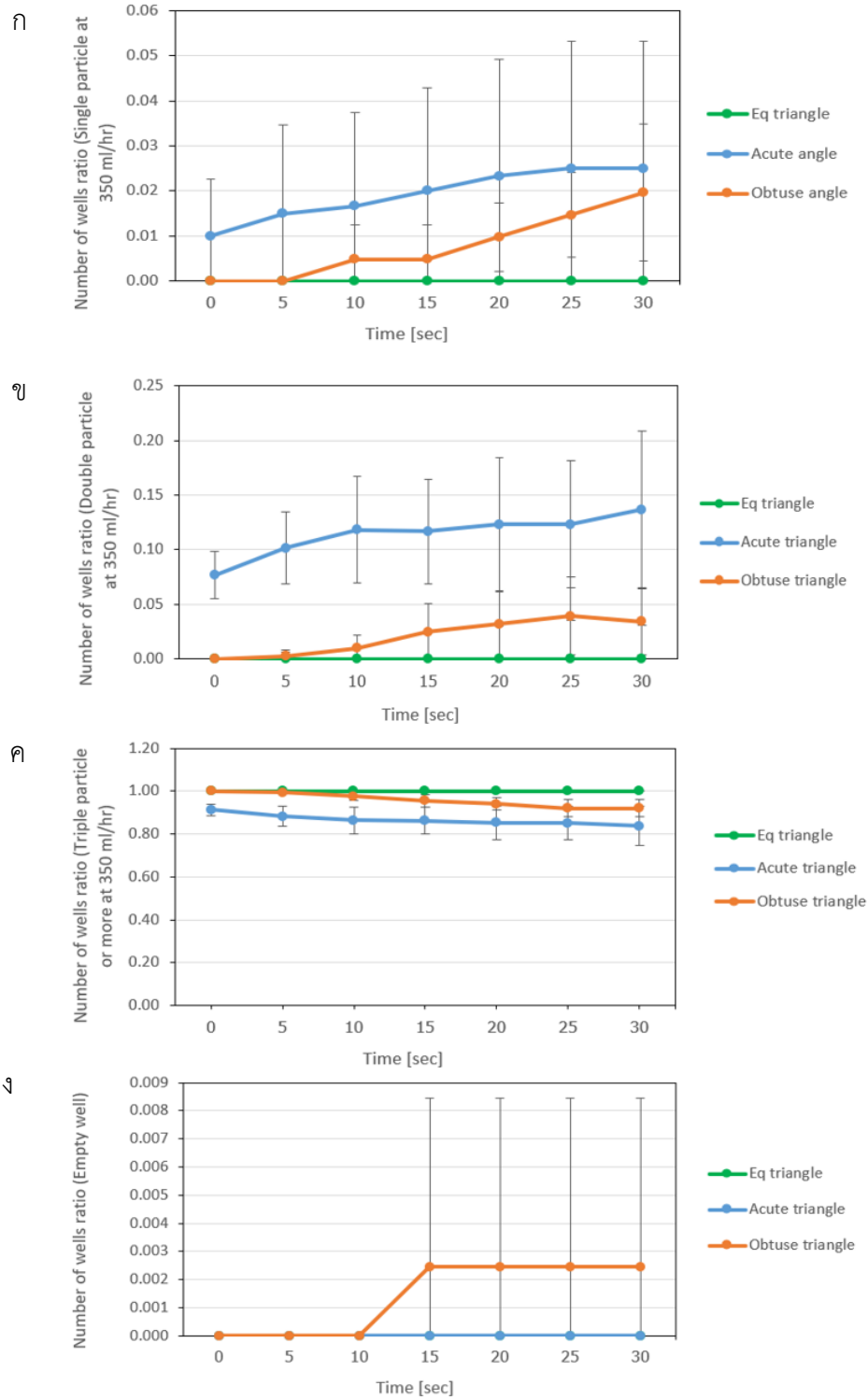
ผลการทดลองดักจับอนุภาคของหลุมทั้งสามรูปแบบระยะสั้นที่อัตราการไหล 500 ml/hr พบว่าตำแหน่งการดักจับอนุภาคกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งอุปกรณ์ เมื่อเวลาผ่านไป 30 วินาทีจำนวนหลุมที่มีมากกว่าสามอนุภาคขึ้นไปของสามเหลี่ยมมุมแหลมมีปริมาณสูงสุด รองลงมาคือสามเหลี่ยมมุมป้านและสามเหลี่ยมมุมเท่าซึ่งคิดเป็นร้อยละ 84.8, 39.5 และ 37.5 ตามลำดับ จำนวนหลุมที่มีอนุภาคคู่ของสามเหลี่ยมมุมแหลมมีปริมาณสูงสุด รองลงมาคือสามเหลี่ยมมุมป้านและสามเหลี่ยมมุมเท่าซึ่งคิดเป็นร้อยละ 12.3, 10.3 และ 9.7 ตามลำดับ จำนวนหลุมที่มีอนุภาคเดี่ยวสูงสุดคือสามเหลี่ยมมุมเท่า รองลงมาคือสามเหลี่ยมมุมป้านและสามเหลี่ยมมุมแหลมซึ่งคิดเป็นร้อยละ 41.9, 24.3 และ 2.5 ตามลำดับและสามเหลี่ยมที่เป็นหลุมเปล่าสูงสุดคือสามเหลี่ยมมุมป้าน รองลงมาคือสามเหลี่ยมมุมเท่าซึ่งเท่ากับสามเหลี่ยมมุมแหลมซึ่งคิดเป็นร้อยละ 26, 10.9 และ 0.3 ตามลำดับดังรูปที่ 5.3 และ รูปที่ 5.5

5.4 สรุปผลการทดลองดักจับอนุภาคระยะสั้น

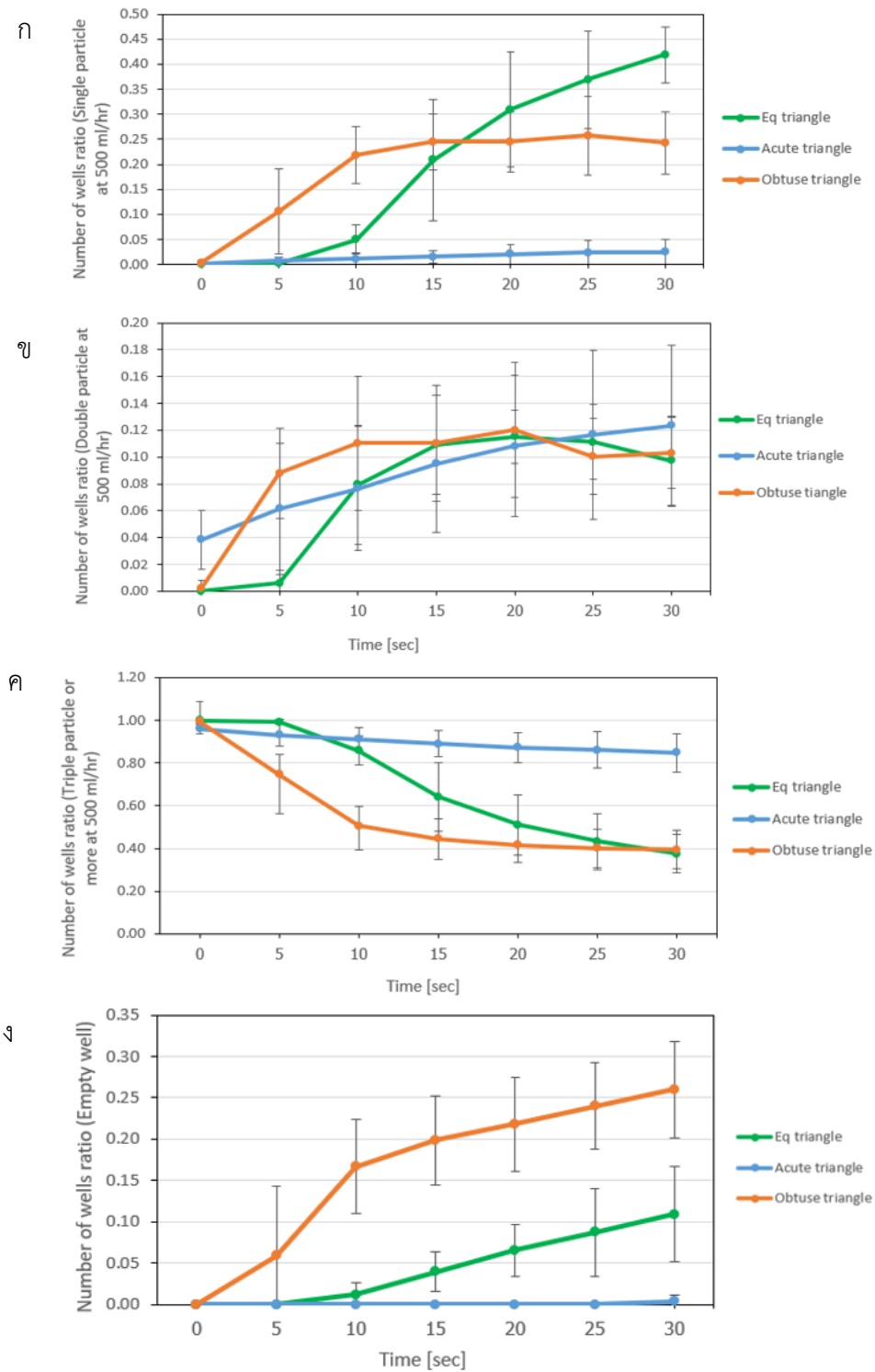
ผลลัพธ์ที่อัตราการไหล 350 และ 500 ml/hr แสดงให้เห็นถึงสามเหลี่ยมมุมแหลมสามารถกักเก็บอนุภาคไว้ภายในหลุมได้ดีที่สุด รองลงมาคือสามเหลี่ยมมุมเท่าในขณะที่สามเหลี่ยมมุมป้านมีจำนวนหลุมเปล่าสูงที่สุด โดยที่อัตราการไหล 350 ml/hr แทบจะไม่สามารถดันอนุภาคหลุดออกจากหลุมได้ แต่อัตราการไหลที่ 500 ml/hr สามารถดันอนุภาคได้ดียกเว้นสามเหลี่ยมมุมแหลมโดยสามเหลี่ยมมุมเท่าที่มีจำนวนหลุมที่ดักจับอนุภาคเดี่ยวได้สูงถึงร้อยละ 41.9 อย่างไรก็ตามการกระจายตัวการดักจับอนุภาคเดี่ยวของสามเหลี่ยมมุมเท่าจะอยู่ช่วงบริเวณกลางพื้นที่และสามเหลี่ยมมุมป้านมีจำนวนหลุมว่างบริเวณขอบของอุปกรณ์ ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าเฉพาะช่วงบริเวณตรงกลางพื้นที่เก็บข้อมูลมีเส้นการไหลของของไหลขนานกับขอบอุปกรณ์มากที่สุดจึงเกิดแรงหมุนวนสมดุลซ้ายและขวาประคองอนุภาคให้อยู่ภายในหลุมฝั่งหน้าหลุมได้ (ไม่มีการหมุนวน) สำหรับกรณีสามเหลี่ยมมุมเท่าในขณะที่การไหลบริเวณขอบอาจได้รับอิทธิพลจากการออกแบบทางออกส่งผลให้เกิดการไหลลักษณะโค้งเล็กน้อยแต่ก็มากพอที่จะทำให้แรงหมุนวนภายในหลุมเกิดความไม่สมดุลจน

ต้นอนุภาคหลุดออกซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการไหลพบว่าบริเวณพื้นหลุมของสามเหลี่ยมมุมป้านมีการหมุนวนของการไหลสูงสุดจึงมีหลุมเปล่าบริเวณขอบของหลุมสามเหลี่ยมมุมป้านมากที่สุดเปรียบเทียบกับหลุม ซึ่งการกระจายตัวการหมุนวนอยู่ระหว่างอนุภาคภายในหลุมจึงส่งผลให้อนุภาคอาจเกิดการเคลื่อนที่ลอยขึ้นใกล้ปากหลุมและถูกเส้นการไหลหลักพัดออกไปในที่สุดส่งผลให้จำนวนหลุมของสามเหลี่ยมมุมป้านส่วนใหญ่กลายเป็นหลุมเปล่า จำนวนหลุมสามเหลี่ยมมุมแหลมมีอนุภาคภายในหลุมแน่นที่สุดเนื่องจากขนาดการหมุนวนทุกระนาบที่ต่ำมากอนุภาคไม่หลุดออกจากหลุม

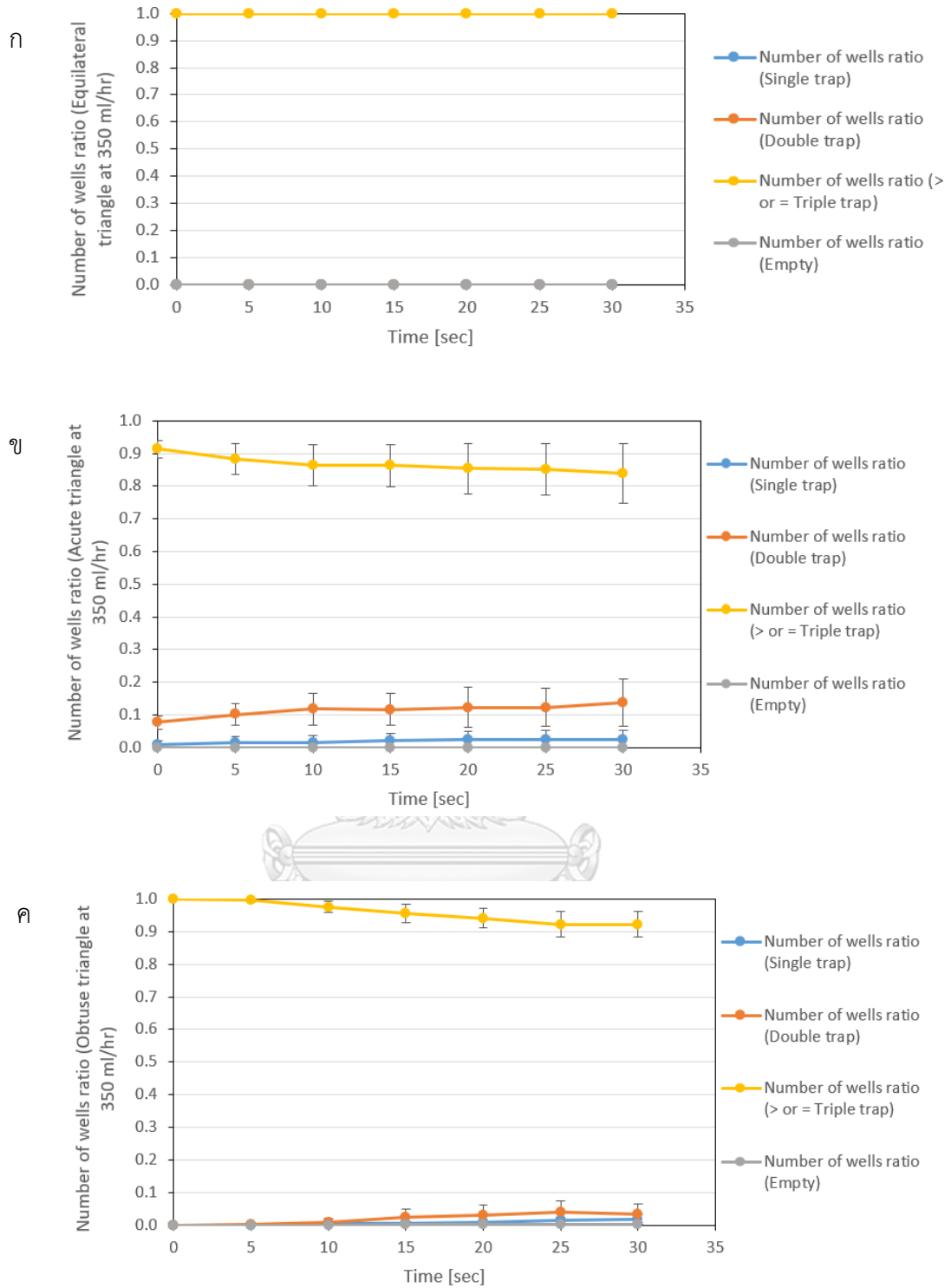
อย่างไรก็ตามผลการทดลองข้างต้นยังคงมีความคลุมเครือเกี่ยวกับผลลัพธ์หลังจากวินาทีที่ 30 เพื่อความเป็นประโยชน์ของการนำไปใช้ประโยชน์จึงได้เพิ่มระยะเวลาการทดลองขึ้นจากเดิม 30 วินาทีเป็น 2 นาทีเพิ่มหาจุดอิมิต์ของกราฟข้อมูลโดยหวังว่าข้อมูลดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งานมากขึ้น ผนวกกับการต้องการดักจับอนุภาคเดี่ยวการเลือกพื้นที่ศึกษาที่มีเส้นการไหลของของไหลผ่านในลักษณะตรงและขนานกันจึงมีความสำคัญดังนั้นจึงมีแนวคิดในการเลือกช่วงเก็บข้อมูลโดยเลือกช่วงกลางของช่องการไหลหลักโดยตามแนวยาวขับจากฝั่งด้านหน้ามา 4 แถวของหลุม และขยับจากฝั่งด้านหลังมา 6 แถวของหลุม ตามแนวกว้างขับจากขอบเข้ามา 2 – 3 แถวของหลุมขึ้นอยู่กับชนิดของหลุมดังรูปที่ 5.6 โดยจำนวนหลุมภายในช่วงเก็บข้อมูลของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้านมี 55, 65 และ 45 หลุมตามลำดับซึ่งคิดเป็นประมาณร้อยละ 25 ของจำนวนหลุมทั้งหมด ทั้งนี้เหตุผลที่เลือกตัดช่วงท้ายช่องการไหลและขอบตามแนวยาวอุปกรณ์เนื่องจากหลีกเลี่ยงเส้นการไหลในลักษณะโค้งและตัดช่วงหน้าของช่องการไหลเพื่อให้มั่นใจว่าของไหลมีเส้นการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่งพื้นของช่องการไหล



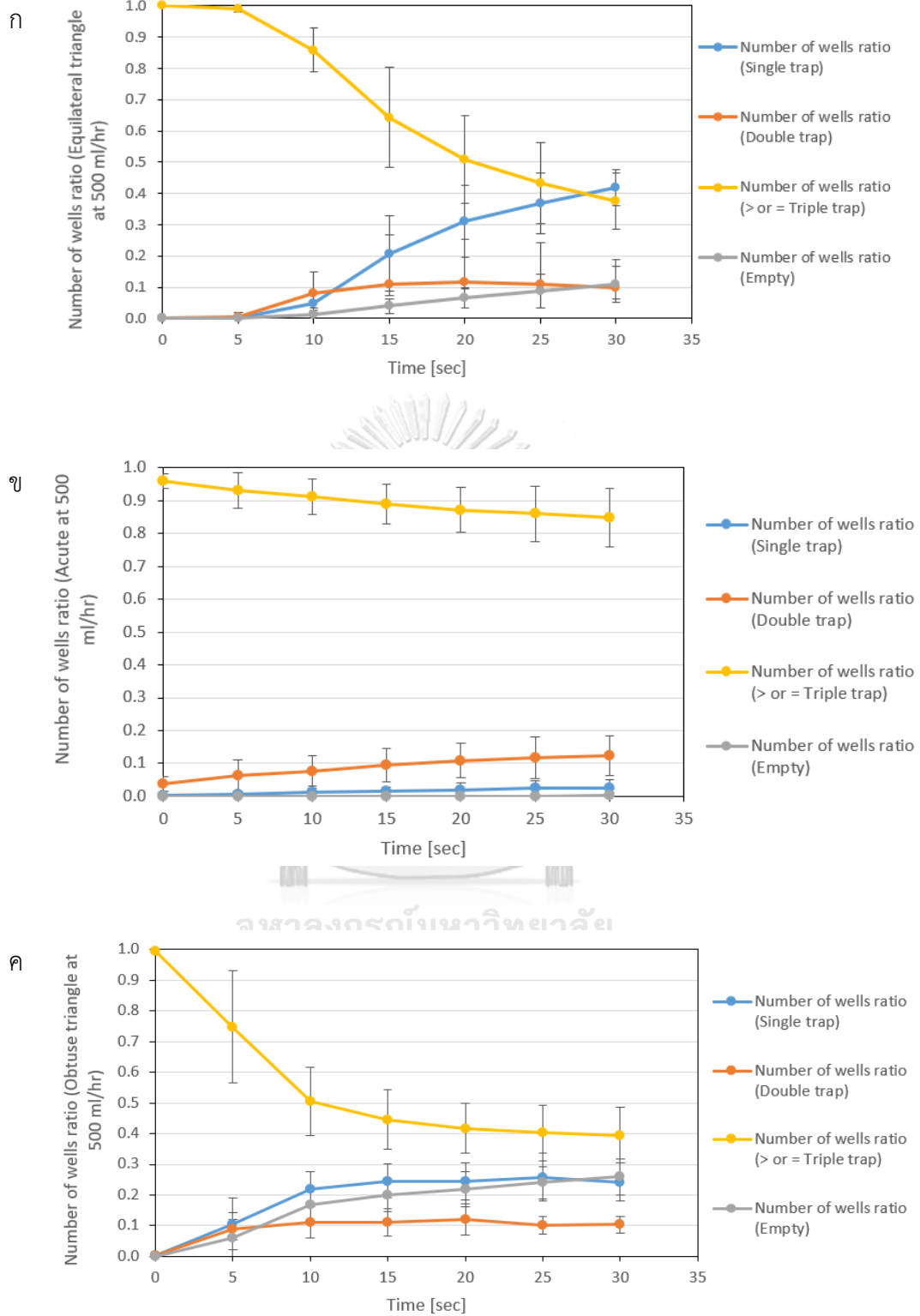
รูปที่ 5.2 อัตราส่วนจำนวนหลุมที่ติดกับอนุภาคภายในหลุมสามเหลี่ยมที่อัตราการไหล 350 ml/hr ในการทดลองระยะสั้นกรณี (ก) อนุภาคเดี่ยว, (ข) อนุภาคคู่, (ค) สามอนุภาคขึ้นไป, (ง) ไม่มีอนุภาค



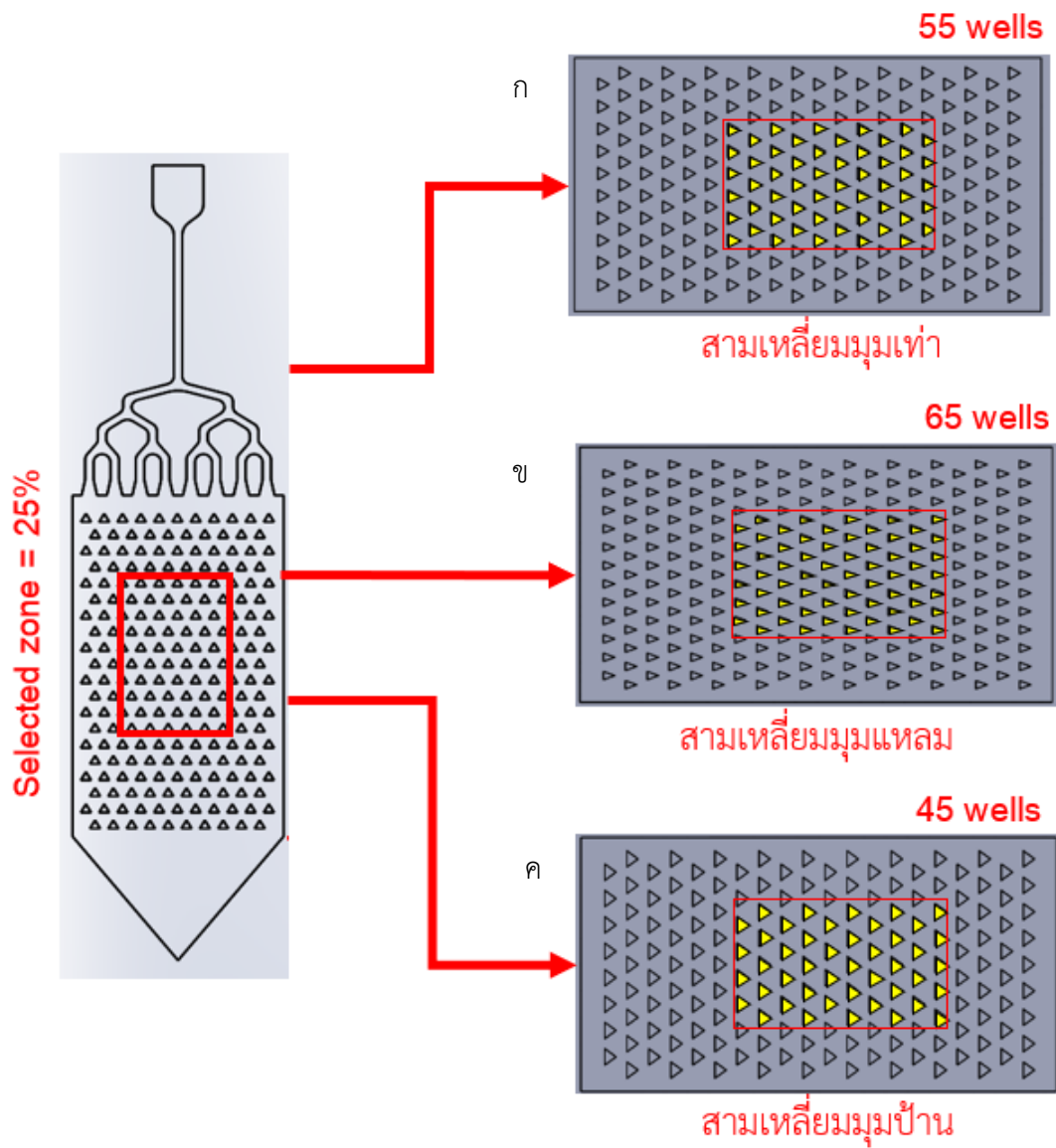
รูปที่ 5.3 อัตราส่วนจำนวนหลุมที่ดักจับอนุภาคภายในหลุมสามเหลี่ยมที่อัตราการไหล 500 ml/hr ในการทดลองระยะสั้นกรณี (ก) อนุภาคเดี่ยว (ข) อนุภาคคู่ (ค) สามอนุภาคขึ้นไป (ง) ไม่มีอนุภาค



รูปที่ 5.4 อัตราส่วนจำนวนหลุมดักจับอนุภาคเดี่ยว คู่ และสามขึ้นไปที่อัตราการไหล 350 ml/hr ในการทดลองระยะสั้นกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน



รูปที่ 5.5 อัตราส่วนจำนวนหลุมดักจับอนุภาคเดี่ยว คู่ และสามขึ้นไปที่อัตราการไหล 500 ml/hr ในการทดลองระยะสั้นกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน



รูปที่ 5.6 พื้นที่เก็บผลการทดลองในกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน สำหรับการทดลองระยะยาว

5.5 ผลการทดลองดักจับอนุภาคระยะยาว

5.5.1 ผลการทดลองการดักจับอนุภาคระยะยาว อัตราการไหล 350 ml/hr

ผลการทดลองดักจับอนุภาคของหลุมทั้งสามรูปแบบระยะยาวที่อัตราการไหล 350 ml/hr พบว่าพบว่าแนวโน้มจำนวนหลุมที่ดักจับสามอนุภาคขึ้นไปลดลงอย่างช้า โดยสามเหลี่ยมมุมแหลมมีอัตราการลดลงเร็วสุดภายในช่วง 15 วินาทีแรกจากนั้นการดักจับค่อนข้างคงที่คิดเป็นประมาณร้อยละ 45 สามเหลี่ยมมุมป้านมีอัตราการลดลงรองลงมาจนเริ่มคงที่ประมาณวินาทีที่ 75 คิดเป็นประมาณร้อยละ 40 ส่วนสามเหลี่ยมมุมเท่ามีอัตราการลดลงต่ำโดยจบการทดลองมีหลุมดักสามอนุภาคขึ้นไปอยู่ร้อยละ 15 หากพิจารณาในส่วนอนุภาคคู่ประสิทธิภาพของหลุมสามเหลี่ยมมุมแหลมสูงสุดเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 วินาทีสำหรับสามเหลี่ยมมุมแหลมคิดเป็นร้อยละ 35 รองลงมาคือสามเหลี่ยมมุมป้านและสามเหลี่ยมมุมเท่าซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกันอัตราการดักจับค่อนข้างคงที่คิดเป็นร้อยละ 10 โดยประมาณ ในกรณีการดักจับอนุภาคเดี่ยวพบว่าสามเหลี่ยมมุมป้านมีจำนวนหลุมเดี่ยวสูงสุดและเริ่ม

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.7 พบว่าจำนวนหลุมที่ดักจับอนุภาคส่วนใหญ่มีจุดอิมตัวอยู่ที่ประมาณช่วงวินาทีที่ 15 – 75 โดยอัตราการเพิ่มและลดลงของจำนวนหลุมค่อนข้างต่ำสังเกตจากจำนวนหลุมที่ดักจับสามอนุภาคหรือมากกว่ายังคงมีปริมาณสูงคิดเป็นร้อยละ 60 – 85 ถึงแม้เวลาจะผ่านไป 2 นาทีซึ่งถือเป็นช่วงที่เป็นจุดอิมตัวของข้อมูล ส่งผลให้ถึงแม้สามเหลี่ยมมุมป้านมีอัตราการดักจับอนุภาคเดี่ยวสูงสุดแต่ยังคงมีประสิทธิภาพต่ำคือร้อยละ 22.2 ดังรูปที่ 5.9c ในขณะที่สามเหลี่ยมรูปแบบอื่นแทบจะไม่สามารถดักจับอนุภาคเดี่ยวได้เลย จึงสามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่าอัตราการไหล 350 ml/hr ไม่สามารถสร้างแรงหมุนวนทั้งสามแนวแกนได้มากพอที่จะผลักดันอนุภาคออกจากหลุมไปได้ตามที่ต้องการ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการไหลจึงอาจช่วยให้การดักจับอนุภาคเดี่ยวมีแนวโน้มที่เป็นไปได้มากขึ้น

5.5.2 ผลการทดลองการดักจับอนุภาคระยะยาว อัตราการไหล 500 ml/hr

ผลการทดลองดักจับอนุภาคของหลุมทั้งสามรูปแบบระยะยาวที่อัตราการไหล 500 ml/hr พบว่าแนวโน้มจำนวนหลุมที่ดักจับสามอนุภาคขึ้นไปของสามเหลี่ยมทั้งสามลดลงอย่างรวดเร็วภายในช่วง 15 วินาทีแรกจากนั้นลดลงอย่างช้าๆ โดยสามเหลี่ยมมุมแหลมมีอัตราการลดลงต่ำสุดคิดเป็น

ประมาณร้อยละ 60 สามเหลี่ยมมุมป้านและสามเหลี่ยมมุมเท่าที่มีอัตราการลดลงใกล้เคียงกันคิดเป็นประมาณร้อยละ 85 จากนั้นค่อยๆลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ โดยจำนวนหลุมดังกล่าวของสามเหลี่ยมมุมเท่าจะลดลงโดยเป็นการเพิ่มขึ้นของจำนวนหลุมเดี่ยว ซึ่งสามารถดักจับอนุภาคเดี่ยวได้สูงถึงร้อยละ 83.3 ในวินาทีที่ 45 จากนั้นค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ ในขณะที่จำนวนหลุมที่ดักจับสามอนุภาคขึ้นไปของสามเหลี่ยมมุมป้านจะเปลี่ยนเป็นหลุมเปล่าสูงถึงร้อยละ 85 เมื่อเวลาผ่านไปเพียง 30 วินาที ในขณะที่สามเหลี่ยมมุมแหลมมีโอกาสดักจับอนุภาคคู่ได้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 29.2 ที่วินาทีที่ 15 จากนั้นแนวโน้มค่อยๆลดลงโดยจำนวนหลุมของสามเหลี่ยมมุมเท่าและสามเหลี่ยมมุมป้านที่ดักจับอนุภาคคู่มีจุดอิมตัวอยู่ที่วินาทีที่ 75 คิดเป็นร้อยละ 27 และ 33 ตามลำดับดังรูปที่ 5.8 และ รูปที่ 5.10

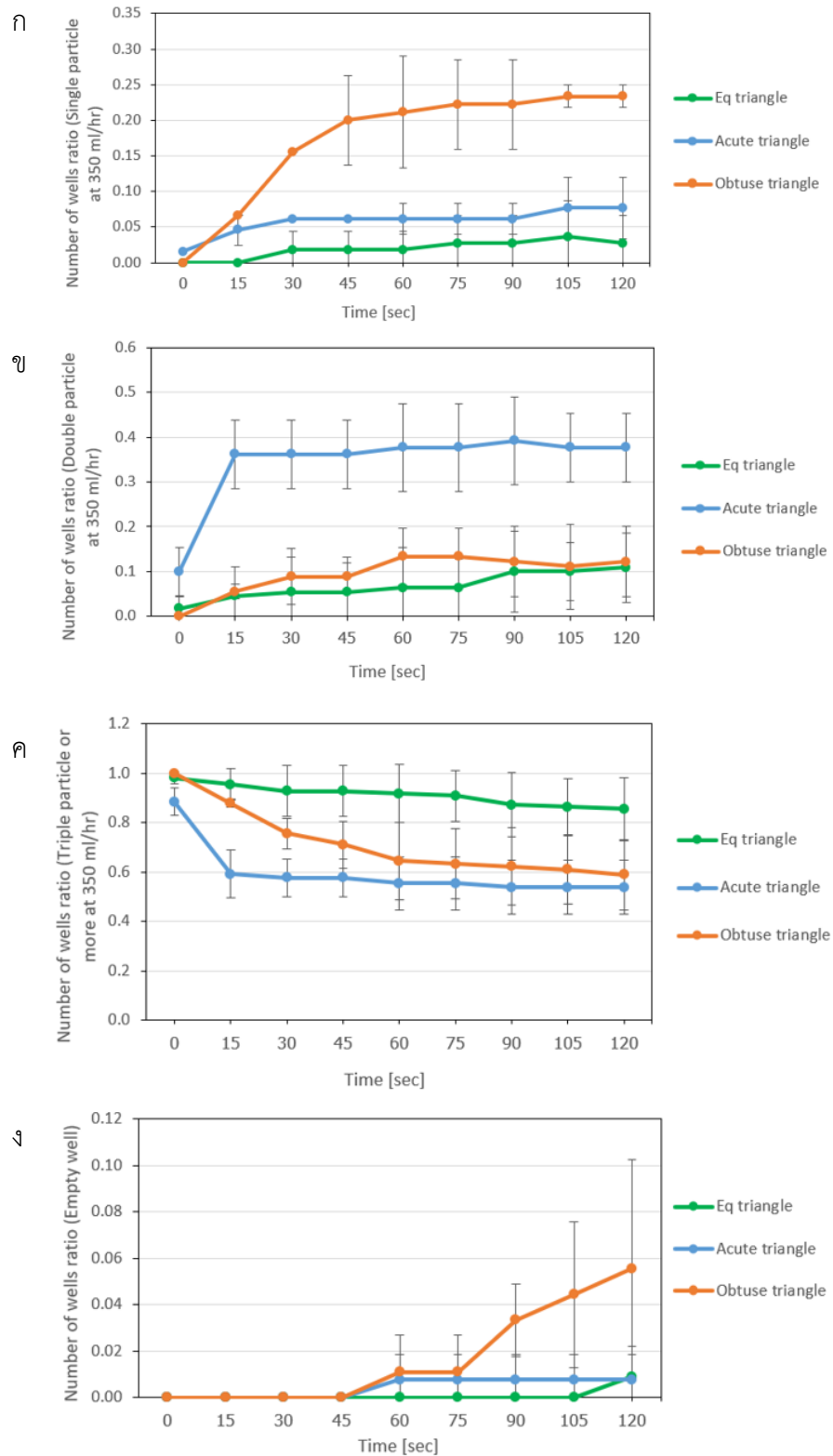
จากผลการทดลองที่อัตราการไหล 500 ml/hr พบว่าสามเหลี่ยมมุมแหลมยังคงมีความสามารถในการกักจับอนุภาคภายในหลุมได้ดีที่สุดภายใต้อัตราการไหลสูงเนื่องจากอิทธิพลของขนาดและการกระจายตัวการหมุนวนภายในหลุมต่ำมาก ในทางตรงกันข้ามสามเหลี่ยมมุมป้านซึ่งมีขนาดและการกระจายตัวการหมุนวนภายในหลุมสูงที่สุดมีจำนวนหลุมเปล่าที่สูงถึงร้อยละ 85 เนื่องจากอนุภาคเกิดการเคลื่อนไหวจากแรงหมุนวนจนลอยขึ้นรวมกับเส้นการไหลหลักซึ่งมีความเร็วสูงบริเวณปากหลุมพลัดออกไป ในขณะที่สามเหลี่ยมมุมเท่าที่มีจำนวนหลุมที่สามารถดักจับอนุภาคเดี่ยวได้สูงถึงร้อยละ 83.6 จำนวนหลุมเปล่าร้อยละ 10 โดยตำแหน่งของอนุเดี่ยวภายในหลุมจะถูกดันย้อนกลับมาฝั่งหน้าหลุมทั้งหมดทุกหลุมสอดคล้องกับผลการจำลองการไหลในหัวข้อ 4.1.4.2.2 และมีขอบทั้งสองข้างคอยประคองอยู่ภาคไว้ตรงกลางซึ่งเป็นจุดที่มีการหมุนวนต่ำส่งผลให้อนุภาคเดี่ยวถูกดักจับไว้ได้ในขณะที่สามเหลี่ยมมุมป้านและสามเหลี่ยมมุมแหลมมีปรากฏการณ์ดังกล่าวเช่นเดียวกันแต่ต่างกันเรื่องขนาดและมุมภายในมุมยอด โดยสามเหลี่ยมมุมป้านมีขนาดมุมและการกระจายตัวแรงหมุนวนสูงจึงไม่สามารถดักจับอนุภาคไว้ได้ในขณะที่สามเหลี่ยมมุมแหลมมีปัจจัยดังกล่าวต่ำเกินไปส่งผลให้ไม่มีการปลักตันอนุภาคออกจากหลุมจนเหลืออนุภาคเดี่ยวได้ ในกรณีอนุภาคคู่ภายในหลุมสามเหลี่ยมทั้งสามรูปแบบพบว่ามีจำนวนต่ำเนื่องจากเป็นช่วงรอยต่อที่หลุมเปลี่ยนรูปแบบการจับอนุภาคมากกลายเป็นอนุภาคเดี่ยว กล่าวคือในวินาทีที่หลุมดักจับอนุภาคคู่ขึ้นกลไกการไหลวนภายในหลุมตามแนวแกน Y จะพยายามสร้างแรงหมุนวนบริเวณขอบดังนั้นหากมีอนุภาคคู่ภายในหลุมจะมีอนุภาคหนึ่งหลุดลอยออกไปจนเหลืออนุภาคเดี่ยว จากนั้นแรงหมุนวนดังกล่าวจะประคองให้อนุภาคเดี่ยวอยู่ตรงกลางหลุมผนวกกับแรงหมุนวนตามแนวแกน X จะดันอนุภาคหลุมที่อยู่ตรงกลางมาทางฝั่ง

หน้าหลุมนั่นเองจึงทำให้เกิดกลไกการดักจับอนุเดี่ยวเกิดขึ้นโดยปรากฏการณ์นี้มีความชัดเจนที่สุดในกรณีหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าด้วยเหตุผลกล่าวแล้วข้างต้น

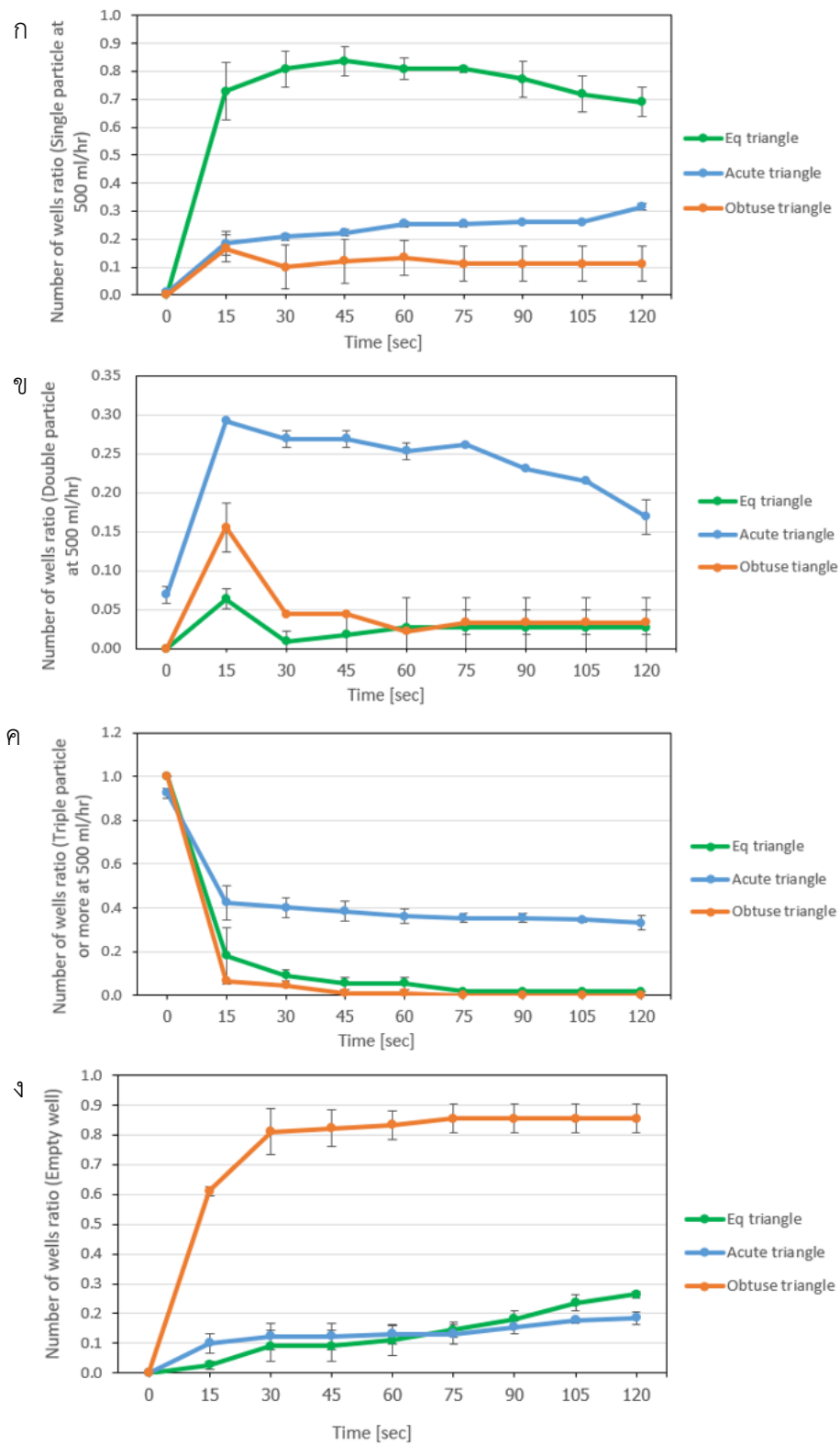
5.6 สรุปผลการทดลองดักจับอนุภาคระยะยาว

จากผลการทดลองปลักตันอนุภาคภายใน 2 นาทีภายใต้อัตราการไหล 350 และ 500 ml/hr พบว่าการทดลองที่อัตราการไหล 500 ml/hr เป็นจุดที่สามารถอธิบายกลไกจากการคำนวณการไหลได้ดีเนื่องจากเห็นรูปแบบการดักจับและการตันอนุภาคในหลุมทุกรูปแบบได้ชัดเจนกว่าโดยมีจุดอิมิตัวของข้อมูลอยู่ในช่วง 15 – 20 วินาทีแรก ในขณะที่การทดลองอัตราการไหล 350 ml/hr ยังเกิดการหมุนวนไม่มากพอที่จะตันอนุภาคออกจากหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าและสามเหลี่ยมมุมแหลมส่งผลให้หลุมสามเหลี่ยมมุมป้านซึ่งมีการหมุนวนภายในหลุมมากที่สุดตันอนุภาคหลุดออกได้ดีเท่าที่นั้นจนนำมาสู่การดักจับอนุภาคเดี่ยวมากที่สุดในอัตราการไหลนี้

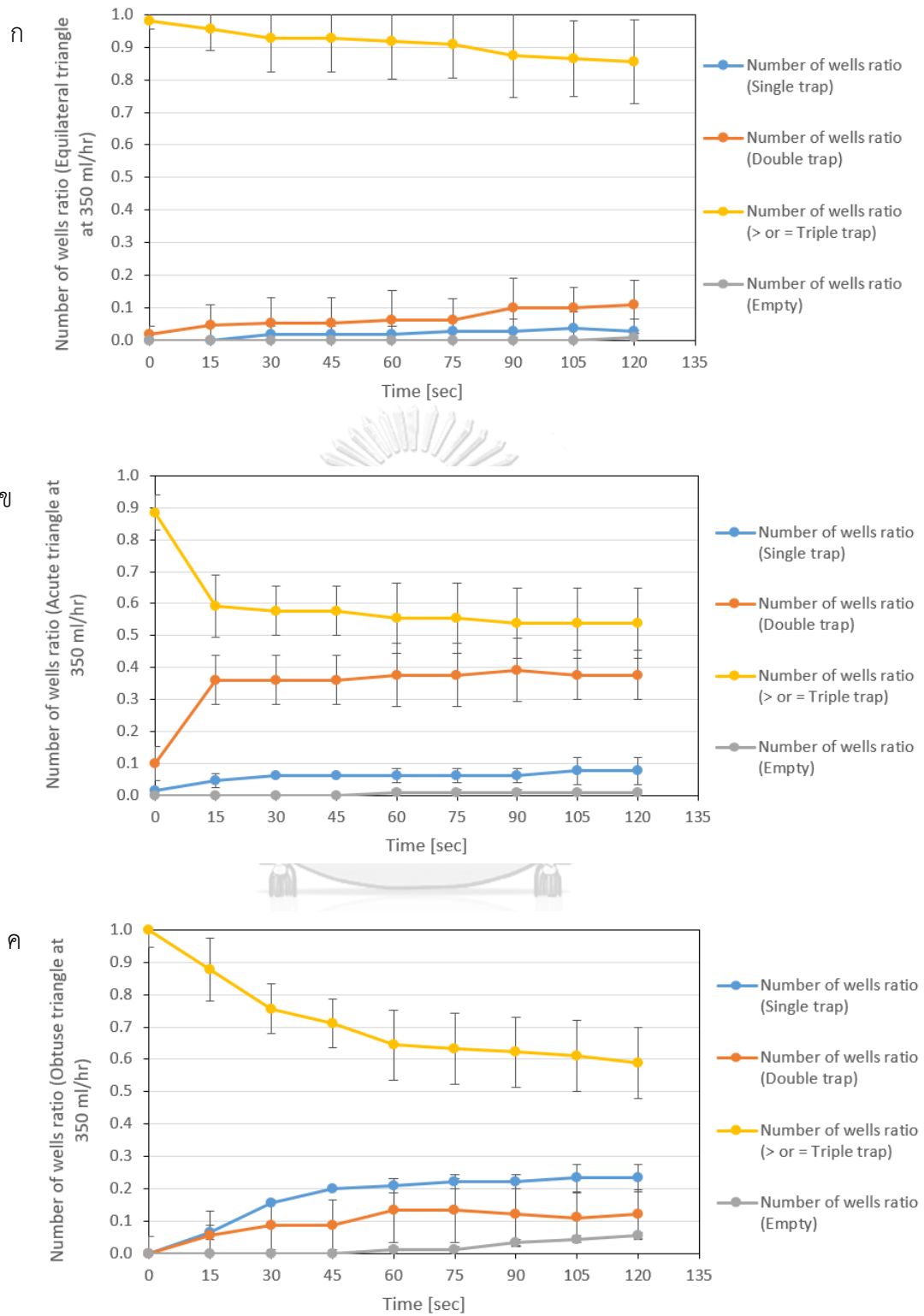
ดังนั้นหากต้องการดักจับอนุภาคเดี่ยวที่มีขนาด 150 μm ภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมป้านควรเลือกใช้อัตราการไหล 350 ml/hr เป็นระยะเวลาสองนาที และหากต้องการดักจับอนุภาคเดี่ยวภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าควรเลือกใช้อัตราการไหล 500 ml/hr เป็นระยะเวลา 45 วินาทีเนื่องจากอัตราการไหลดังกล่าวมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับการจำลองการไหล ซึ่งพบว่าการเคลื่อนที่ของของไหลนั้นเป็นลักษณะหมุนวนซึ่งจะทำหน้าที่คล้ายตัวกักอนุภาคภายในหลุมให้อยู่ตำแหน่งกลางและหน้าหลุมในกรณีมีอนุภาคอยู่แล้ว



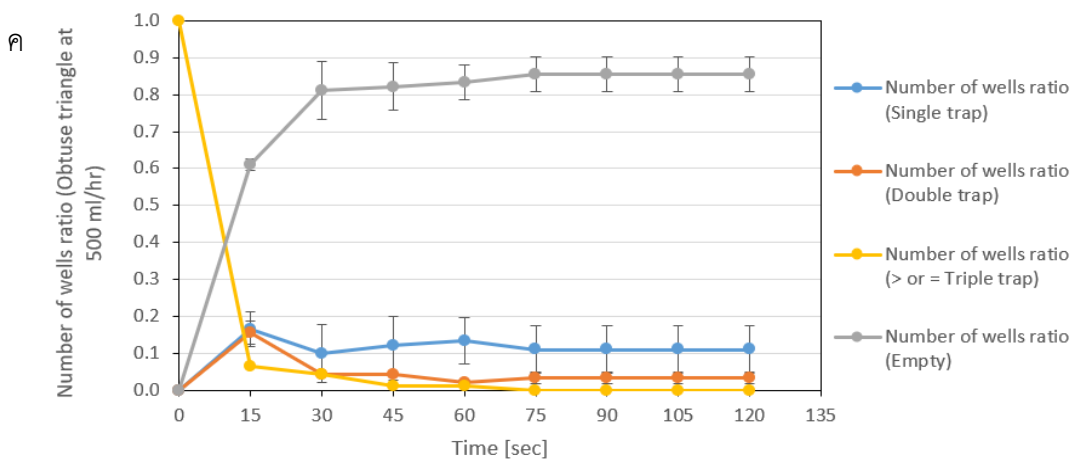
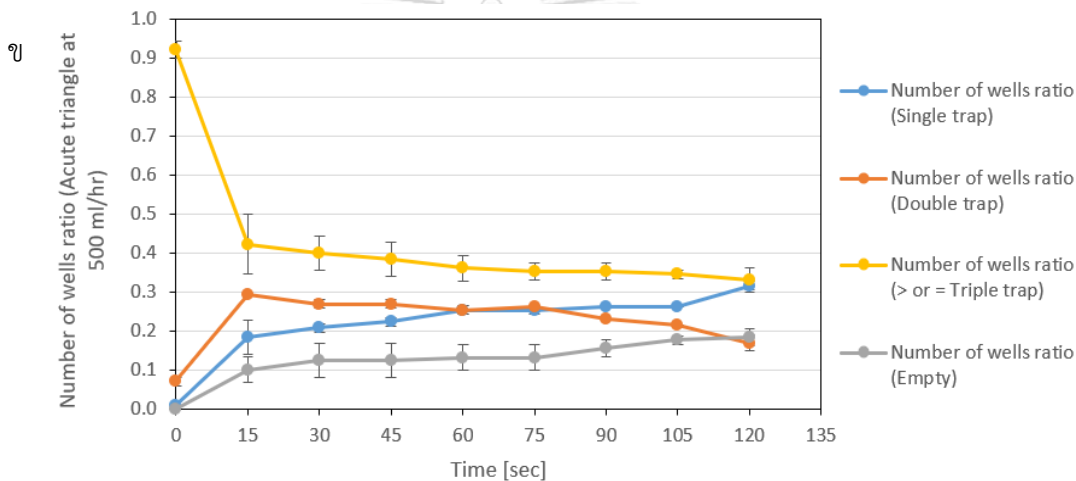
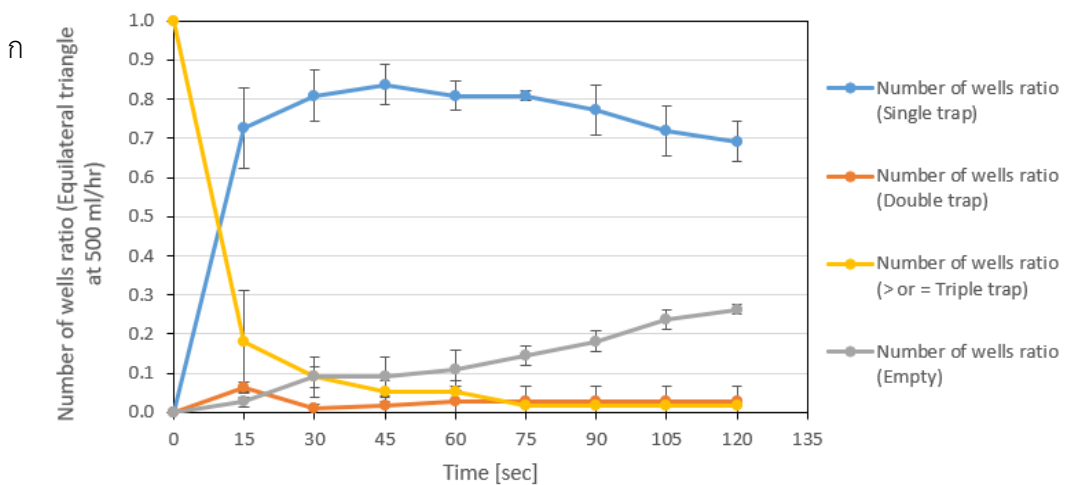
รูปที่ 5.7 อัตราส่วนจำนวนหลุมที่ติดจับอนุภาคภายในหลุมสามเหลี่ยมที่อัตราการไหล 350 ml/hr ในการทดลองระยะยาวกรณี (ก) อนุภาคเดี่ยว, (ข) อนุภาคคู่, (ค) สามอนุภาคขึ้นไป, (ง) ไม่มีอนุภาค



รูปที่ 5.8 อัตราส่วนจำนวนหลุมที่ติดจับอนุภาคภายในหลุมสามเหลี่ยมที่อัตราการไหล 500 ml/hr ในการทดลองระยะยาวกรณี (ก) อนุภาคเดี่ยว, (ข) อนุภาคคู่, (ค) สามอนุภาคขึ้นไป, (ง) ไม่มีอนุภาค



รูปที่ 5.9 อัตราส่วนจำนวนหลุมดักจับอนุภาคเดี่ยว คู่ และสามขึ้นไปที่อัตราการไหล 350 ml/hr ในการทดลองระยะยาวกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน



รูปที่ 5.10 อัตราส่วนจำนวนหลุมดักจับอนุภาคเดี่ยว คู่ และสามขึ้นไปที่อัตราการไหล 500 ml/hr ในการทดลองระยะยาวกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

5.7 สรุปผล

จากการทดลองดักจับอนุภาคที่อัตราการไหล 7 - 10 ml/hr ความเข้มข้นเริ่มต้น 1,200 อนุภาค / ml จำนวน 3 ml จนเต็มหลุมที่ใช้สำหรับการดักจับอนุภาคขนาด 150 μm จากนั้นใช้ อัตราการไหลการสูงที่ 350 และ 500 ml/hr ดันอนุภาคออกจากหลุมจนกลายเป็นอนุภาคเดี่ยว แบ่ง ออกเป็นการทดลองระยะสั้น 30 วินาทีและการทดลองระยะยาว 2 นาที พบว่าตำแหน่งการดักจับ อนุภาคภายในบริเวณศึกษามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยอัตราการไหลทั้งสองสามารถดัน อนุภาคออกจากหลุมสามเหลี่ยมมุมป้านได้ดีที่สุด รองลงมาคือสามเหลี่ยมมุมเท่าและสามเหลี่ยมมุม แแหลม ซึ่งสอดคล้องกับการจำลองการไหลเบื้องต้นในบทที่ 4

สำหรับการทดลองระยะสั้นที่อัตราการไหล 350 ml/hr สามารถดันอนุภาคออกจากหลุมได้ เพียงบางส่วนเท่านั้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเดี่ยวต่ำในขณะที่อัตราการไหล 500 ml/hr ผลการดักจับอนุภาคเดี่ยวมีแนวโน้มสูงขึ้นสำหรับหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าแต่ยังมีประสิทธิภาพ เพียงร้อยละ 40 มากไปกว่านั้นอิทธิพลการไหลของของไหลบริเวณขอบอุปกรณ์ที่มีลักษณะไม่ขนาน กับช่องการไหลหลักผนวกกับแนวโน้มการดักจับอนุภาคเดี่ยวยังคงสูงขึ้นไปอย่างต่อเนื่อง 30 จึง ศึกษาการทดลองระยะยาวเพิ่มเติมและจำกัดบริเวณศึกษาใหม่

สำหรับการทดลองระยะยาวที่อัตราการไหล 350 ml/hr จุดเวลาที่สามารถดักจับอนุภาค เดี่ยวภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลมและสามเหลี่ยมมุมป้านได้คือวินาทีที่ 105 คิดเป็นร้อยละ 3.6 7.7 และ 23.3 ตามลำดับ สำหรับการอัตราการไหลที่ 500 ml/hr จุดเวลาที่ สามารถดักจับอนุภาคเดี่ยวภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลมและสามเหลี่ยมมุม ป้านได้คือวินาทีที่ 45 120 และ 15 คิดเป็นร้อยละ 83.6 31.5 และ 16.7 ตามลำดับ ทั้งนี้แนวโน้ม ข้อมูลเริ่มคงที่ภายใน 60 วินาทีสำหรับการทดลองที่อัตราการไหลทั้งสอง

บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวสรุปรวบยอดหัวข้อต่างๆของงานวิจัยโดยเริ่มจากขั้นตอนการสืบค้นข้อมูล เกี่ยวกับการศึกษาการดักจับอนุภาคขนาดจุลภาค การทดลองเบื้องต้น กระบวนการสร้างอุปกรณ์ การจำลองการไหล การออกแบบอุปกรณ์ใหม่ และผลการทดลอง

6.1 สรุปงานวิจัย

งานวิจัยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษากลไกการไหลภายในหลุมจุลภาครูปทรงสามเหลี่ยมผ่านโปรแกรมจำลองการไหล จนนำไปสู่การผลิตอุปกรณ์ดักจับอนุภาคเดี่ยวภายในหลุม งานวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาการดักจับอนุภาคจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าในปัจจุบันมีรูปแบบการดักจับอนุภาคขนาดเล็กหลายรูปแบบ ทั้งรูปแบบการดักจับอนุภาคโดยอาศัยแรงภายนอกมากระทำ เช่น แรงจากแม่เหล็กและไฟฟ้าเพื่อดักจับอนุภาคจำพวก แบคทีเรีย หรือ เซลล์ที่ติดเชื้อบางชนิด มากไปกว่านั้นยังพบว่าหากต้องการเพาะเลี้ยงเซลล์จากเซลล์ต้นกำเนิดจนกลายเป็นเซลล์เป้าหมายแล้วการเพาะเลี้ยงเซลล์แบบลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่มโดยมีโครงร่างยึดเกาะทรงกลมเป็นแกนกลางมีแนวโน้มที่เซลล์จะเจริญเติบโตได้ดีกว่าแบบเดี่ยว จึงมีแนวคิดศึกษาการดักจับโครงร่างยึดเหนี่ยวภายในหลุมจุลภาคในลักษณะเดี่ยวก่อนเพื่อความคุมความหนาแน่นของประชากรภายในหลุมส่งผลให้ควบคุมตัวแปรของการศึกษาการเลี้ยงเซลล์ได้ในอนาคต งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้วัสดุพอลิเมอร์ PDMS ในการขึ้นรูปชิ้นงาน เนื่องจากมีความเป็นพิษต่ำและไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของเซลล์

เมื่อทราบถึงองค์ประกอบและตัวแปรสำหรับการดักจับอนุภาคจึงเริ่มต้นศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์ซึ่งเรียกว่าวิธีการสร้างแบบ Soft lithography ชิ้นงานจะถูกสร้างผ่านลวดลายที่ออกแบบไว้ 2 ส่วนจากนั้นประกบกันด้วยวิธีประสานผิว Oxygen plasma จะได้ช่องการไหลและหลุมจุลภาค เมื่อต่อท่อทางเข้าและออกก็พร้อมสำหรับการศึกษาการดักจับอนุภาคเบื้องต้น

จากนั้นเริ่มต้นกระบวนการทดลองติดตั้งอุปกรณ์เข้าด้วยกัน การทดลองใช้อุณหภูมิพลาสติก ขนาด $150 \mu\text{m}$ แทนโครงร่างเลี้ยงเซลล์ ใช้อัตราการไหลในช่วง $5 - 20 \text{ ml/hr}$ ที่ความเข้มข้น $20 - 100$ อนุภาค / ml เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการทดลองการดักจับอนุภาคภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่า พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคภายในช่องการไหลไม่สม่ำเสมอและหนาแน่น

บริเวณขอบอุปกรณ์ และภายใต้ทุกเงื่อนไขสามารถดักจับอนุภาคได้แต่การดักจับอนุภาคเป็นการดักจับโดยอาศัยแรงจากน้ำหนักของเม็ดอนุภาคพลาสติกเนื่องจากมีขนาดใหญ่ กล่าวคือหากอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านหลุมจะถูกดักจับทั้งหมดส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเดี่ยวต่ำด้วย ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงแนวคิดสำหรับการดักจับอนุภาคใหม่คือเริ่มดักจับอนุภาคให้หนาแน่นทุกหลุมก่อนจากนั้นใช้อัตราการไหลสูงผลักดันอนุภาคจนเหลืออนุภาคเดี่ยว

การศึกษาการไหลผ่านการจำลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือช่องการไหลหลักเพื่อศึกษารูปแบบการกระจายตัวในช่องการไหลเมื่อมีการออกแบบช่องทางเข้าต่างกัน และส่วนที่สองคือกลไกการไหลภายในหลุมเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้านซึ่งมีความยาวฐาน 600 400 และ 800 μm ตามลำดับ มีความสูงหรือความยาวลักษณะจำเพาะเท่ากัน 520 μm และมีความลึกหลุม 300 μm โดยปากหลุมสามเหลี่ยมแต่ละรูปแบบจะประกบกับพื้นช่องการไหลซึ่งแทนด้วยกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้ายาว 2.5 mm สูง 350 μm ความกว้าง 1.2 0.8 และ 1.6 mm สำหรับโมเดลหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้านตามลำดับ จนนำมาสู่ความเป็นไปได้สำหรับการผลักดันอนุภาคออกจากหลุมจนกระทั่งเหลืออนุภาคเดี่ยว ซึ่งการจำลองการไหลภายในหลุมได้มีการจำลองการไหลในกรณีหลุมเปล่าและกรณีมีอนุภาคภายในหลุม

จากผลการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ พบว่าในส่วนช่องการไหลที่มีช่องทางเข้าเป็นท่อแยก 8 ท่อย่อยมีการกระจายตัวการไหลได้สม่ำเสมอทั่วพื้นที่หน้าตัด ในส่วนของหลุมเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านหลุมสามเหลี่ยมทั้งสามรูปแบบจะเกิดการหมุนวนของไหลเกิดขึ้น 2 รูปแบบสำคัญ คือรูปแบบการหมุนของของไหลลงสู่หลุมสามเหลี่ยมโดยมีแกนการหมุนตั้งฉากกับการไหลเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านช่วงกลางหลุมสามเหลี่ยมซึ่งการหมุนดังกล่าวเป็นกลไกการดักจับอนุภาคโดยตรง โดยสามเหลี่ยมมุมป้านมีช่วงดักจับดังกล่าวกว้างที่สุดส่งผลให้มีการดักจับอนุภาคได้ดีกว่าสามเหลี่ยมมุมเท่า และสามเหลี่ยมมุมแหลมที่มีช่วงการดักจับที่ต่ำกว่า ในขณะที่การไหลที่เคลื่อนที่ผ่านขอบสามเหลี่ยมจะถูกการหมุนวนแนวการหมุนตามทิศของการไหลผลักออกจากหลุมไป ในกรณีการจำลองการไหลในกรณีหลุมเปล่าและกรณีมีอนุภาคภายในหลุมในระนาบที่ลึกลงไปพบว่าการกระจายตัวการหมุนของหลุมทั้งสามขนาดมีรูปแบบคล้ายกันทั้งสามแนวแกนโดยจะมีการหมุนวนบริเวณตรงกลางน้อยสุดแตกต่างกันที่พื้นที่การกระจายตัวและขนาดโดยสามเหลี่ยมมุมป้านสูงสุด รองลงมาคือสามเหลี่ยมมุมเท่าและสามเหลี่ยมมุมแหลม ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่อนุภาคภายในสามเหลี่ยมมุมเท่าอาจถูกผลักดันออกจน

หมด อนุภาคภายในสามเหลี่ยมมุมแหลมไม่ถูกผลักดัน และอนุภาคภายในสามเหลี่ยมมุมเท่าถูกผลักดันบางส่วนจนเหลือเพียงอนุภาคเดียว

จากผลการจำลองการไหลสามารถสรุปการออกแบบอุปกรณ์การดักจับอนุภาคใหม่ได้คือ ส่วนช่องการไหลเลือกแบบช่องการไหลที่มีช่องทางเข้าย่อยและหลุมสามเหลี่ยมสามรูปแบบ โดยมีลักษณะการเรียงตัวเป็นฟันปลากว้าง 9 - 13 แถว (ขึ้นอยู่กับชนิดสามเหลี่ยม ยาว 20 แถว จากนั้นเลือกตำแหน่งเก็บผลบริเวณกลางช่องการไหลหลัก

จากนั้นนำอุปกรณ์ใหม่มาทดสอบประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคขนาด $150 \mu\text{m}$ ให้เต็มหลอดที่ความเข้มข้น $1,200$ อนุภาค / ml ให้เต็มทุกหลุมจากนั้นใช้อัตราการไหล 350 และ 500 ml/hr ดันอนุภาคออกจากหลุม ซึ่งการทดลองแบ่งออกเป็น 2 แบบคือการดักจับระยะสั้น 30 วินาที และการดักจับระยะยาว 2 นาที พบว่าสำหรับการดักจับระยะสั้นที่อัตราการไหล 350 ml/hr มีเพียงอนุภาคบางส่วนที่หลุดออกจากหลุมเท่านั้นโดยอนุภาคภายในสามเหลี่ยมมุมสามเหลี่ยมมุมป้านหลุดออกมากที่สุด รองลงมาคือสามเหลี่ยมมุมแหลมและสามเหลี่ยมมุมเท่าตามลำดับ แต่หากเพิ่มอัตราการไหลเป็น 500 ml/hr แนวโน้มการดักจับอนุภาคเดี่ยวสูงขึ้นอย่างชัดเจนสำหรับสามเหลี่ยมมุมแหลมคิดเป็นร้อยละ 41.9 สามเหลี่ยมมุมป้านมีการผลักดันอนุภาคออกจากหลุมมากจนกลายเป็นหลุมเปล่าในขณะที่สามเหลี่ยมมุมแหลมกักเก็บอนุภาคได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามพบว่าช่วงการดักจับอนุภาคเดี่ยวยังคงสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในวินาทีที่ 30 จึงได้ทำการทดลองการดักจับระยะยาวเพื่อหาจุดอิ่มตัวของชุดข้อมูล พบว่าที่อัตราการไหล 350 ml/hr อัตราการดักจับอนุภาคเดี่ยวเริ่มอิ่มตัวประมาณ 60 วินาทีแต่การดักจับอนุภาคเดี่ยวของสามเหลี่ยมทั้งสามยังคงมีประสิทธิภาพไม่ถึงร้อยละ 20 ในขณะที่อัตราการไหล 500 ml/hr เป็นช่วงที่สามเหลี่ยมทั้งสามมีจุดอิ่มตัวการดักจับในช่วงไม่เกิน 40 วินาทีโดยสามเหลี่ยมมุมเท่ามีประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเดี่ยวสูงถึงร้อยละ 83.6 ในวินาทีที่ 45 จากนั้นมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ในขณะที่สามเหลี่ยมมุมแหลมและสามเหลี่ยมมุมป้านมีประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเดี่ยวสูงสุดเพียงร้อยละ 31.5 และ 16.7 ตามลำดับ

6.2 อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

ปัญหาในขั้นตอนกระบวนการสร้างและการทดลอง พบว่าขณะการขึ้นรูปชิ้นงานโพลีเมอร์ PDMS ควรมีการวัดระดับน้ำเพื่อให้ระดับพื้นของอุปกรณ์มีความเรียบมากที่สุด การเจาะช่องทางเข้าที่เยื้องจากจุดออกแบบเพื่อต่อท่อ ปัจจัยดังกล่าวอาจส่งผลให้อนุภาครวมกันฝังใดฝั่งหนึ่งของอุปกรณ์ได้

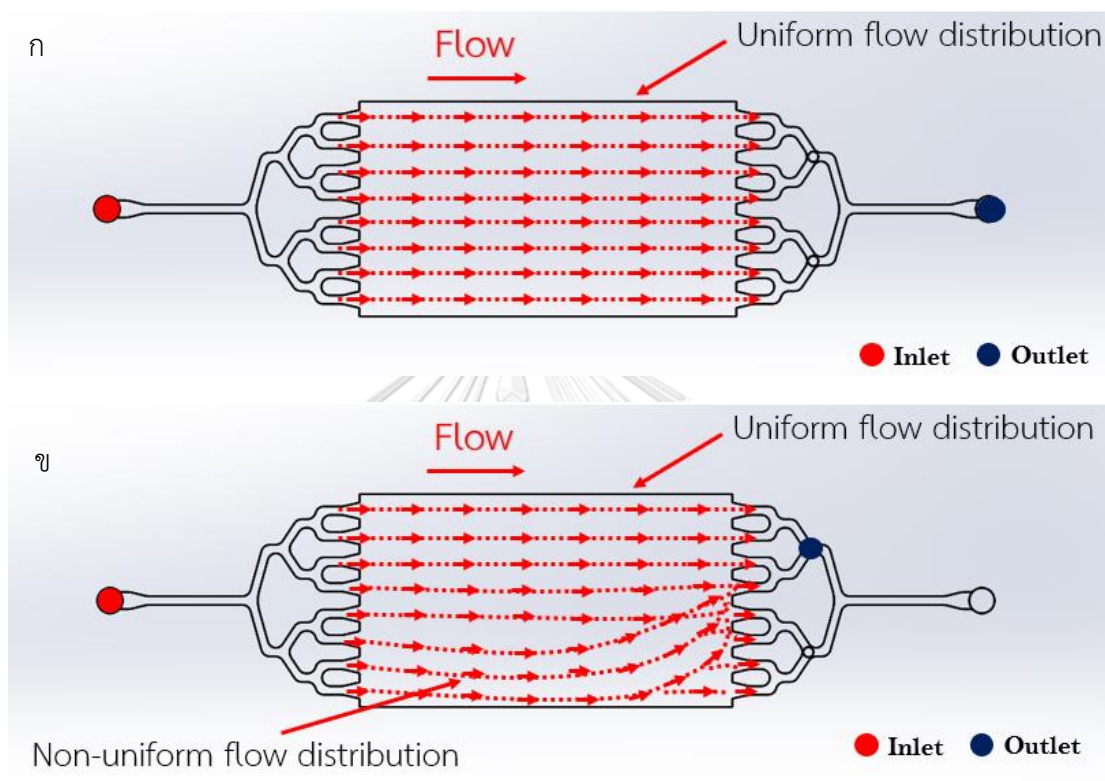
รวมถึงการเชื่อมประสานชิ้นงานโพลีเมอร์ PDMS ไม่ควรติดต่อลงไปในชิ้นงานก่อนประสานเนื่องจาก อาจทำให้วัสดุเกิดความเค้นสะสมจนเกิดการโก่งงอเล็กน้อยได้ส่งผลให้ประสานชิ้นงานไม่แน่น ในกรณี ต้องการใช้อุปกรณ์เดิมในการทดลองซ้ำหลายๆครั้งอาจจะออกแบบโดยการสร้างชั้น PDMS ซึ่งเป็นชั้น ของช่องทางเข้าและออกแล้วนำไปเชื่อมประสานกับอุปกรณ์จุลภาคอีกทีแทนการเสียบและซีลโดย PDMS ในแบบปัจจุบันซึ่งอาจจะทำให้ท่อหลุดได้ง่ายในระยะยาว

สำหรับปัญหาที่เกิดจากการทดลองในกรณีของการเริ่มต้นดักอนุภาคให้เต็มหลุมทุกหลุมควร อาจเพิ่มความเข้มข้นสารละลายเม็ดพลาสติกมากขึ้นและใช้อัตราการไหลที่ต่ำเพื่อลดอิทธิพลของโมเมนตัมความเฉื่อยที่เกิดขึ้นจากมวลของอนุภาคส่งผลให้อนุภาคกระจายได้ทั่วทั้งช่องการไหลหลักและ พยายามหลีกเลี่ยงปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการทดลอง เช่น เศษฝุ่นในห้องปฏิบัติการ สภาวะทางอารมณ์ ผู้ทดลอง ความพร้อมของอุปกรณ์ทดสอบ เป็นต้น มากไปกว่านั้นหากต้องการศึกษาต่อในกรณีใช้อัตราการไหลที่สูงกว่า 500 ml/hr ขับไล่อนุภาคควรออกแบบโครงสร้างเพิ่มเติมเพื่อป้องกันปัญหา ช่องการไหลหลักโป่งบวม (ในกรณีทดลองแบบปั๊มอนุภาค) และ ยุบตัว (ในกรณีทดลองแบบดูดอนุภาค) เช่น การเพิ่มเสาช่วยค้ำยันระหว่างช่องการไหล หรือการออกแบบตัวแม่พิมพ์ให้สามารถหล่อขึ้นรูปอุปกรณ์ให้มีความหนามากขึ้น

สุดท้ายผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองบ่งบอกให้เส้นถึงอิทธิพลรูปแบบการไหลภายในช่องการไหลหลักในกรณีที่ไม่งานกันทั้งพื้นที่หน้าตัดในช่วงท้ายและขอบของอุปกรณ์ส่งผลต่อกลไกการผลักดันอนุภาคโดยตรงเนื่องจากการไหลลงหลุมไม่เกิดความสมดุลส่งผลให้อนุภาคบริเวณดังกล่าวถูกผลักดันออกจนหมด จนนำมาสู่เหตุผลการเปลี่ยนแปลงการเก็บข้อมูลถึงสองครั้ง การแก้ปัญหาหาดังกล่าวอาจทำได้โดยการออกแบบทางออกใหม่โดยมีลักษณะเหมือนกันกับฝั่งทางเข้าและระดับความสูงของช่องการไหลขาเข้าและช่องการไหลหลักควรมีค่าเท่ากัน หากมีการแก้ไขระบบดังกล่าวสามเหลี่ยมมุมเท่าอาจมีประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเดี่ยวได้สูงถึงร้อยละ 90 โดยไม่ต้องตีกรอบพื้นที่การเก็บข้อมูล

สืบเนื่องจากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการไหลลักษณะโค้งมุดตัวลงสู่หลุม ผู้วิจัยอาจจะใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์นี้สำหรับการปล่อยอนุภาคภายในหลุมเพื่อนำมาใช้งานต่อภายหลังได้ โดยการสร้างรูปแบบการไหลที่ไม่สมดุลในช่วงบริเวณหลุมที่ต้องการปลดปล่อยอนุภาคออก เช่น การออกแบบช่องทางออกสามช่องทางกระจายตัวตำแหน่งกลาง ซ้าย และขวาของอุปกรณ์ โดยใช้ช่องกลางเป็นช่องทางออกและอุดช่องซ้ายและขวาไว้สำหรับการดักจับอนุภาคเดี่ยวดังรูปที่ 6.1ก หรือช่อง

ใช้ช่องซ้ายเป็นช่องทางออกและอุดช่องกลางและขวาไว้สำหรับกรณีที่ต้องการปล่อยอนุภาคแถบขวาและกลางของอุปกรณ์ให้ออกจากหลุมเนื่องจากบริเวณดังกล่าวจะเกิดการไหลลงหลุมในลักษณะไม่สมดุลดังรูปที่ 6.1ข



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 6.1 แบบอุปกรณ์จุลภาคแบบใหม่ที่อาจจะสร้างการไหลเอียงตัวไปกับทิศทางการเรียงตัวของหลุมจุลภาคเมื่อใช้ท่อทางออกต่างกันสำหรับ (ก) ดักจับอนุภาคเดี่ยว, (ข) ปล่อยอนุภาคออก

บรรณานุกรม

- [1] D. Howard, L. D. Buttery, K. M. Shakesheff, and S. J. Roberts, "Tissue engineering: strategies, stem cells and scaffolds," *J Anat*, vol. 213, no. 1, pp. 66-72, Jul 2008.
- [2] S. Sundelacruz and D. L. Kaplan, "Stem cell- and scaffold-based tissue engineering approaches to osteochondral regenerative medicine," *Semin Cell Dev Biol*, vol. 20, no. 6, pp. 646-55, Aug 2009.
- [3] K. M. Fridley, M. A. Kinney, and T. C. McDevitt, "Hydrodynamic modulation of pluripotent stem cells," *Stem Cell Res Ther*, vol. 3, no. 6, p. 45, Nov 20 2012.
- [4] R. M. Johann, "Cell trapping in microfluidic chips," *Anal Bioanal Chem*, vol. 385, no. 3, pp. 408-12, Jun 2006.
- [5] J. Pivetal *et al.*, "Micro-magnet arrays for specific single bacterial cell positioning," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 380, pp. 72-77, 2015.
- [6] W.-H. T. a. S. Takeuchi, "A trap-and-release integrated microfluidic system for dynamic microarray applications," *National Center for Biotechnology Information Search database*, vol. 104, pp. 1146–1151, 2007.
- [7] L. Huang, Y. Chen, Y. Chen, and H. Wu, "Centrifugation-Assisted Single-Cell Trapping in a Truncated Cone-Shaped Microwell Array Chip for the Real-Time Observation of Cellular Apoptosis," *Anal Chem*, vol. 87, no. 24, pp. 12169-76, Dec 15 2015.
- [8] J. Y. Park *et al.*, "Single cell trapping in larger microwells capable of supporting cell spreading and proliferation," *Microfluid Nanofluidics*, vol. 8, no. 2, pp. 263-268, Feb 1 2010.
- [9] A. Banaeiyan, D. Ahmadpour, C. Adiels, and M. Goksör, "Hydrodynamic Cell Trapping for High Throughput Single-Cell Applications," *Micromachines*, vol. 4, no. 4, pp. 414-430, 2013.
- [10] A. G. Winkleman, Katherine L.; Ryan, Declan; Whitesides, George M.; Greenfield, Derek; Prentiss, Mara, "A magnetic trap for living cells suspended in a paramagnetic buffer," *American Institute of Physics*, vol. 85, 2004.

- [11] Y. Yoshimura, M. Tomita, F. Mizutani, and T. Yasukawa, "Cell pairing using microwell array electrodes based on dielectrophoresis," *Anal Chem*, vol. 86, no. 14, pp. 6818-22, Jul 15 2014.
- [12] A. Manbachi *et al.*, "Microcirculation within grooved substrates regulates cell positioning and cell docking inside microfluidic channels," *Lab Chip*, vol. 8, no. 5, pp. 747-54, May 2008.
- [13] P. Occhetta, M. Licini, A. Redaelli, and M. Rasponi, "Design of a microfluidic strategy for trapping and screening single cells," *Med Eng Phys*, vol. 38, no. 1, pp. 33-40, Jan 2016.
- [14] W. Espulgar *et al.*, "Single cell trapping and cell-cell interaction monitoring of cardiomyocytes in a designed microfluidic chip," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 207, pp. 43-50, 2015.
- [15] H. C. Moeller, M. K. Mian, S. Shrivastava, B. G. Chung, and A. Khademhosseini, "A microwell array system for stem cell culture," *Biomaterials*, vol. 29, no. 6, pp. 752-63, Feb 2008.
- [16] S. Lindstrom, K. Mori, T. Ohashi, and H. Andersson-Svahn, "A microwell array device with integrated microfluidic components for enhanced single-cell analysis," *Electrophoresis*, vol. 30, no. 24, pp. 4166-71, Dec 2009.
- [17] D. G.-P. Nicholas Ferrell, Natalia Higuera-Castro, Randall T. Butler, and K. J. G. Rashmeet K. Reen, and Derek J. Hansford, "Vacuum-Assisted Cell Seeding in a Microwell Cell Culture System," *Analytical Chemistry*, vol. 82, pp. 2380-2386, 2010.
- [18] J. Zhu, J. Shang, T. Olsen, K. Liu, D. Brenner, and Q. Lin, "A Mechanically Tunable Microfluidic Cell-Trapping Device," *Sens Actuators A Phys*, vol. 215, pp. 197-203, Aug 15 2014.
- [19] T. Tongmanee, "A STUDY OF TRIANGULAR MICROWELL TECHNIQUE FOR MICRO-PARTICLES TRAPPING," Master's degree, The Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Chulalongkorn University Printing House, 2015.

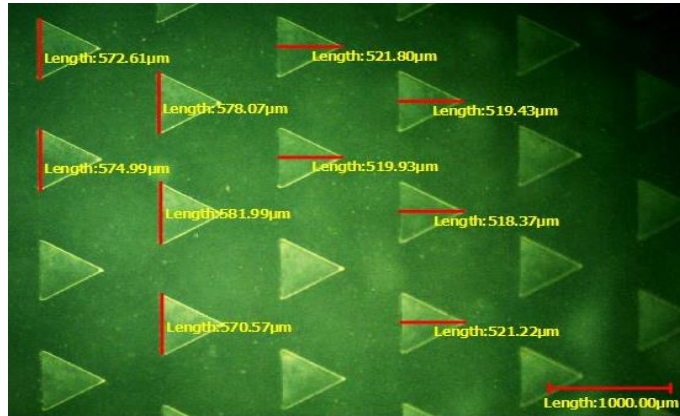


ภาคผนวก

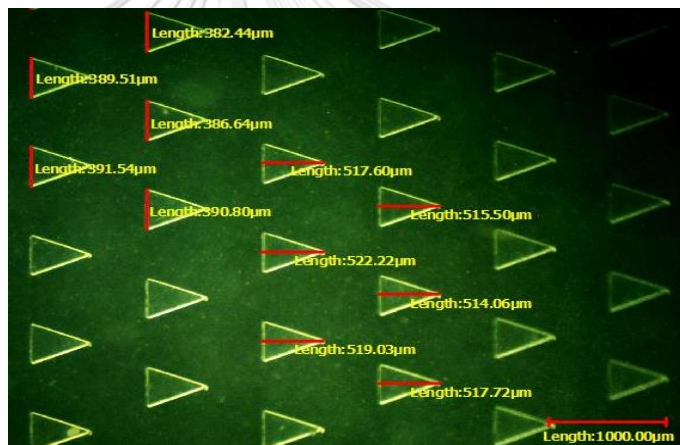
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
ขนาดหลุมจริงหลังการขึ้นรูป

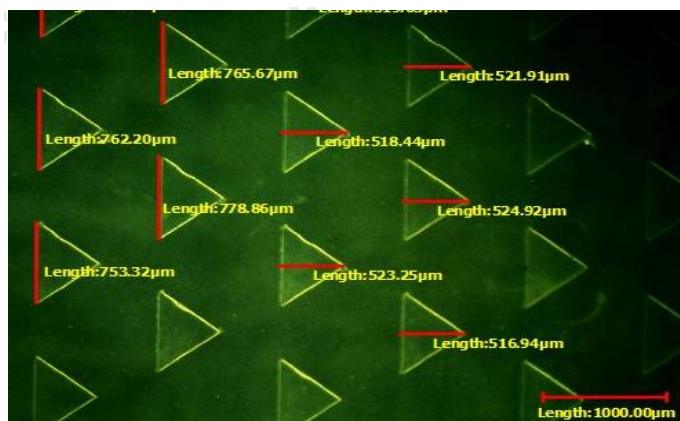
ก



ข



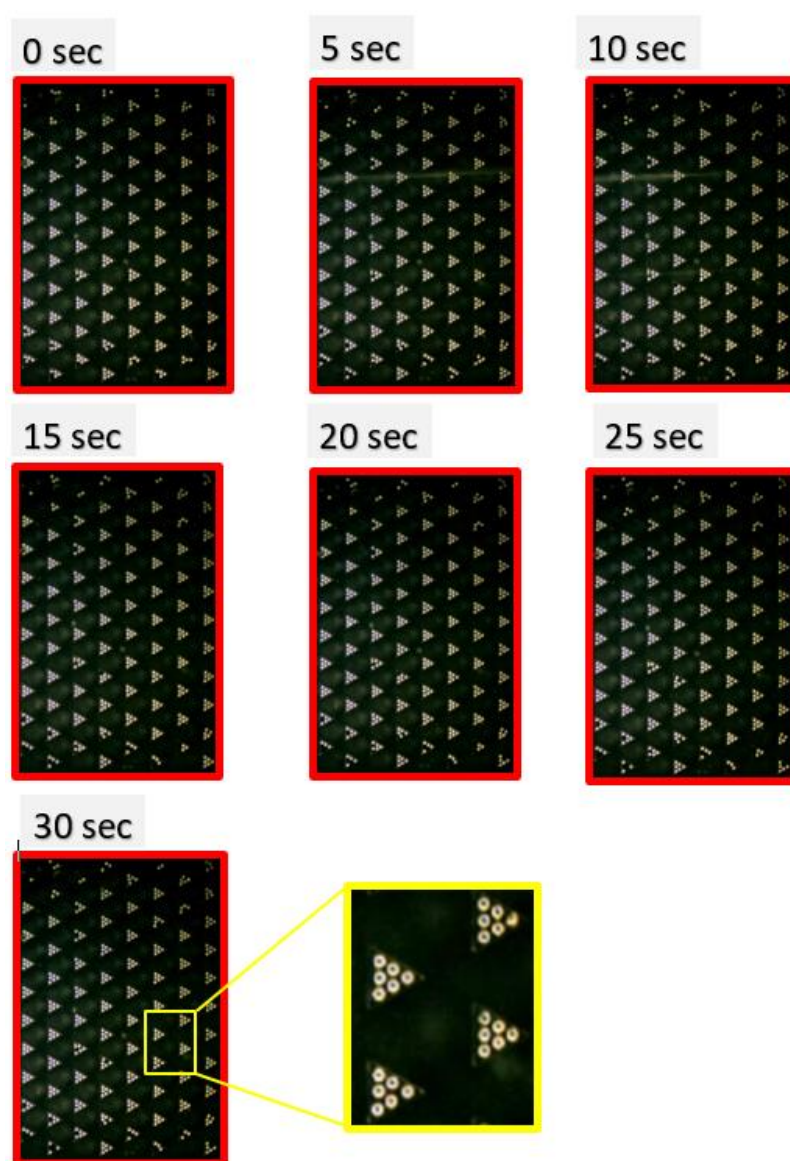
ค



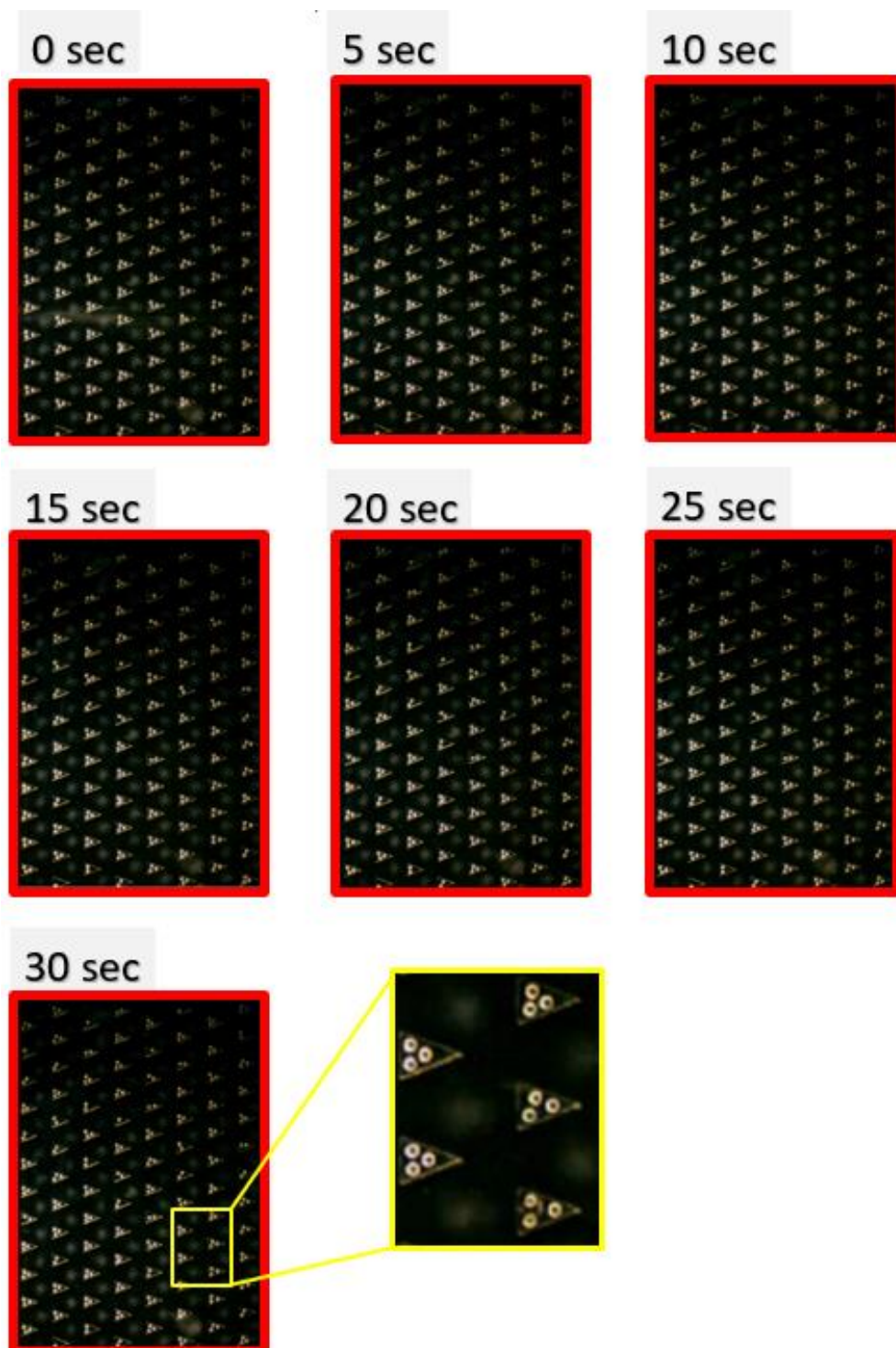
ภาคผนวกรูปที่ 1 ขนาดหลุมจริงสามเหลี่ยมจุดภาคหลังการขึ้นรูปในกรณีหลุม (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

ภาคผนวก ข
การดักจับอนุภาคเม็ดพลาสติกภายในอุปกรณ์

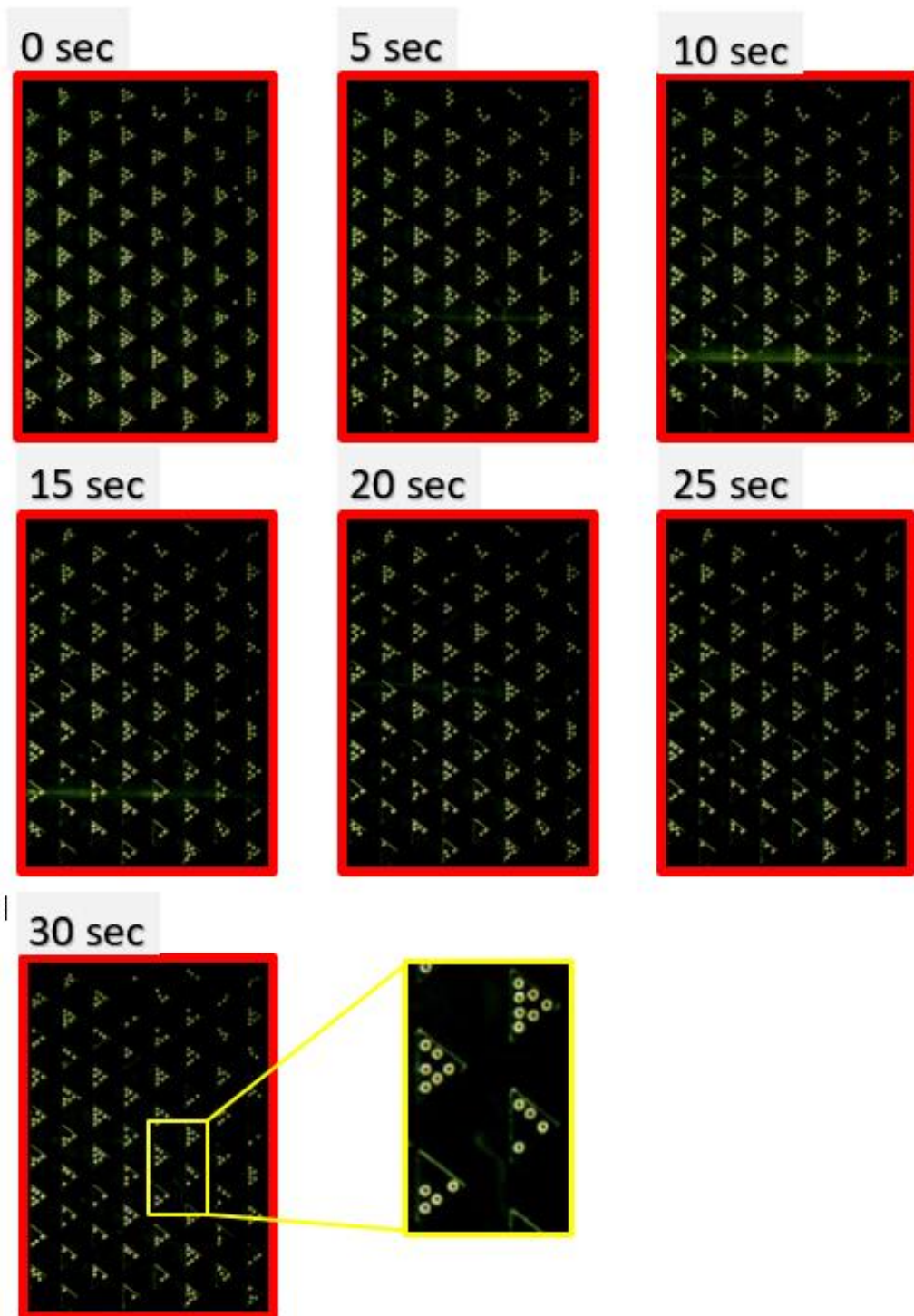
ภาพแสดงการดักจับอนุภาคภายในอุปกรณ์สามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้านแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ กรณีการทดลองระยะสั้น 30 วินาทีโดยเก็บผลทุก 5 วินาที และกรณีการทดลองระยะยาว 2 นาทีโดยเก็บผลทุก 15 วินาที



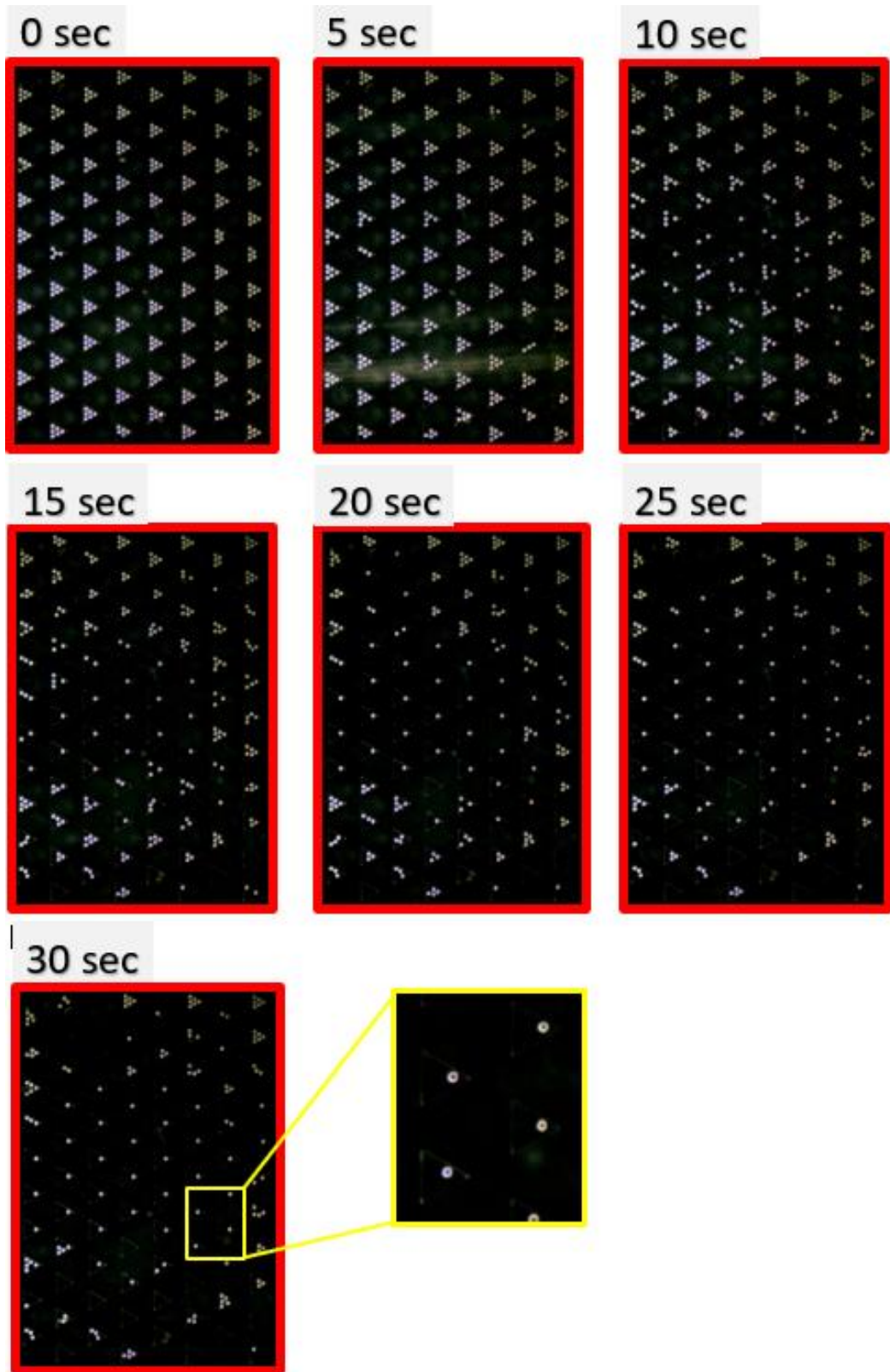
ภาคผนวกรูปที่ 2 การดักจับอนุภาคระยะสั้นภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าที่อัตราไหล 350 ml/hr



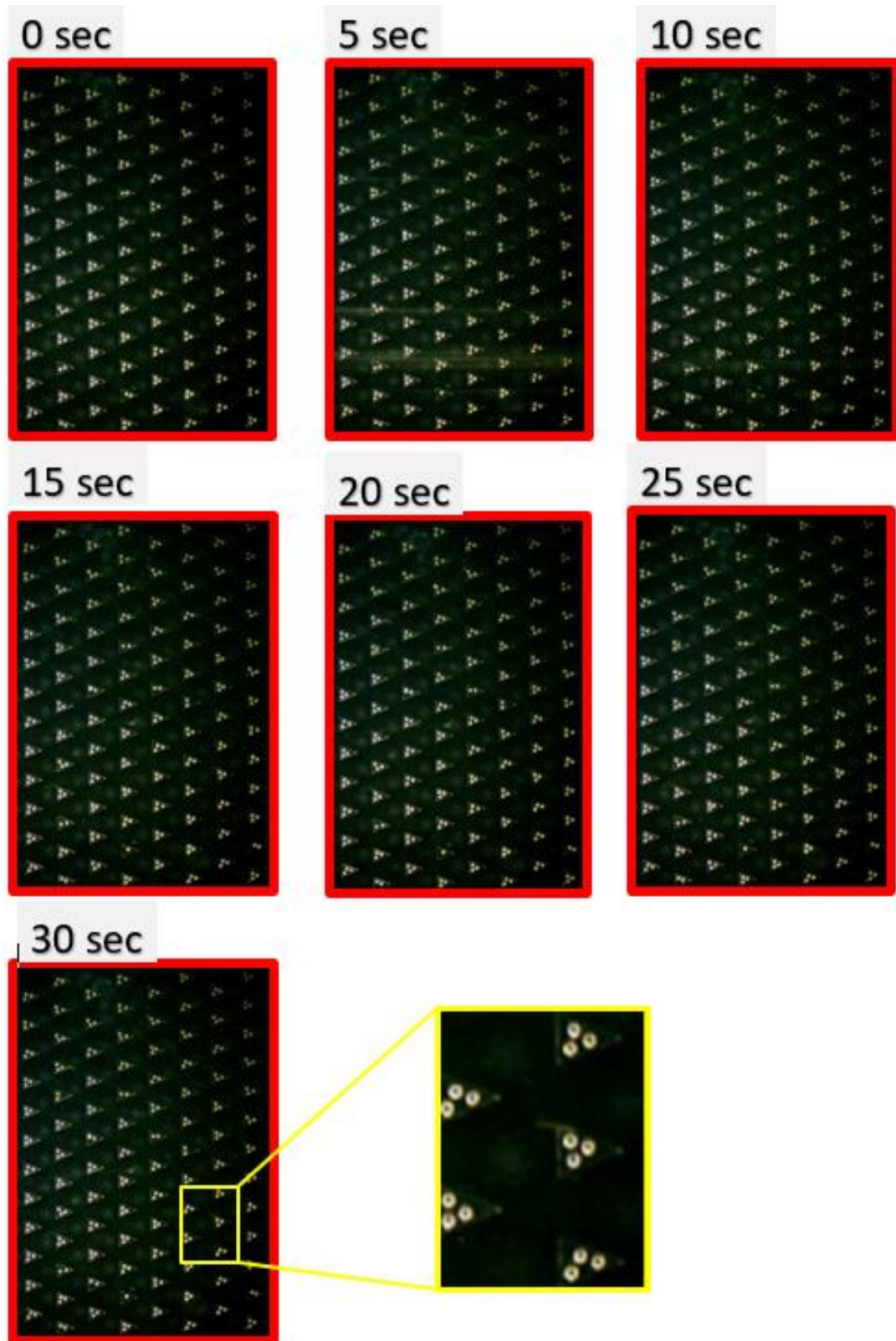
ภาพผนวกรูปที่ 3 การดักจับอนุภาคระยะสั้นภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมแหลมที่อัตราไหล 350 ml/hr



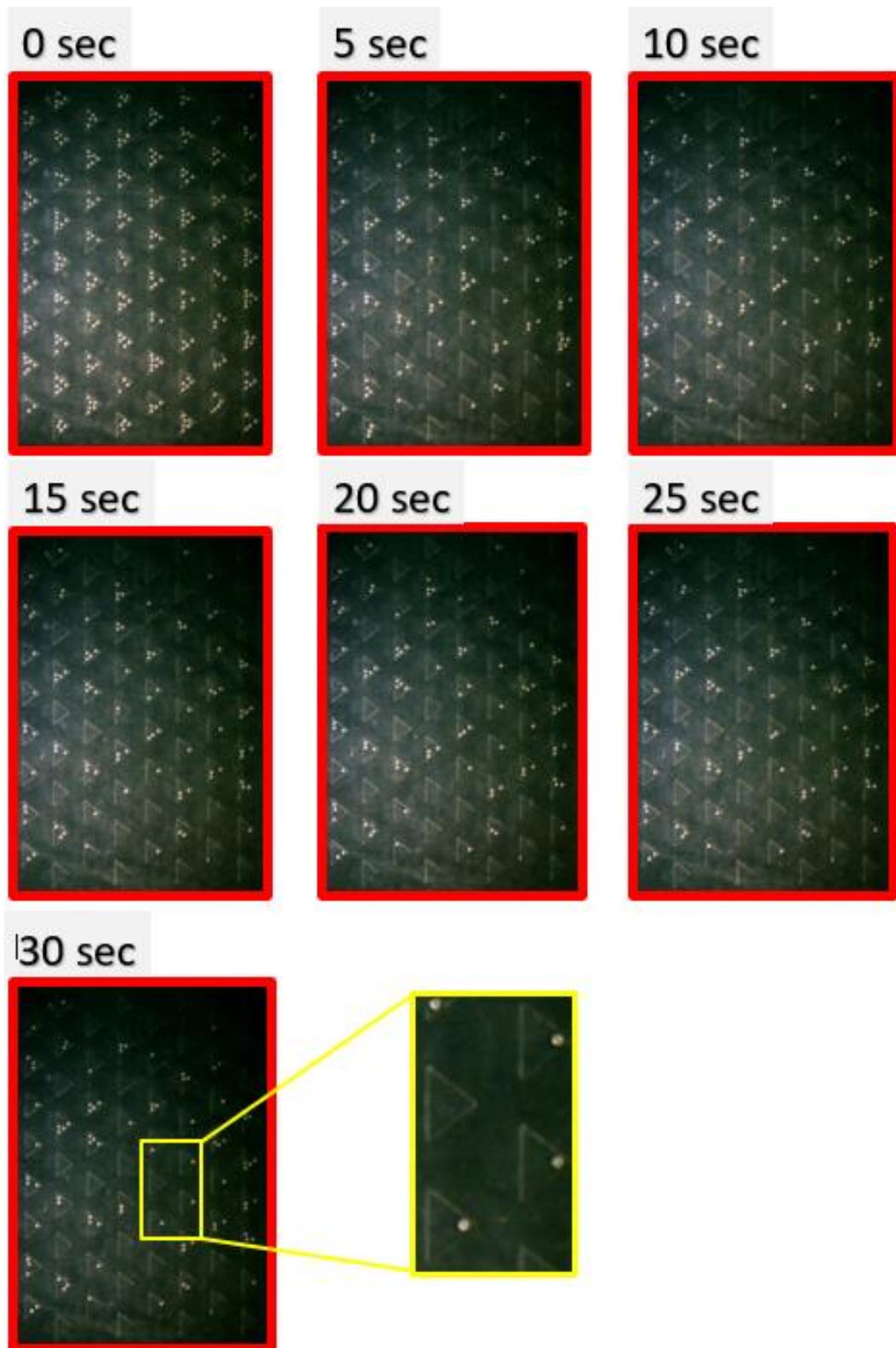
ภาพผนวกรูปที่ 4 การดักจับอนุภาคระยะสั้นภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมป้านที่อัตราไหล 350 mL/hr



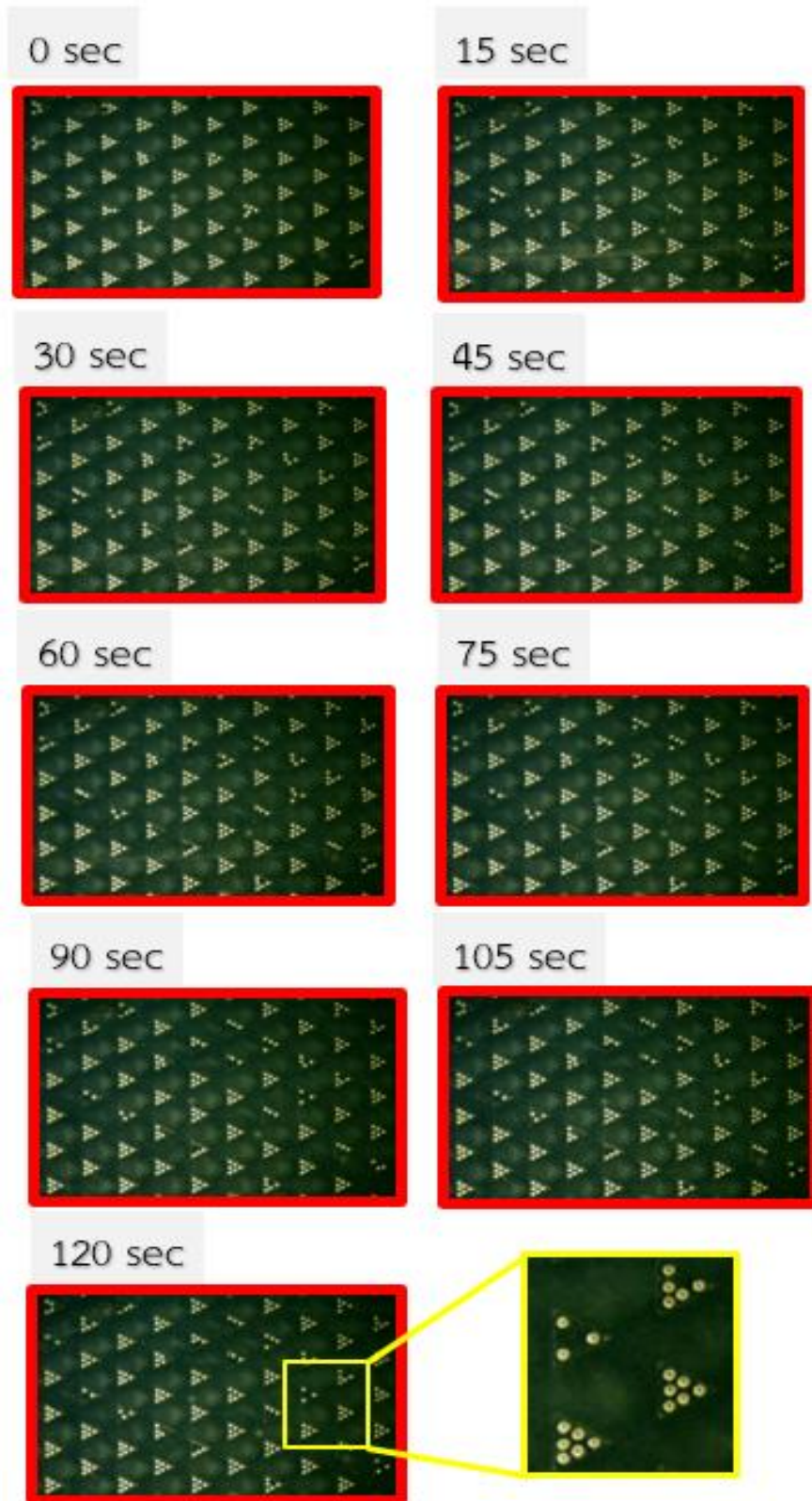
ภาคผนวกรูปที่ 5 การดักจับอนุภาคระยะสั้นภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าที่อัตราไหล 500 ml/hr



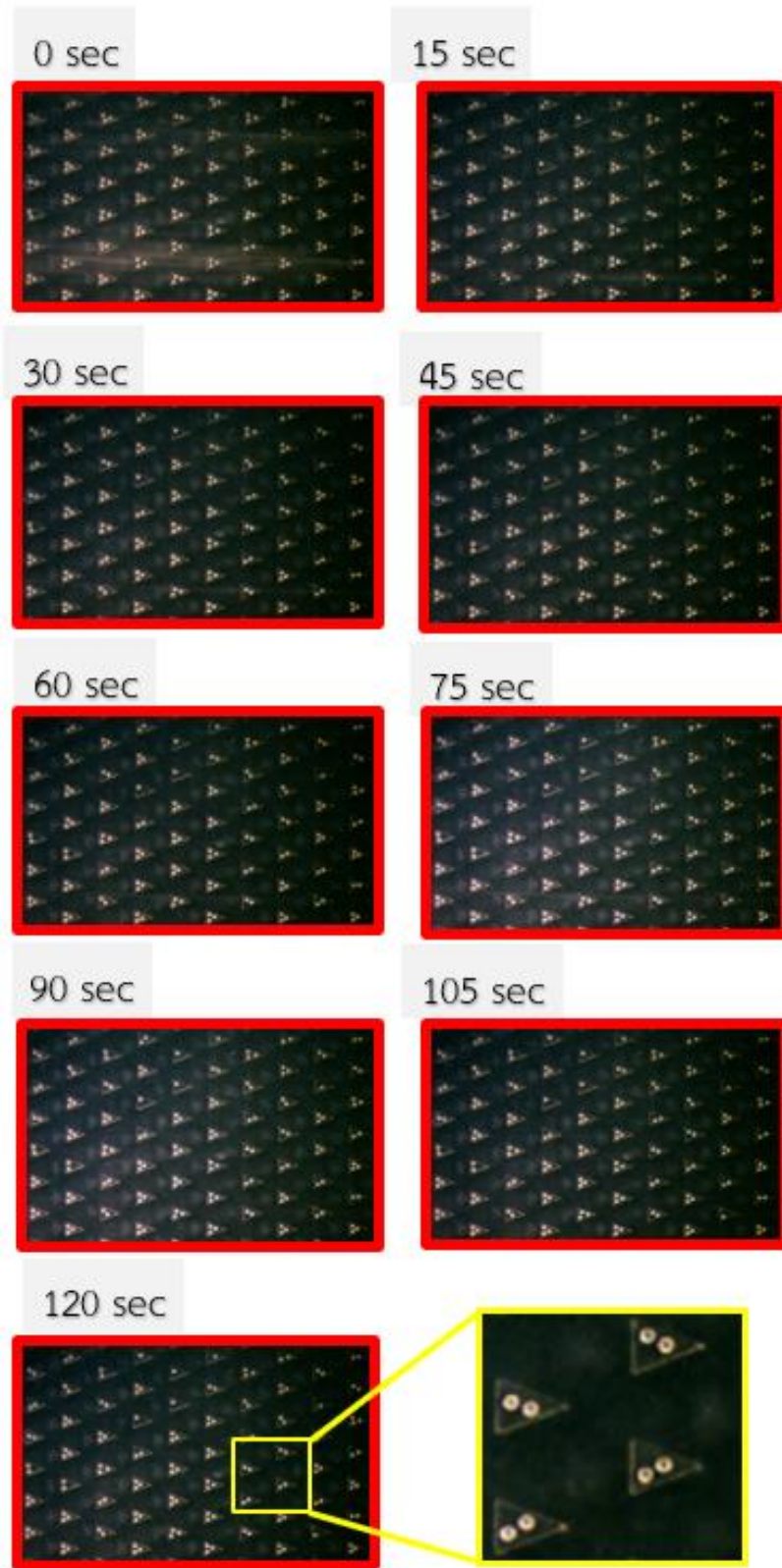
ภาพผนวกรูปที่ 6 การดักจับอนุภาคระยะสั้นภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมแหลมที่อัตราไหล 500 $\mu\text{L/hr}$



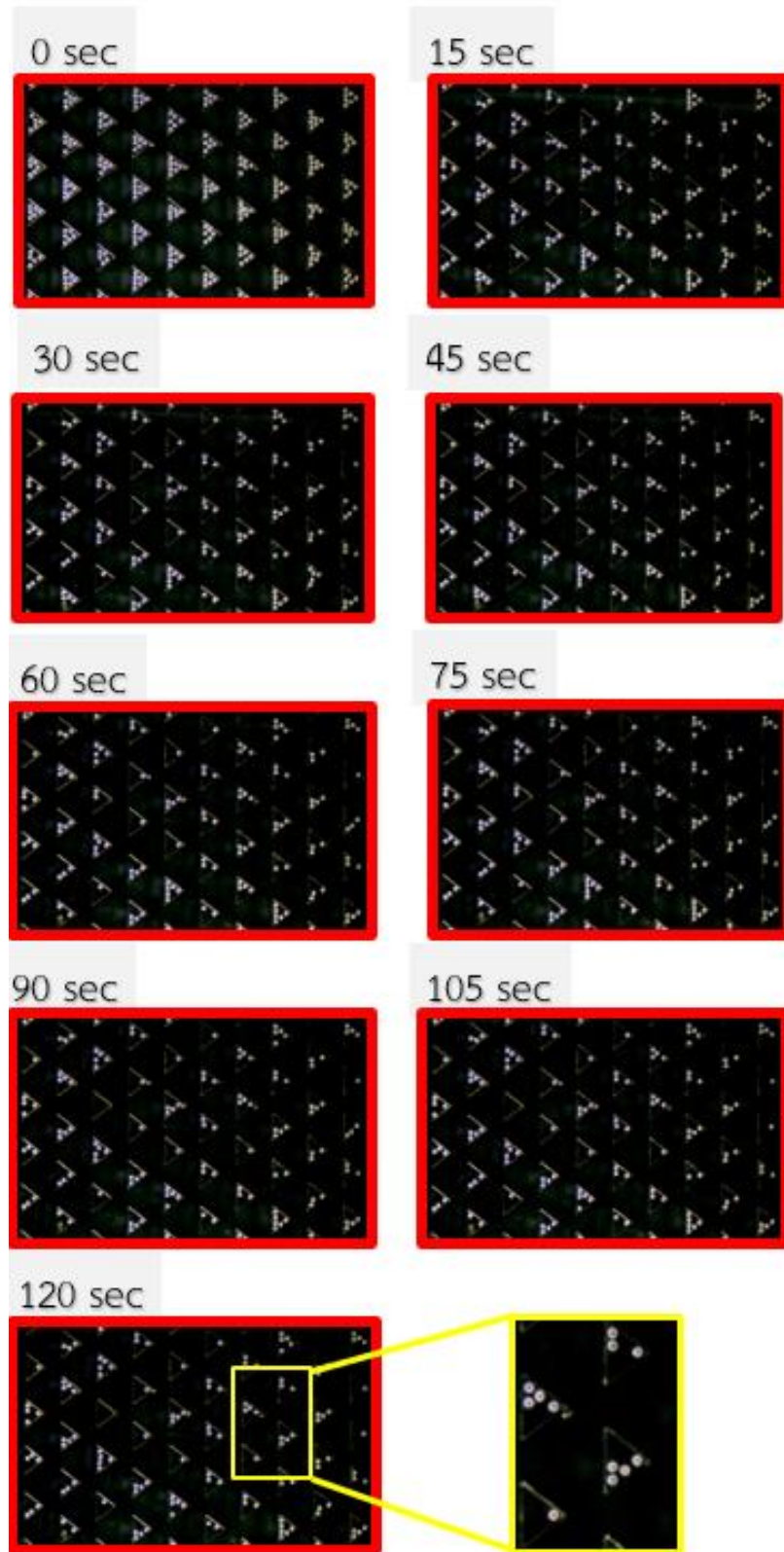
ภาคผนวกรูปที่ 7 การดักจับอนุภาคระยะสั้นภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมป้านที่อัตราไหล 500 ml/hr



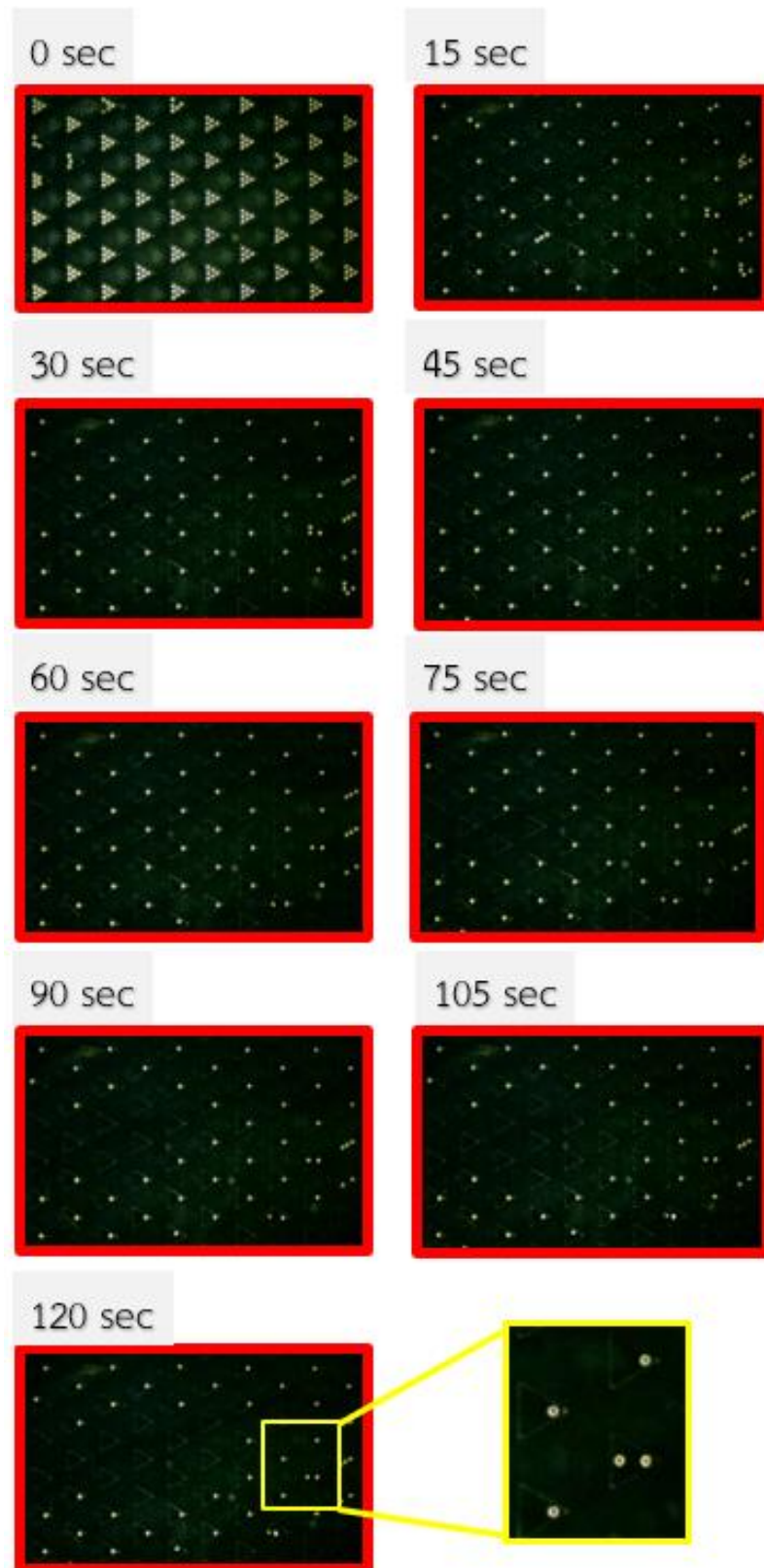
ภาคผนวกรูปที่ 8 การดักจับอนุภาคระยะยาวภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าที่อัตราไหล 350 ml/hr



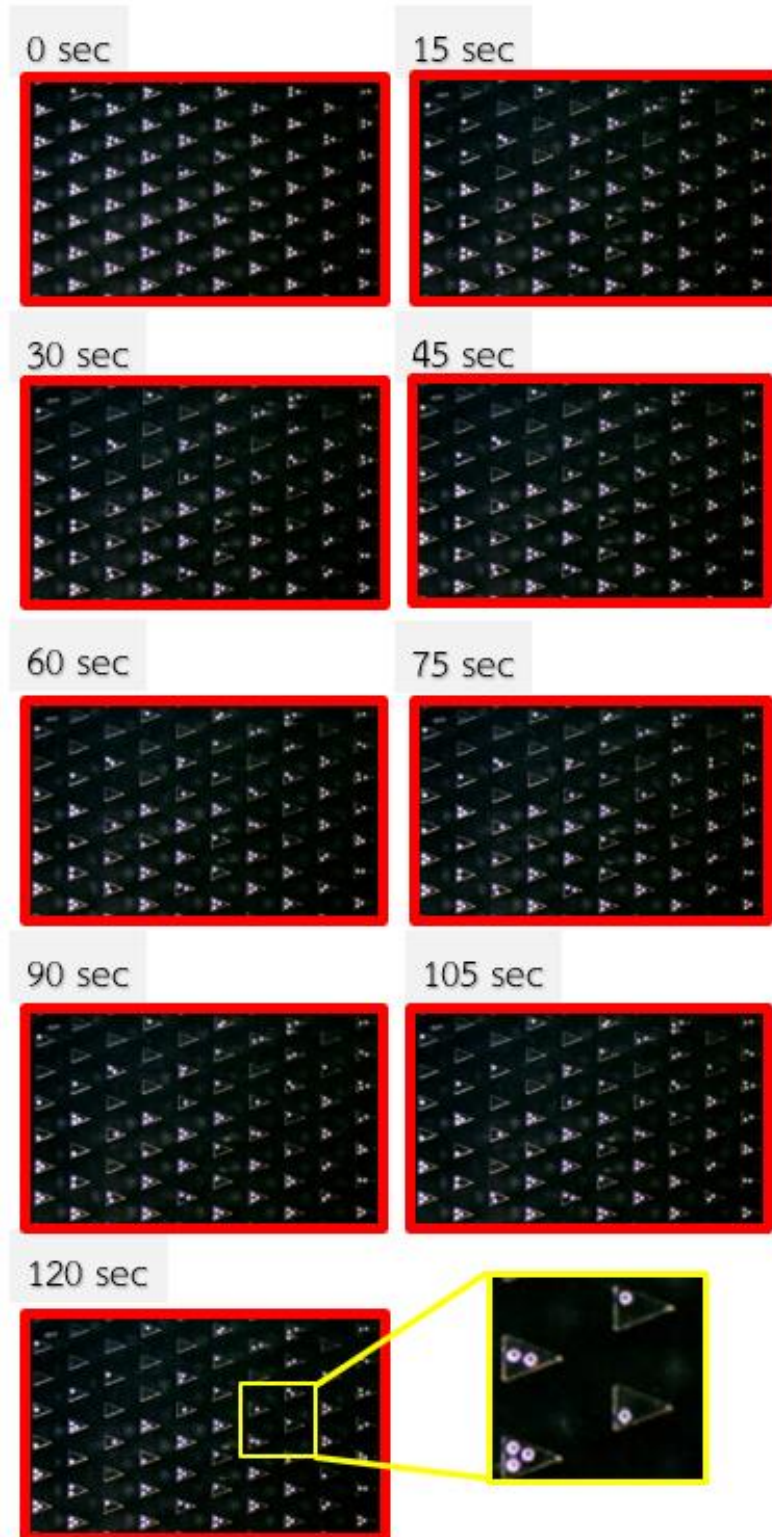
ภาพผนวกรูปที่ 9 การดักจับอนุภาคระยะยาวภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมแหลมที่อัตราไหล 350 ml/hr



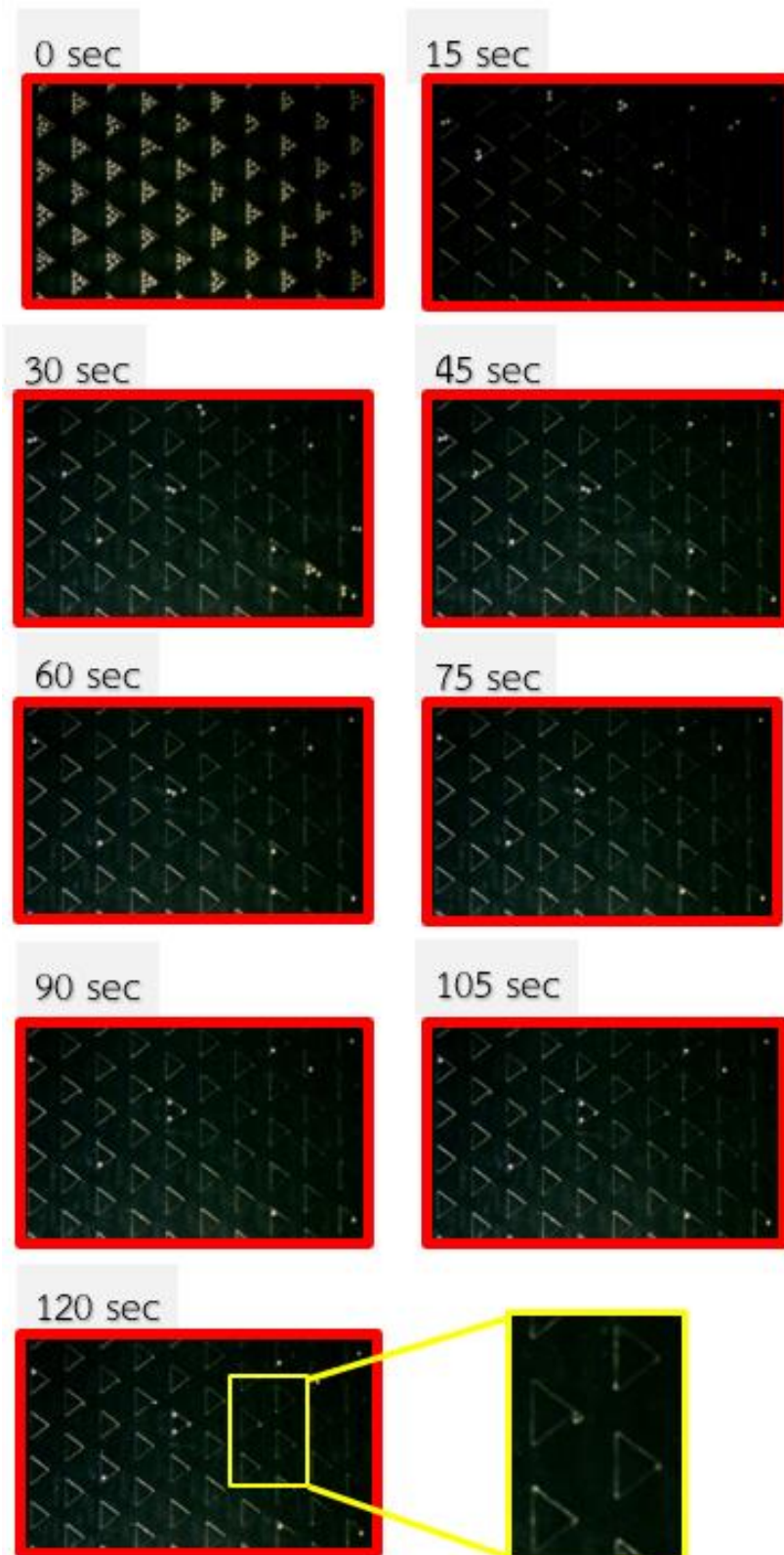
ภาพผนวกรูปที่ 10 การดักจับอนุภาคระยะยาวภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมป้านที่อัตราไหล 350 ml/hr



ภาคผนวกรูปที่ 11 การดักจับอนุภาคระยะยาวภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่าที่อัตราไหล 500 mL/hr

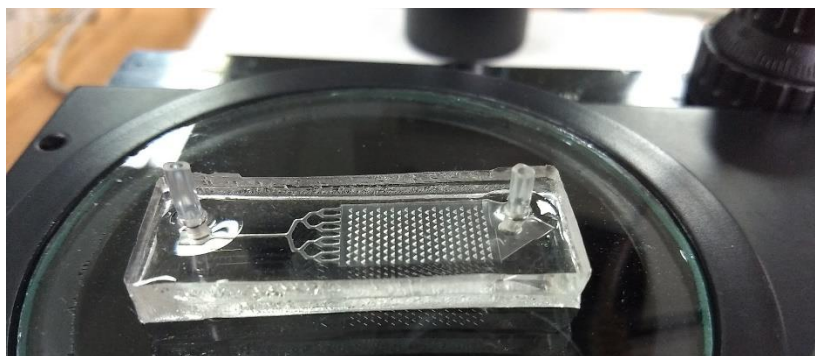


ภาพผนวกรูปที่ 12 การดักจับอนุภาคระยะยาวภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมแหลมที่อัตราไหล 500 ml/hr



ภาพผนวกรูปที่ 13 การดักจับอนุภาคระยะยาวภายในหลุมสามเหลี่ยมมุมป้านที่อัตราไหล 500 ml/hr

ภาคผนวก ค
อุปกรณ์สำหรับการทดลอง



ภาคผนวกรูปที่ 14 อุปกรณ์ของไหลจุลภาค



ภาคผนวกรูปที่ 15 กล้องจุลทรรศน์



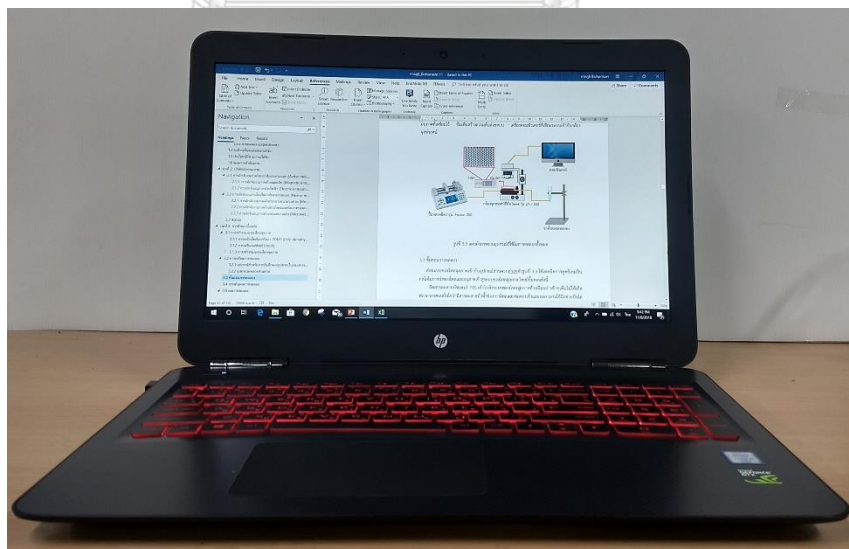
ภาคผนวกรูปที่ 16 หลอดฉีดยาเชื่อมต่อกับท่อซิลิโคนและคอนเนคเตอร์



ภาคผนวกรูปที่ 17 อุปกรณ์กรองเศษขนาดเล็ก



ภาพผนวกรูปที่ 18 หลอดทดลอง



ภาพผนวกรูปที่ 19 คอมพิวเตอร์



ภาคผนวกรูปที่ 20 ปีมหลอดชนิดยา



ภาคผนวกรูปที่ 21 แท่นคิบบหลอดทดลอง



ภาคผนวกรูปที่ 22 ไมโครปิเปต



ภาคผนวกรูปที่ 23 สารละลาย PBS

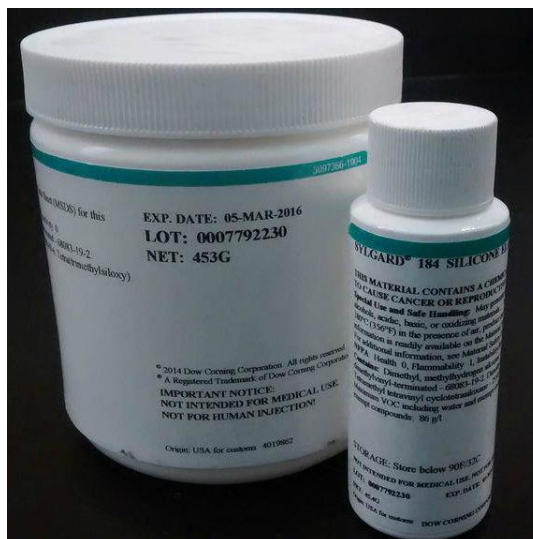


ภาคผนวกรูปที่ 24 สารลดแรงตึงผิว



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

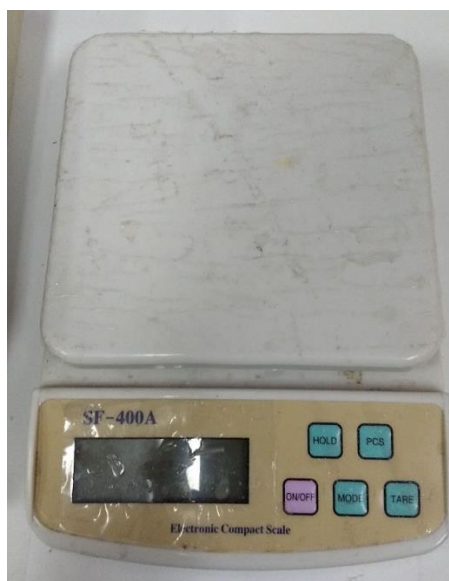
ภาคผนวก ง
อุปกรณ์สำหรับการขึ้นรูปอุปกรณ์ทดสอบ



ภาคผนวกรูปที่ 25 พอลิเมอร์ PDMS (ใหญ่) และ สารเร่งปฏิกิริยาการแข็งตัวของพอลิเมอร์ (เล็ก)



ภาคผนวกรูปที่ 26 ตู้สร้างสภาวะศูนย์อากาศ



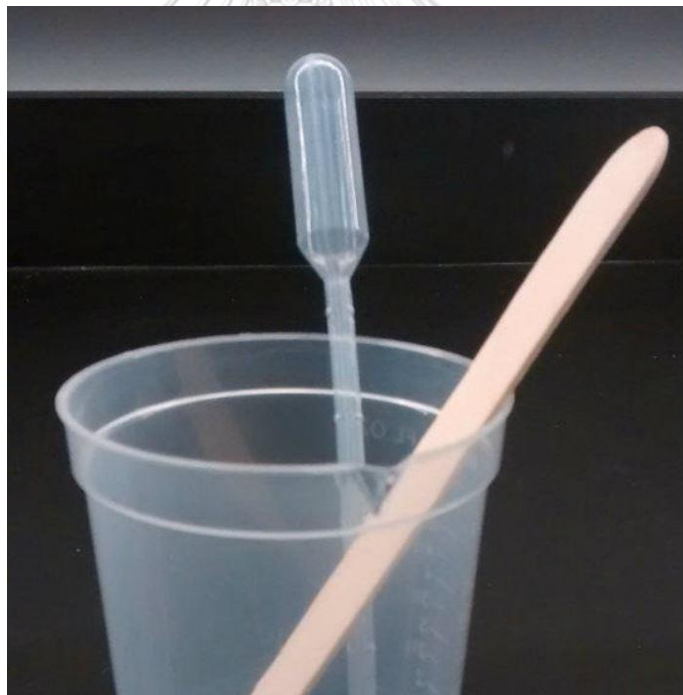
ภาคผนวกรูปที่ 27 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล



ภาคผนวกรูปที่ 28 เครื่องสร้างความร้อน



ภาคผนวกรูปที่ 29 อุปกรณ์เจาะรู



ภาคผนวกรูปที่ 30 แก้วพลาสติกและอุปกรณ์สำหรับคนพอลิเมอร์



ภาคผนวกรูปที่ 31 แม่พิมพ์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก จ

การนำเข้าไฟล์ข้อมูลจากโปรแกรมเขียนแบบเข้าสู่โปรแกรมจำลองการไหลโดยตรง

เป็นการนำแบบที่เกิดจากการเขียนแบบก่อนหน้า เปิดสู่โปรแกรมจำลองการไหลโดยตรง เนื่องจากผู้ใช้บางคนอาจไม่ชำนาญในการวาดแบบบนโปรแกรมจำลองการไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบบที่มีความซับซ้อนมาก วิธีนี้จึงเป็นวิธีหนึ่งที่ลดการทำงานที่ซ้ำซ้อนและมั่นใจได้ว่าขนาดของแบบที่ออกแบบจะเท่ากันทุกประการในการนำมาใช้จำลองการไหลโดยมีขั้นตอนดังนี้

- เปิดโปรแกรม COMSOL Multiphysics® ตั้งค่าเงื่อนไขการทดลอง เช่น Laminar flow และ Stationery เมื่อโปรแกรมเปลี่ยนไปสู่หน้าต่างหลัก กดปุ่ม Import บนแถบ Model หรือ Geometry ด้านบน
- ในหน้าต่างหลักช่อง Setting (ช่องกลาง) ในหัวข้อย่อย Import มีหัวข้อ “Geometry import” ให้เลือก 3D CAD file เนื่องจากเรานำเข้าไฟล์จากโปรแกรมเขียนแบบ เช่น Solidworks® (นามสกุลไฟล์ .sldprt, sldasm) และ AutoCAD (นามสกุลไฟล์ dwg, dxf) อนึ่ง การเลือกนำเข้าไฟล์เขียนแบบสามารถเลือกได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนแบบสามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จากเว็บไซต์โปรแกรมจำลองการไหลนั้นๆ
- จากนั้น ในหัวข้อย่อย “Selections of Resulting Entities” ให้เลือกเครื่องหมายถูกในกล่อง “Create selection”
- ในหัวข้อย่อย “Import” เดียวกัน เลือกปุ่ม Browse เพื่อเลือกไฟล์งานเขียนแบบ จะปรากฏแบบในช่อง Graphics ขวามือ

ภาคผนวก ฉ

การวาดแบบบนโปรแกรมจำลองการไหล COMSOL Multiphysics®

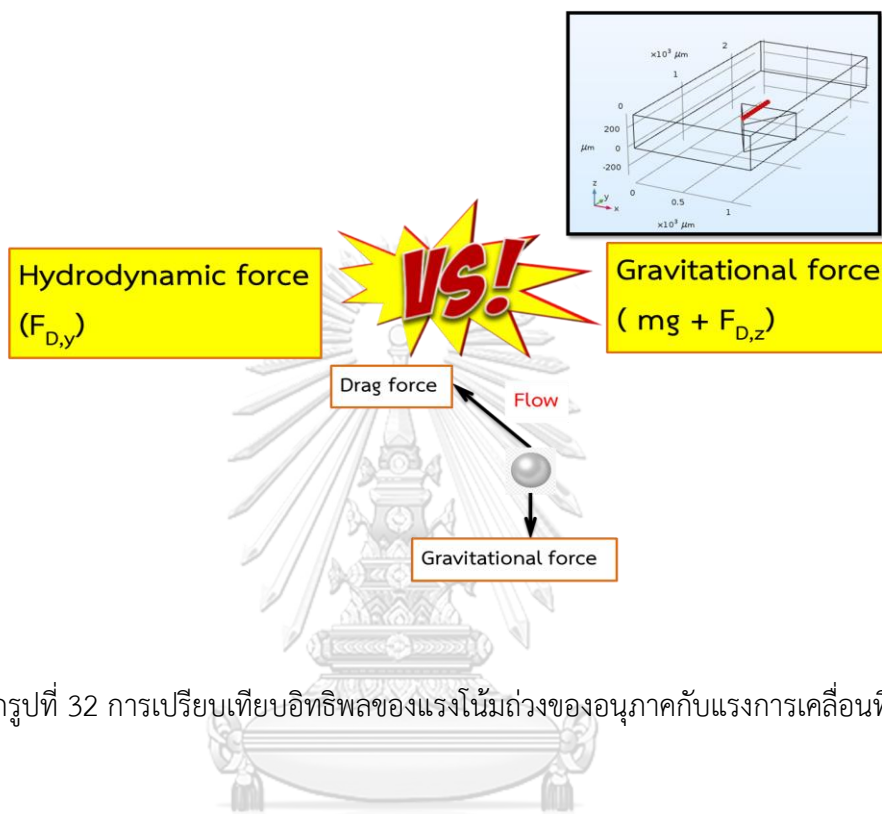
เป็นการวาดแบบโดยใช้โปรแกรมจำลองการไหล COMSOL Multiphysics® โดยตรงส่วน
ใหญ่แล้วใช้คำสั่งพื้นฐานเนื่องจากแบบไม่มีความซับซ้อนมากนัก โดยมีขั้นตอนการวาดแบบดังนี้

- ในหัวข้อ Component ในกล่อง Model Builder ซ้ายมือ คลิกขวาในหัวข้อย่อย Geometry เลือก Work Plane จากนั้นจะมีหัวข้อย่อยปรากฏขึ้นมาให้เข้าไปแล้วคลิกขวาที่หัวข้อ Plane Geometry จากนั้นเลือก Rectangular เพื่อสร้าง ของเขตใหญ่ของการจำลอง ก่อน จากนั้นคลิกขวาที่ Geometry และ กดปุ่ม Build All โดยมีการตั้งค่าขนาดเกี่ยวกับรูปสี่เหลี่ยมต่างๆ
- คลิกขวาที่ Work plan อีกครั้งจากนั้นเลือก Extrude Plane ดังกล่าว (Rectangular) เพื่อเพิ่มความสูงของแบบที่เขียนไปในทิศทางแกน Z จากนั้นคลิกขวาที่ Geometry และ กดปุ่ม Build All โดยมีการตั้งค่าขนาดต่างๆ ถึงขั้นตอนนี้ตอนนี้จะได้รูปสี่เหลี่ยมทรงตันปรากฏในกล่อง Graphics ทางขวามือ
- สร้างรูปสี่เหลี่ยมในหัวข้อ Plane Geometry จากนั้นเลือก Rectangular เช่นเดียวกันกับข้อ 1 และ 2 อีกครั้ง แต่ปรับเปลี่ยนขนาดต่างๆ ถึงขั้นตอนนี้ตอนนี้จะได้รูปสี่เหลี่ยมทรงตัน 2 กล่องปรากฏในกล่อง Graphics ทางขวามือ
- คลิกขวาในหัวข้อย่อย Geometry เลือก Work Plane จากนั้นจะมีหัวข้อย่อยปรากฏขึ้นมาให้เข้าไปแล้วคลิกขวาที่หัวข้อ Plane Geometry จากนั้นเลือก Bezier Polygon เพื่อสร้างรูปสามเหลี่ยม โดยการกำหนดจะต้องกำหนดเป็นจุดที่มุมสามเหลี่ยมแต่ละมุมตั้งนั้น สามเหลี่ยม 1 รูปจะมีการกำหนดจุดสามครั้ง เริ่มจากคลิกซ้ายหนึ่งครั้งที่คำสั่ง Bezier Polygon จากนั้นสังเกตในกล่องกลาง Setting ให้ Add linear พร้อมระบุพิกัดของแต่ละเส้น
- คลิกขวาที่ Work plan อีกครั้งจากนั้นเลือก Extrude Plane (Bezier Polygon) ดังกล่าว เพื่อเพิ่มความสูงของแบบที่เขียนไปในทิศทางแกน Z จากนั้นคลิกขวาที่ Geometry และ กดปุ่ม Build All โดยมีการตั้งค่าขนาดต่างๆตั้งรูปที่ ถึงขั้นตอนนี้ตอนนี้จะได้รูปที่เราออกแบบปรากฏในกล่อง Graphics ทางขวามือ ทำเช่นนี้เรื่อยไปจนได้สามเหลี่ยมครบทุกตำแหน่งที่เราต้องการ อนึ่งสามารถใช้ฟังก์ชัน Array แทนโดยการสร้างสามเหลี่ยมที่เหลือจากการคัดลอกรูปสามเหลี่ยมต้นแบบ เพื่อลดระยะเวลาการเขียนแบบ

- จากนั้นคลิกขวาที่ Geometry และ กดปุ่ม Union Work Plane เพื่อกำหนด ให้โปรแกรม รับรู้ ว่า Plane ทุก Plane ที่เราวาดมาเชื่อมต่อติดกันทั้งหมดจากนั้นคลิกขวาที่ Geometry และ กดปุ่ม Build All
- ทำการลบพื้นที่หน้าตัดที่เชื่อมกันในแต่ละ Plane ออกเพื่อสร้างช่องทางการไหล หากไม่มี ฟังก์ชันนี้ ของไหลจะไม่สามารถ ไหลสู่ Plane อื่นๆได้ จึงจำเป็นต้องกำหนดช่องว่างระหว่าง Plane ให้โปรแกรมรับรู้โดยการคลิกขวาที่ Geometry และ กดปุ่ม Delete Entities ใน กล้องกลาง Union ให้ตั้งค่า โดยการคลิกเลือกโดเมนทั้งหมด 3 Plane ที่เราสร้างขึ้นมาก่อนหน้านี้ จากนั้นคลิกขวาที่ Geometry และ กดปุ่ม Build All เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการสร้าง แบบเพื่อการจำลอง อนึ่ง นอกเหนือจากการลบผิวสัมผัสระหว่างระนาบโดยใช้ฟังก์ชัน Delete Entities สามารถใช้เทคนิคการ Extrude แบบไม่เก็บผิวหน้าเดิมที่วาดไว้ก่อนหน้า ได้เช่นกัน โดยการเลือกเครื่องหมายถูกในช่อง Keep cross-sectional faces ออกทุกครั้งที่ใช้คำสั่ง Extrude เพื่อลดระยะเวลาการเขียนแบบ และได้ผลลัพธ์เดียวกัน จากผลลัพธ์ ทั้งหมดจะปรากฏโดเมนช่องทางการไหลขึ้น

ภาคผนวก ฉ

ผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของอนุภาค (Gravitational force) กับแรงการเคลื่อนที่ของของไหล (Hydrodynamic force)



ภาคผนวกรูปที่ 32 การเปรียบเทียบอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของอนุภาคกับแรงการเคลื่อนที่ของของไหล

$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A$

F_D is the drag force,
 ρ is the density of the fluid,^[11]
 v is the speed of the object relative to the fluid,
 A is the cross sectional area, and
 C_D is the drag coefficient – a dimensionless number.

→ Laminar flow $C_D = \frac{24}{Re}$

Laminar flow → $F_D = \frac{12\mu v_{rel} A_S}{D_H}$

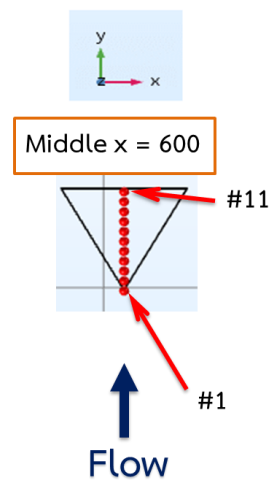
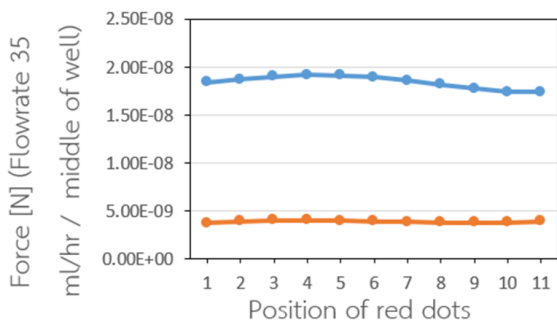
- μ Viscosity of water (Pa.s) 0.001005
- A_S Surface area of beads (m²) $\pi R^2 = 1.77E-08$
- D_H Diameter of beads (m) 1.50E-04
- v Velocity (m/s) = ? (From Comsol)

$\rho = \frac{m}{V}$

ρ_b	Density of beads (kg/m ³)	1.05E+03
V_b	Volume of beads (m ³)	1.77E-12
m_b	Mass of beads (kg)	1.85E-09
W_b	Weight (N)	1.82E-08

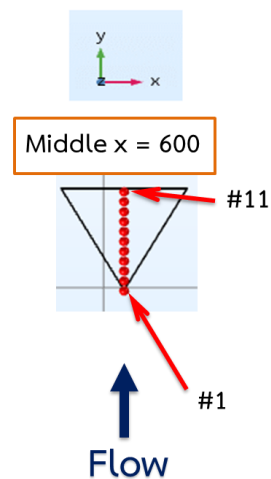
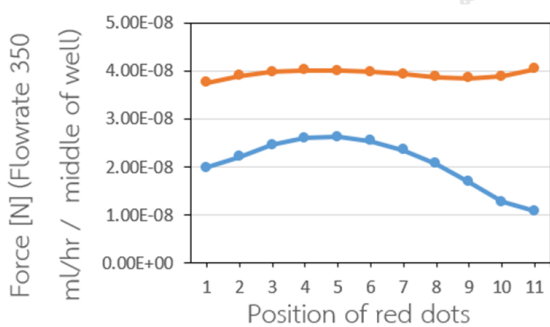
ภาคผนวกรูปที่ 33 สมการและตัวแปรสำหรับการคำนวณแรง

Various flow = 35 ml/hr



ภาคผนวกรูปที่ 34 ผลเปรียบเทียบอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของอนุภาคกับแรงการเคลื่อนที่ของของไหลที่อัตราการไหล 35 ml/hr

Various flow = 350 ml/hr



ภาคผนวกรูปที่ 35 ผลเปรียบเทียบอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของอนุภาคกับแรงการเคลื่อนที่ของของไหลที่อัตราการไหล 350 ml/hr

Flow rate ml/hr		35 ml/hr			
v (m/s)	w (m/s)	$F_{D,z}$	$F_{D,z} + mg$	Gravitational force	Hydrodynamic force
2.66E-03	-1.46E-04	-2.07E-10	-1.84E-08	1.84E-08	3.77E-09
2.77E-03	-3.62E-04	-5.14E-10	-1.87E-08	1.87E-08	3.94E-09
2.83E-03	-5.85E-04	-8.31E-10	-1.90E-08	1.90E-08	4.02E-09
2.85E-03	-6.98E-04	-9.91E-10	-1.92E-08	1.92E-08	4.04E-09
2.83E-03	-6.73E-04	-9.55E-10	-1.91E-08	1.91E-08	4.02E-09
2.79E-03	-5.30E-04	-7.52E-10	-1.89E-08	1.89E-08	3.96E-09
2.75E-03	-2.98E-04	-4.23E-10	-1.86E-08	1.86E-08	3.90E-09
2.70E-03	-6.82E-06	-9.69E-12	-1.82E-08	1.82E-08	3.83E-09
2.67E-03	2.98E-04	4.23E-10	-1.78E-08	1.78E-08	3.80E-09
2.69E-03	5.35E-04	7.59E-10	-1.74E-08	1.74E-08	3.82E-09
2.77E-03	5.37E-04	7.62E-10	-1.74E-08	1.74E-08	3.93E-09

ภาคผนวกตารางที่ 1 ผลการคำนวณแรงโน้มถ่วงของอนุภาค (Gravitational force) กับแรงการเคลื่อนที่ของของไหล (Hydrodynamic force) อัตราการไหล 35 ml/hr

Flow rate ml/hr		350 ml/hr			
v (m/s)	w (m/s)	$F_{D,z}$	$F_{D,z} + mg$	Gravitational force	Hydrodynamic force
2.64E-02	-1.13E-03	-1.60E-09	-1.98E-08	1.98E-08	3.76E-08
2.75E-02	-2.76E-03	-3.92E-09	-2.21E-08	2.21E-08	3.90E-08
2.80E-02	-4.50E-03	-6.39E-09	-2.46E-08	2.46E-08	3.98E-08
2.83E-02	-5.52E-03	-7.84E-09	-2.60E-08	2.60E-08	4.02E-08
2.82E-02	-5.68E-03	-8.06E-09	-2.63E-08	2.63E-08	4.01E-08
2.80E-02	-5.08E-03	-7.21E-09	-2.54E-08	2.54E-08	3.98E-08
2.77E-02	-3.78E-03	-5.37E-09	-2.36E-08	2.36E-08	3.93E-08
2.73E-02	-1.78E-03	-2.52E-09	-2.07E-08	2.07E-08	3.87E-08
2.71E-02	8.95E-04	1.27E-09	-1.69E-08	1.69E-08	3.84E-08
2.73E-02	3.86E-03	5.47E-09	-1.27E-08	1.27E-08	3.88E-08
2.84E-02	5.22E-03	7.42E-09	-1.08E-08	1.08E-08	4.03E-08

ภาคผนวกตารางที่ 2 ผลการคำนวณแรงโน้มถ่วงของอนุภาค (Gravitational force) กับแรงการเคลื่อนที่ของของไหล (Hydrodynamic force) อัตราการไหล 350 ml/hr

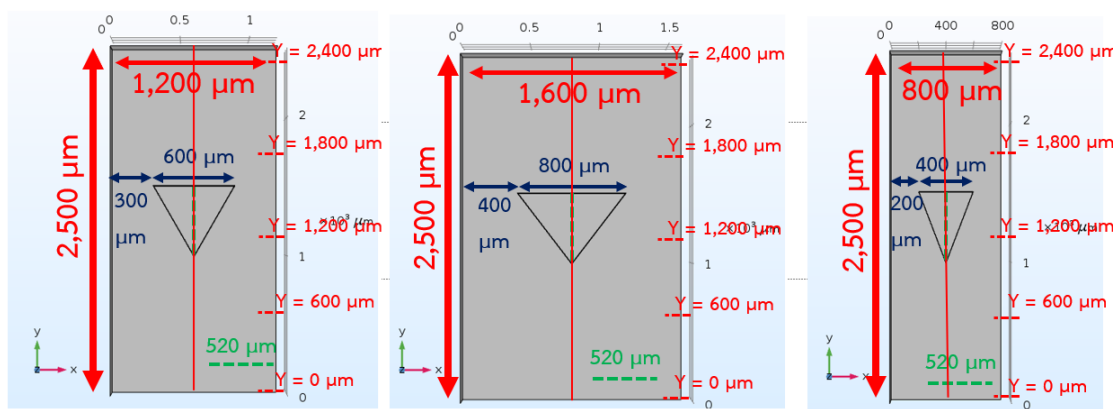
ภาคผนวก ข

ผลการกระจายความเร็วของของไหลภายในช่องการไหล

ผลลัพธ์แสดงการกระจายความเร็วภายในช่องการไหลจากการเก็บข้อมูลจากโมเดลหลุมสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และสามเหลี่ยมมุมป้านในกรณีไม่มีอนุภาคภายในหลุม ณ ตำแหน่งกึ่งกลางหลุม (แกน $X = 600, 400, 800 \mu\text{m}$ ตามลำดับ) โดยชุดข้อมูลกระจายตัวตามแกน Z ทุก $5 \mu\text{m}$ ตั้งแต่พื้นถึงเพดานช่องการไหลและกระจายตัวตามแกน Y ทุก $600 \mu\text{m}$ ตั้งแต่ฝั่งทางเข้าถึงทางออกช่องการไหล (แกน $Y = 0$ และ $2500 \mu\text{m}$ ตามลำดับ) ดังภาคผนวกรูปที่ 36 เพื่อศึกษาการกระจายความเร็วหลังจากของไหลเคลื่อนที่ผ่านหลุมว่ามีความแตกต่างหรือไม่ อันอาจส่งผลต่อกลไกภายในหลุมที่แตกต่างกันในกรณีหลุมอื่นๆหลังจากนั้น

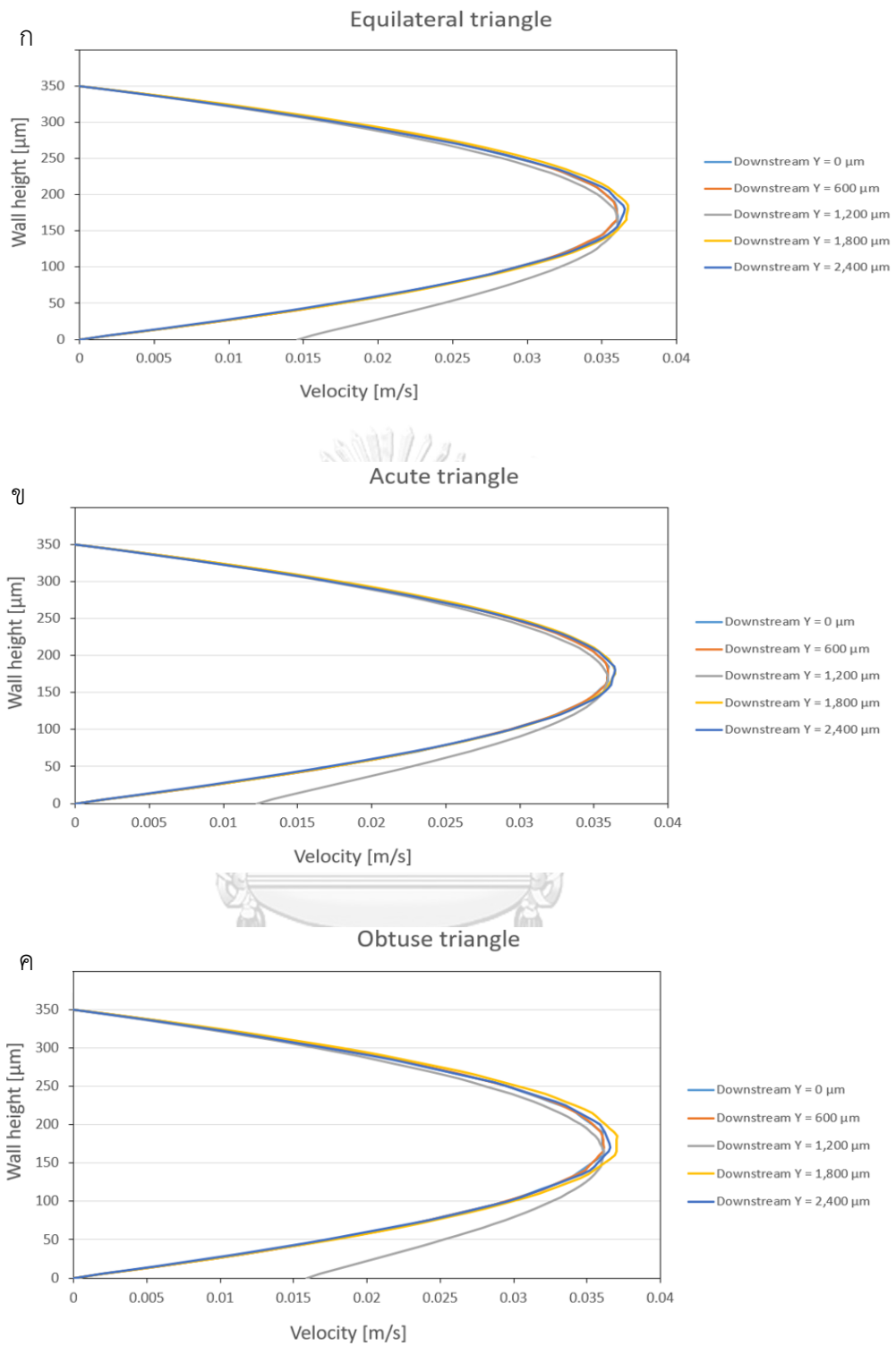
จากภาคผนวกรูปที่ 37 พบว่าผลการกระจายความเร็วของของไหลภายในช่องการไหลของสามเหลี่ยมทั้งสามรูปแบบมีลักษณะใกล้เคียงกัน มีความเร็วของของไหลตำแหน่งพื้นช่องการไหลเท่ากับศูนย์ก่อนจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อระยะความสูงช่องการไหลสูงขึ้น จนมีความเร็วสูงสุดบริเวณความสูงประมาณ $175 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งความสูง ณ กึ่งกลางช่องการไหลจากนั้นความเร็วค่อยๆลดลงเมื่อระยะความสูงช่องการไหลเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีขนาดเท่ากับศูนย์ ณ เพดานช่องการไหล

ทั้งนี้ช่วงข้อมูลการกระจายตัวตามแนวแกน Y ที่ 0 และ $600 \mu\text{m}$ เป็นระยะที่ของไหลก่อนถึงหลุมส่งผลให้มีการกระจายตัวความเร็วจะไม่เปลี่ยนแปลงกับระยะทางตามแนวการไหลหรือแนวแกน Y (Fully developed flow) กราฟจึงทับกันทุกจุดข้อมูล ซึ่งใกล้เคียงกับช่วงข้อมูลการกระจายตัวตามแนวแกน Y ที่ $1,800$ และ $2,400 \mu\text{m}$ แต่มีความแตกต่างกันเล็กน้อยตำแหน่งความสูง ณ กึ่งกลางช่องการไหลซึ่งอาจเกิดจากหลายปัจจัยเช่นการกำหนดความหนาแน่นของกริด ณ บริเวณนั้นและรูปแบบการไหลหลังจากของไหลไหลผ่านหลุมไปแล้ว รูปแบบการไหลที่ส่งผลต่อกลไกภายในหลุมสามเหลี่ยมอาจเลือกพิจารณาในช่วงความสูงช่องการไหลประมาณ $0 - 150 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นระดับความสูงใกล้ตำแหน่งปากหลุม จากผลลัพธ์พบว่าทุกชุดข้อมูลมีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านหลุมใดๆอาจไม่ส่งผลต่อกลไกการไหลที่เกิดขึ้นภายในหลุมอื่นๆหลังจากนั้น ในขณะที่ช่วงข้อมูลการกระจายตัวตามแนวแกน Y ที่ $1,200 \mu\text{m}$ แสดงการกระจายตัวความเร็วที่แตกต่างออกไป โดย ณ ตำแหน่งพื้นช่องการไหลมีความเร็วไม่เท่ากับศูนย์เนื่องจากเป็นตำแหน่งบริเวณหลุมสามเหลี่ยม



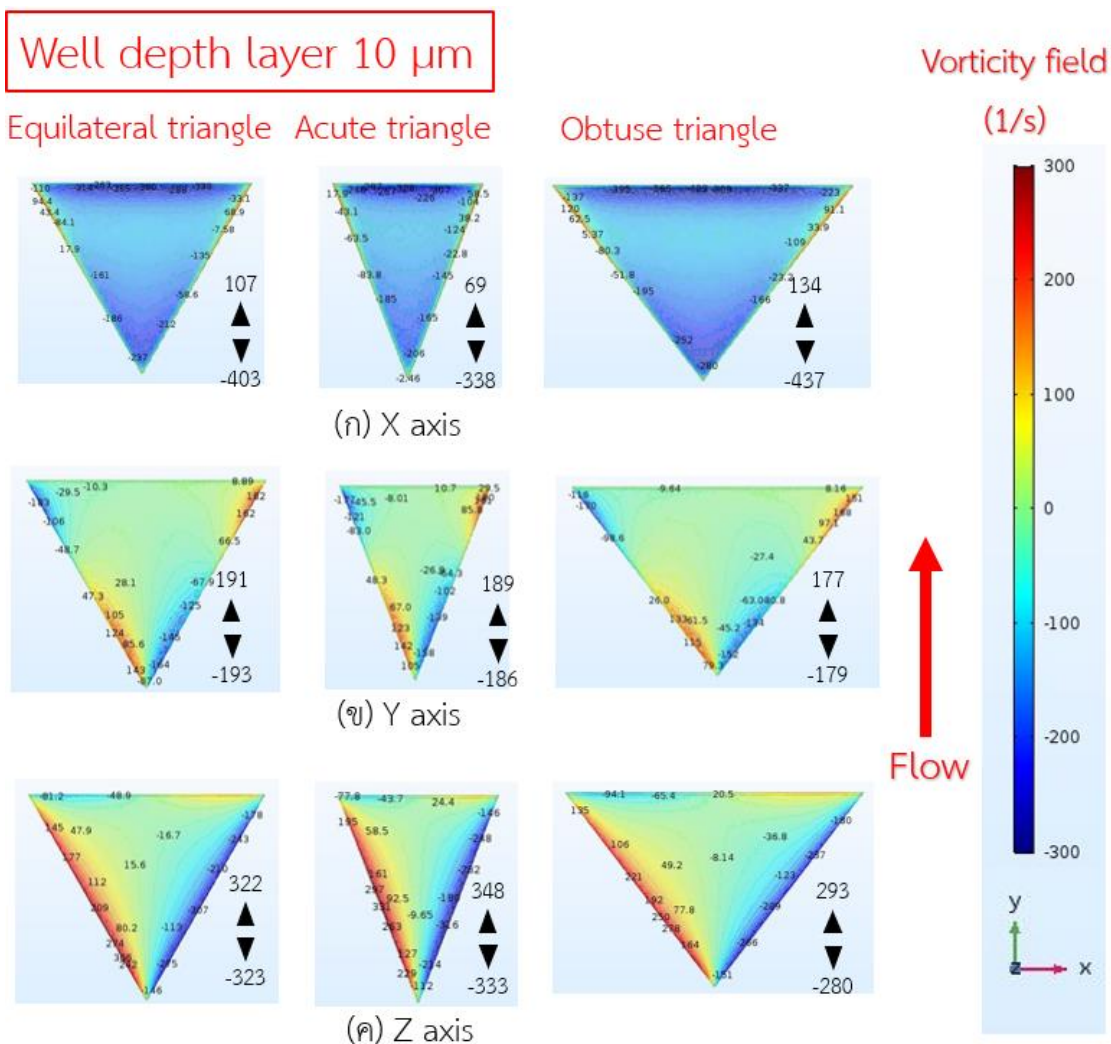
ภาคผนวกรูปที่ 36 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลการกระจายความเร็วของของไหลภายในโดเมน





ภาคผนวกรูปที่ 37 ผลการกระจายความเร็วของของไหลภายในช่องการไหลสำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

ภาคผนวก ข
 ผลการกระจายตัวการหมุนและความเร็วภายในหลุม



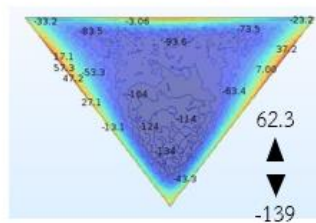
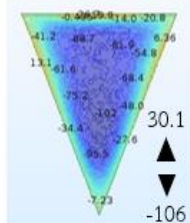
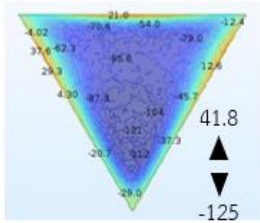
ภาคผนวกรูปที่ 38 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 10 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

Well depth layer 50 μm

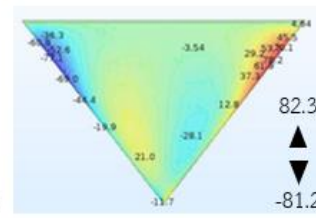
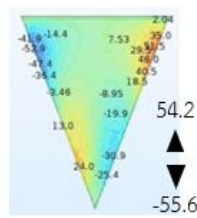
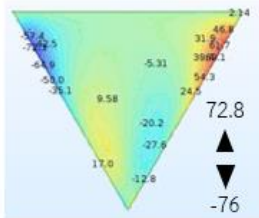
Equilateral triangle Acute triangle

Obtuse triangle

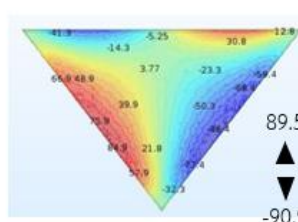
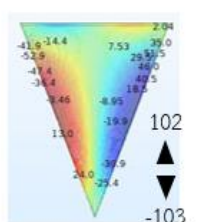
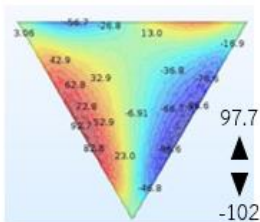
Vorticity field (1/s)



(ก) X axis



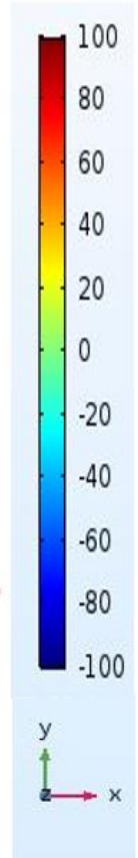
(ข) Y axis



(ค) Z axis



Flow



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

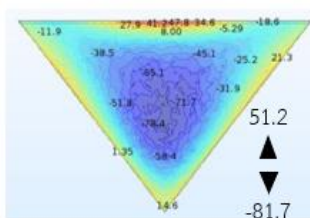
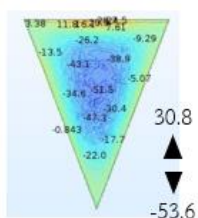
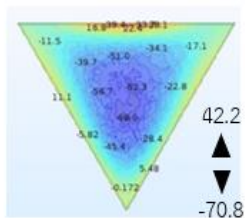
ภาคผนวกรูปที่ 39 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 50 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

Well depth layer 100 μm

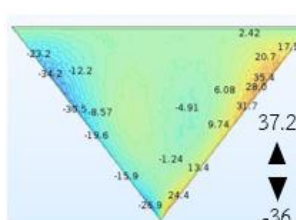
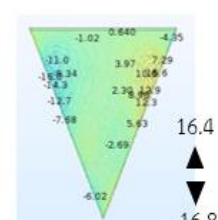
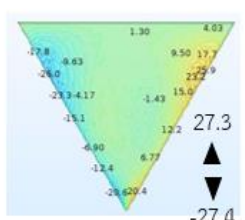
Equilateral triangle Acute triangle

Obtuse triangle

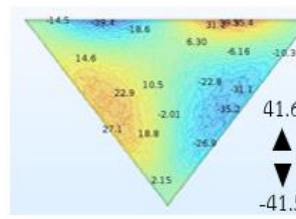
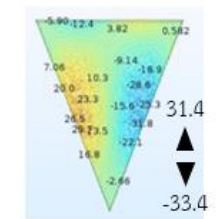
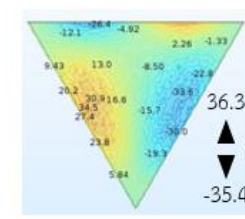
Vorticity field (1/s)



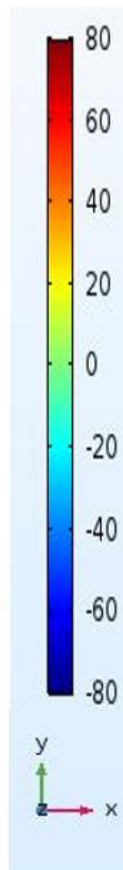
(ก) X axis



(ข) Y axis



(ค) Z axis



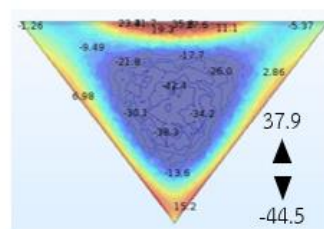
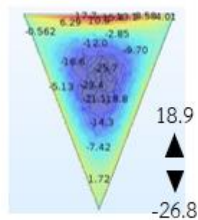
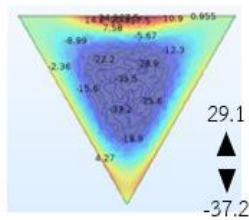
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวกรูปที่ 40 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 100 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

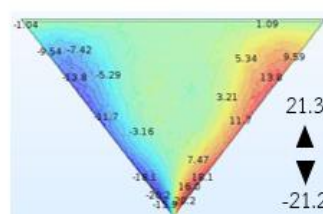
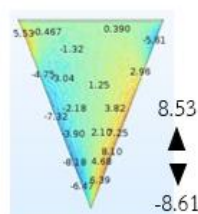
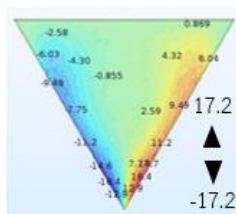
Well depth layer 150 μm

Equilateral triangle Acute triangle Obtuse triangle

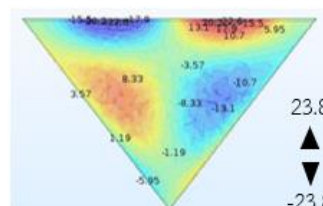
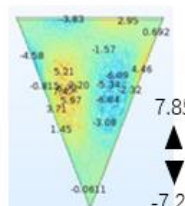
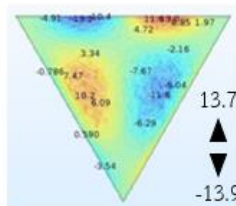
Vorticity field (1/s)



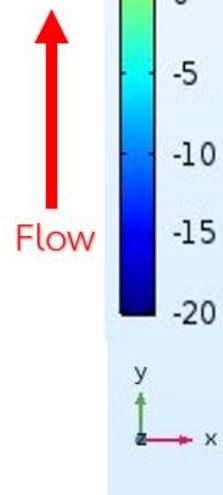
(ก) X axis



(ข) Y axis



(ค) Z axis



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

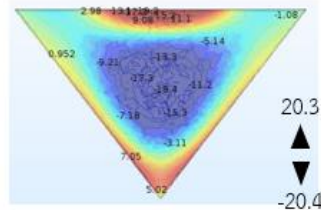
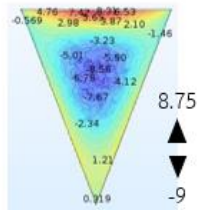
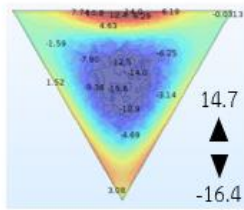
ภาคผนวกรูปที่ 41 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 150 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

Well depth layer 200 μm

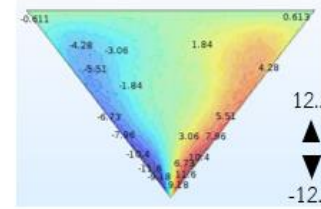
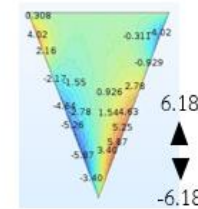
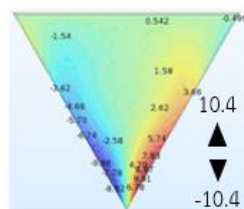
Equilateral triangle Acute triangle

Obtuse triangle

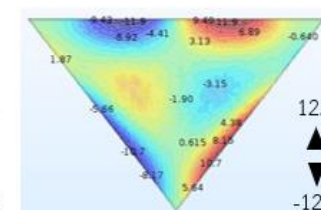
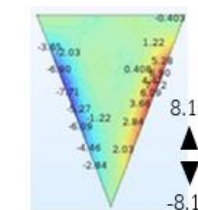
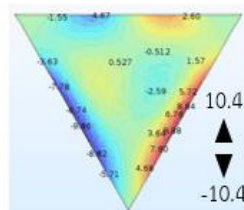
Vorticity field (1/s)



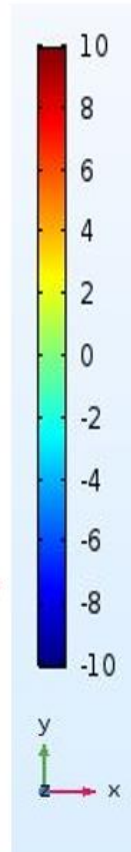
(ก) X axis



(ข) Y axis

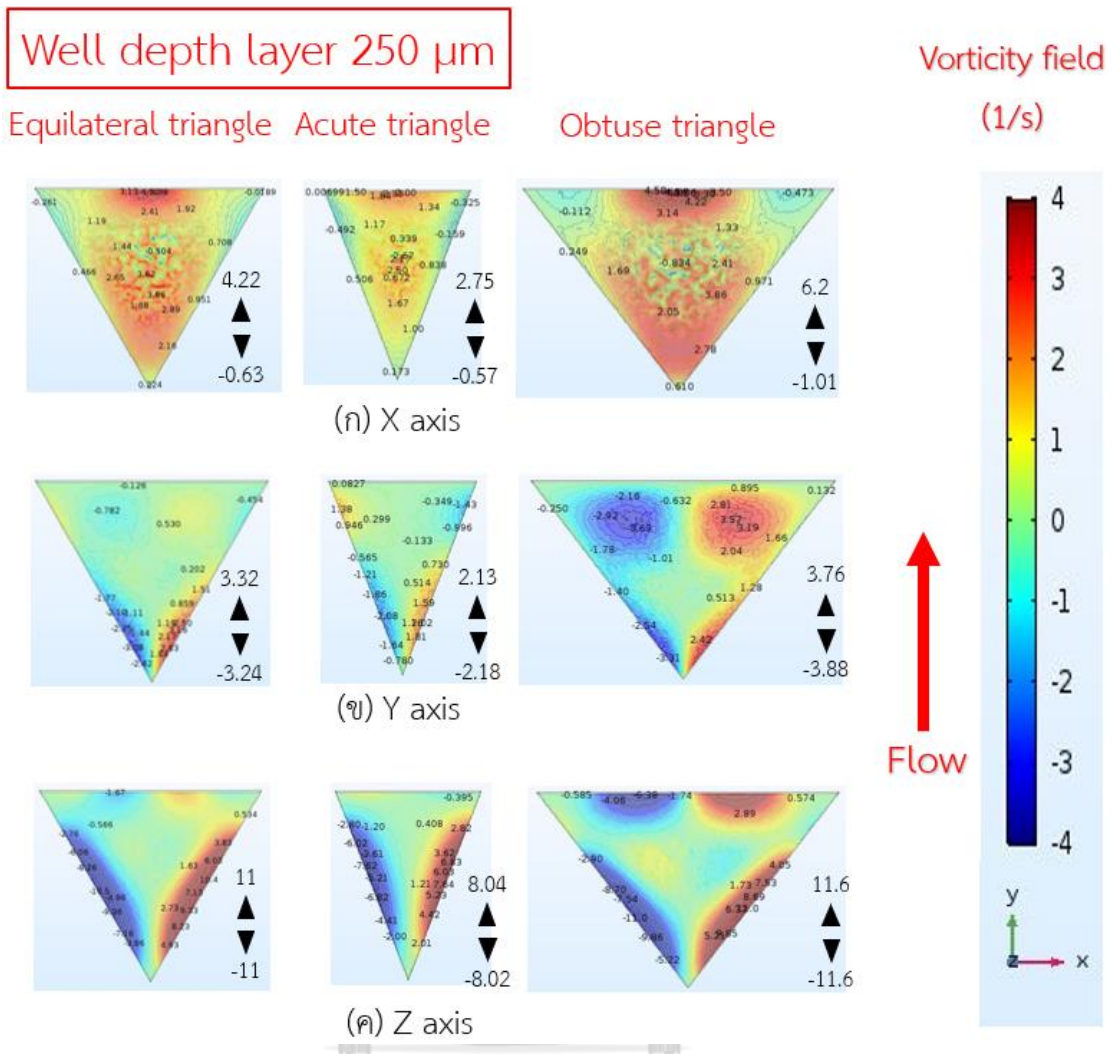


(ค) Z axis



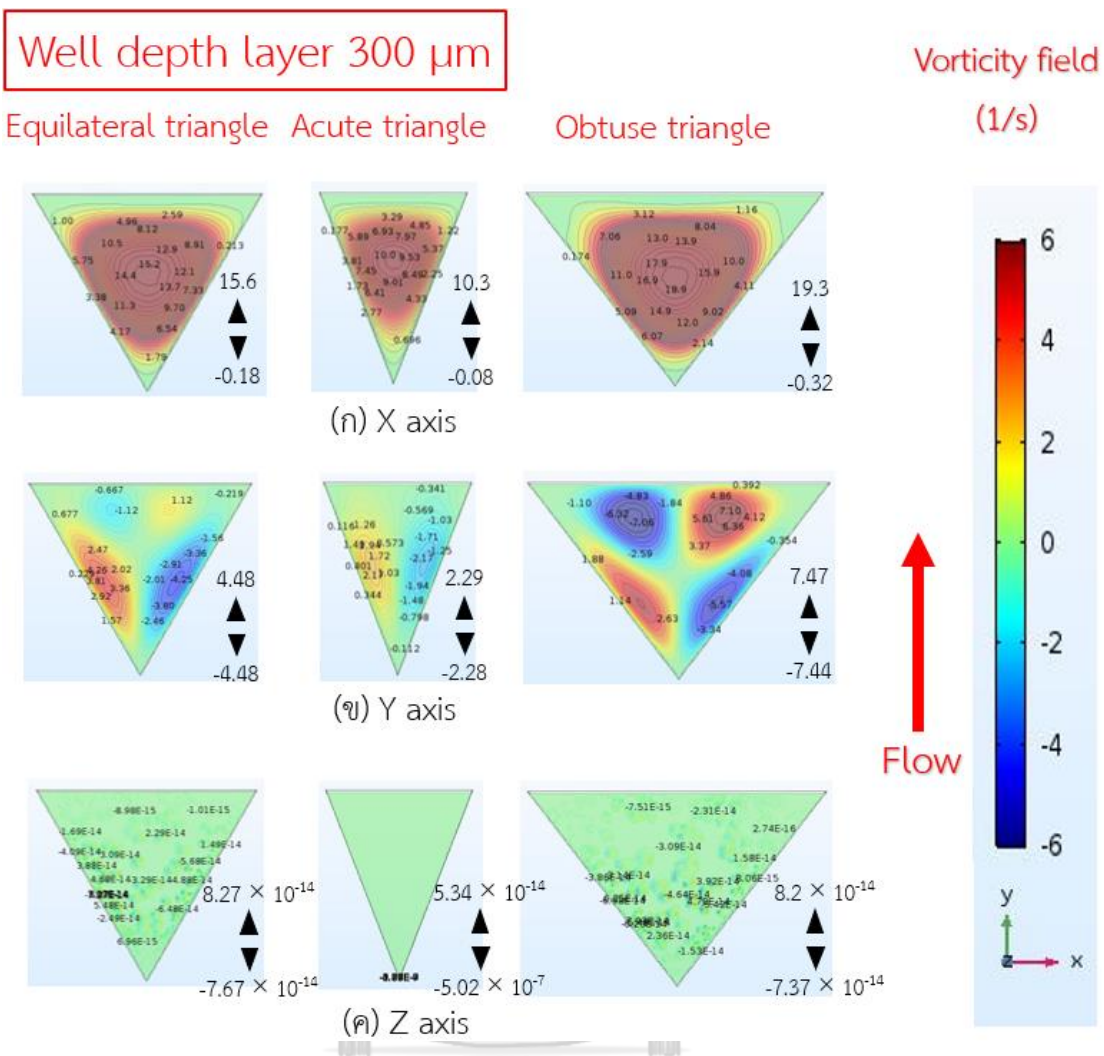
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวกรูปที่ 42 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 200 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



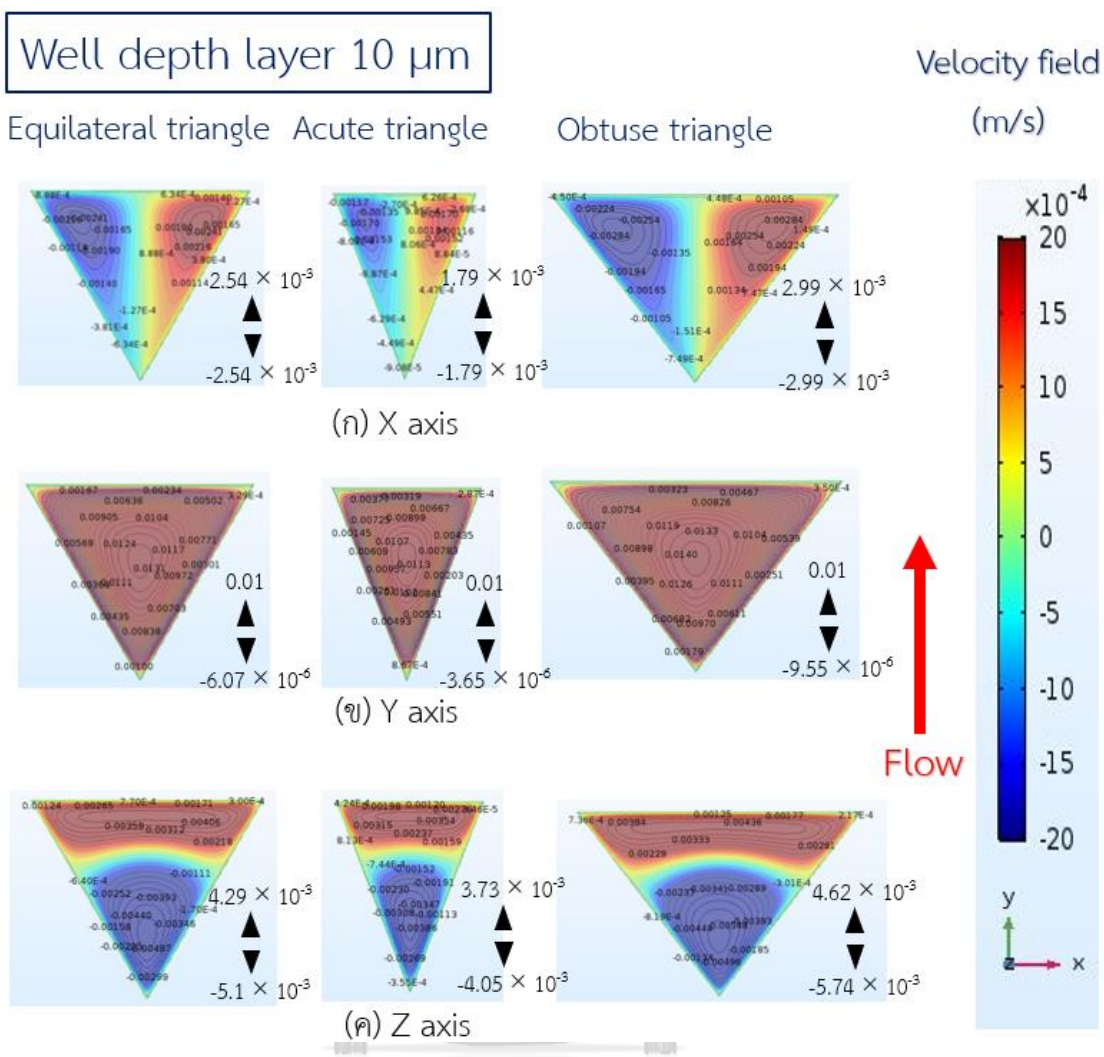
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวกรูปที่ 43 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 250 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



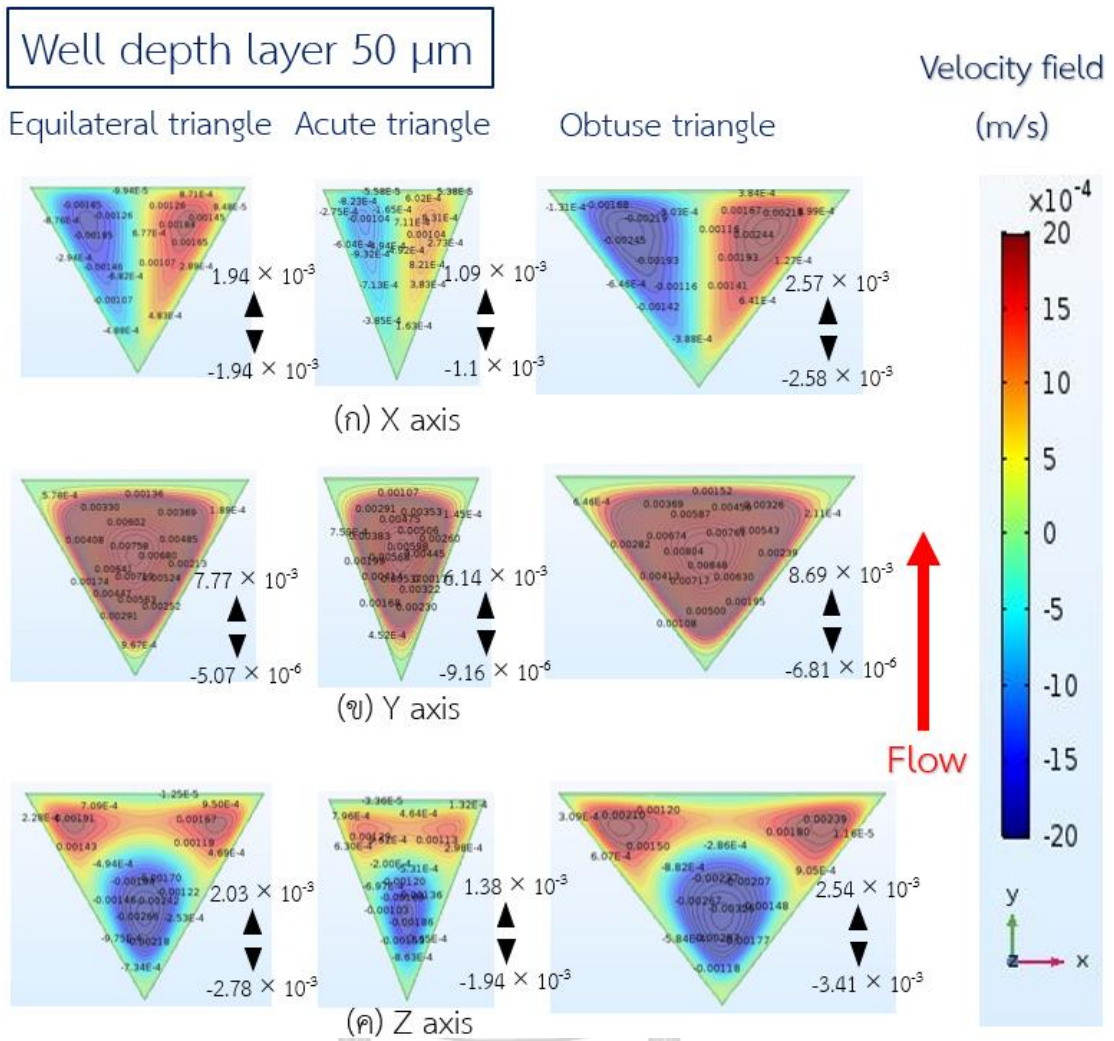
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวกรูปที่ 44 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 300 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



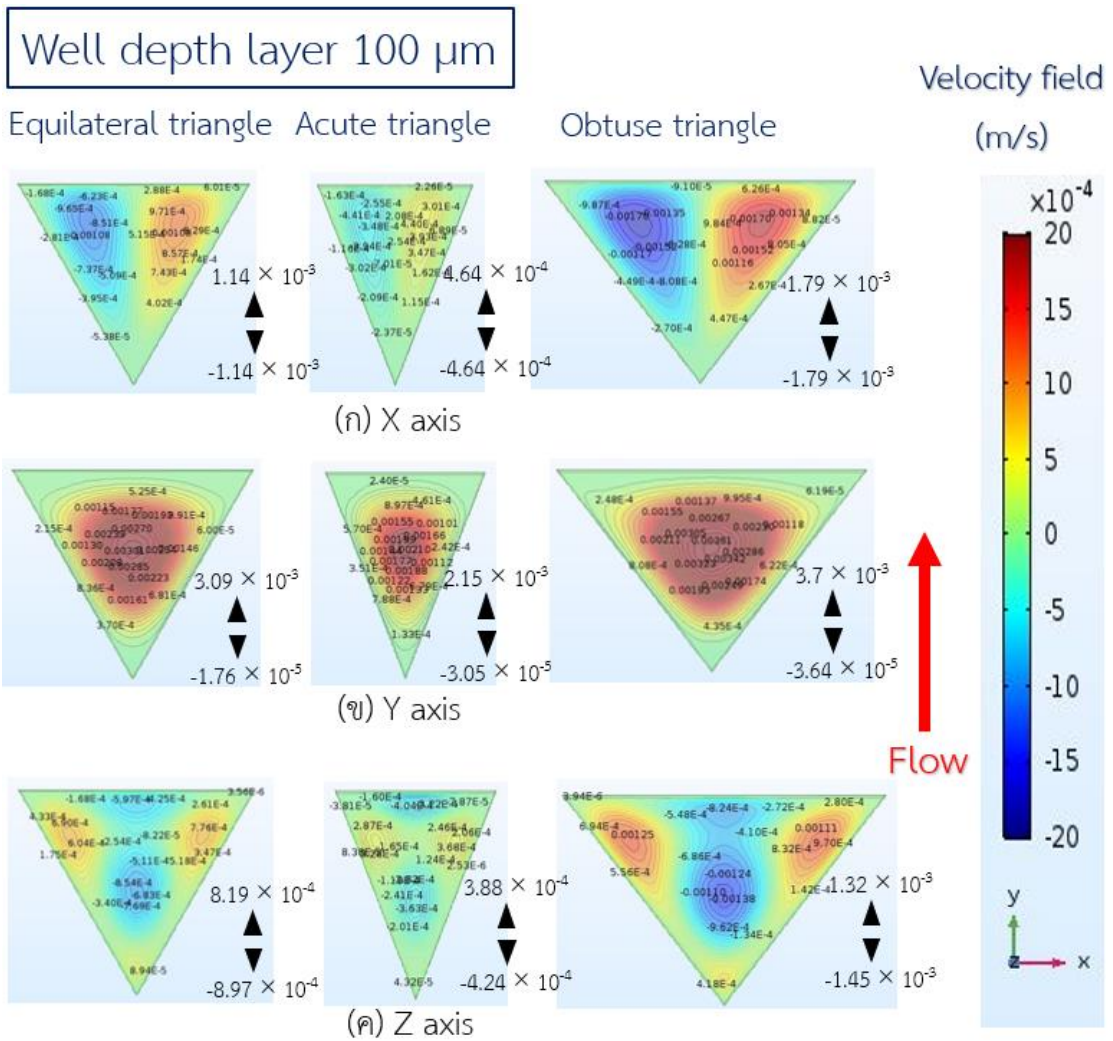
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวกรูปที่ 45 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก $10\ \mu\text{m}$ ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



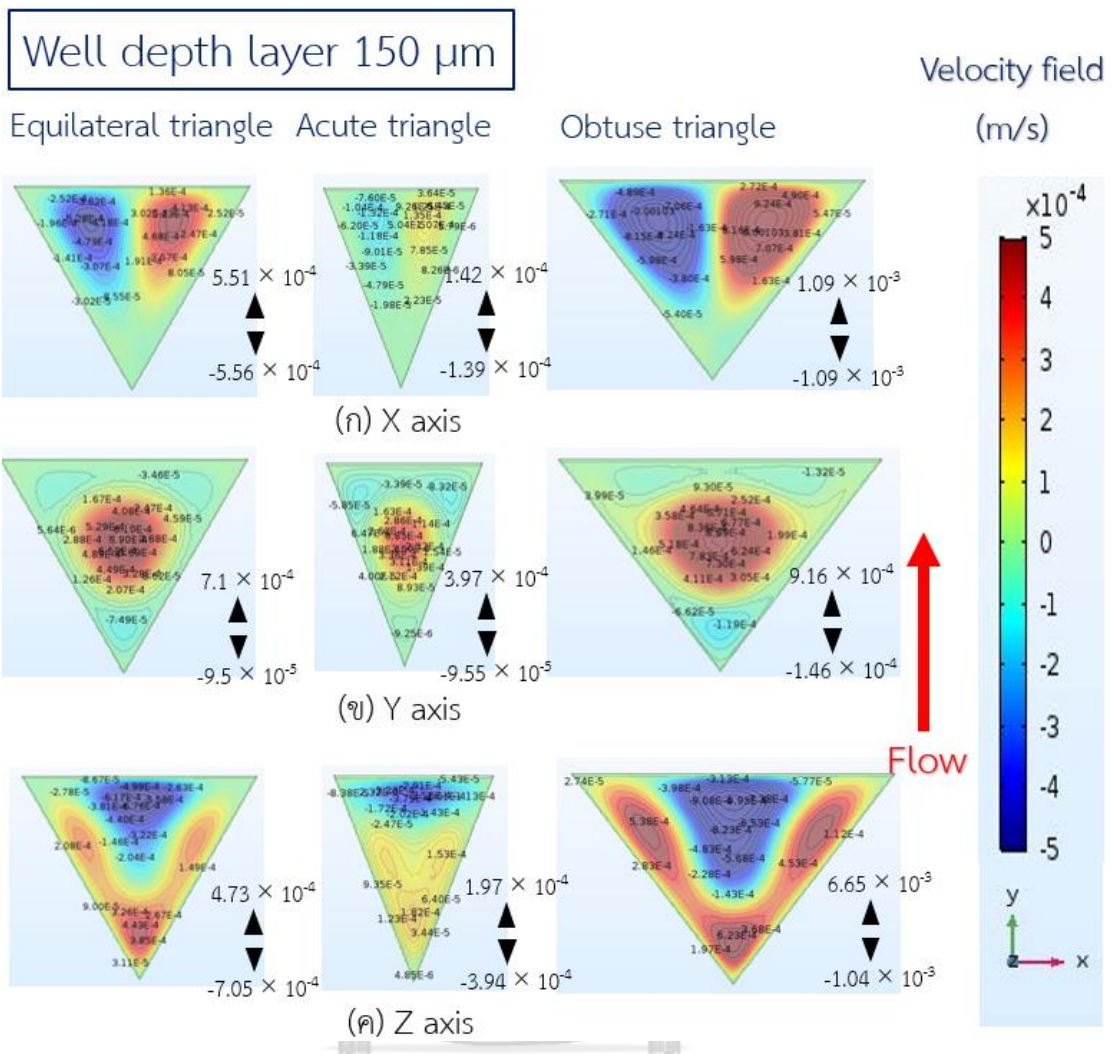
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวกรูปที่ 46 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 50 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



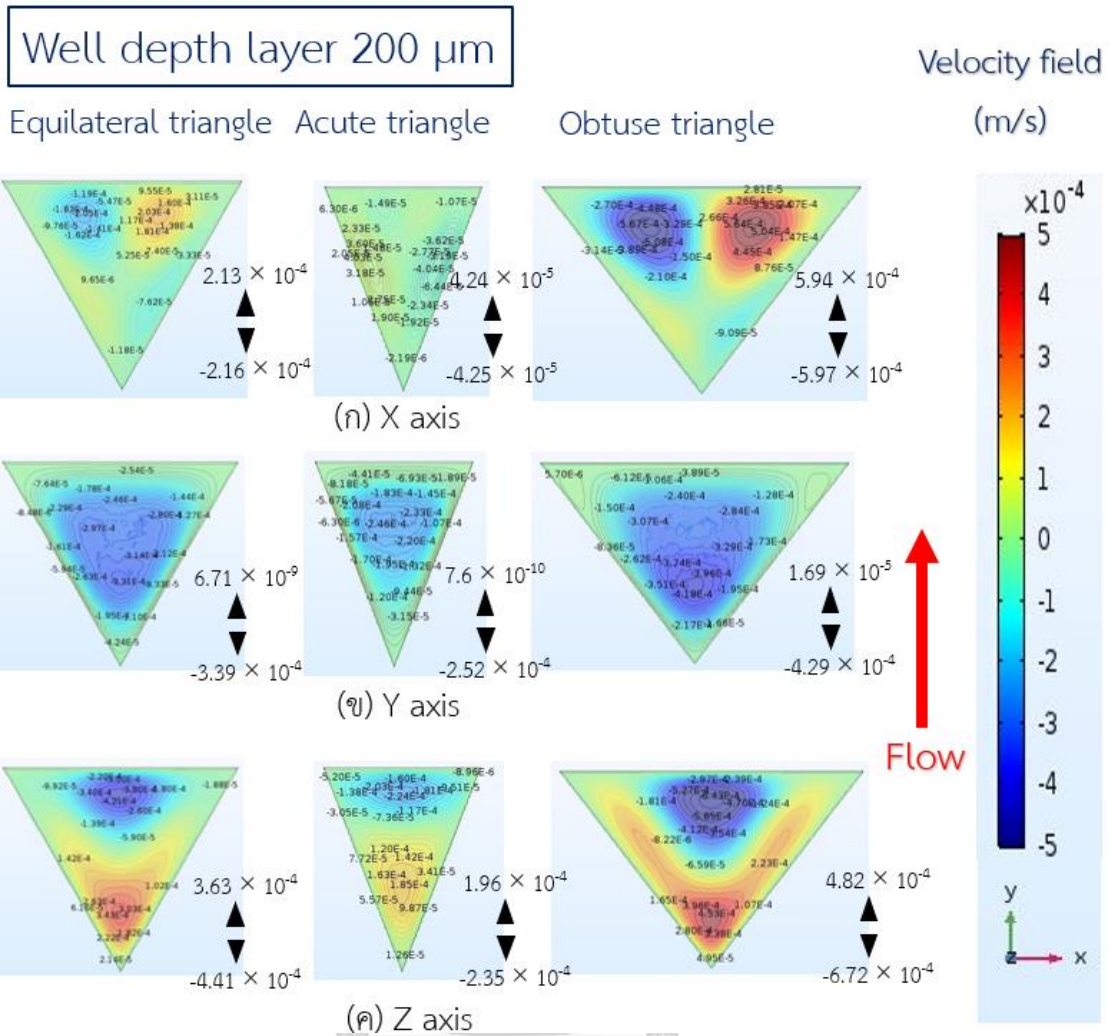
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวกรูปที่ 47 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 100 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



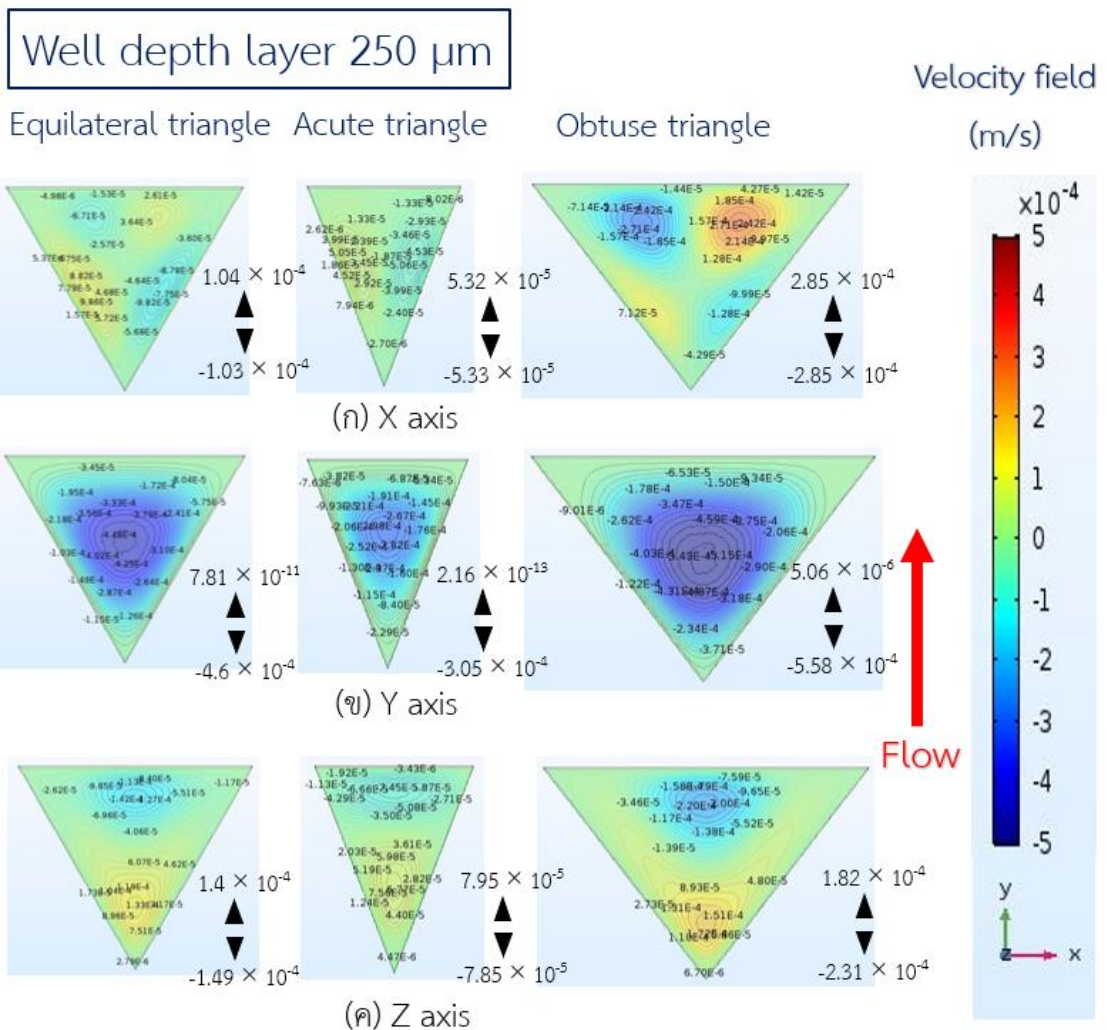
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวกรูปที่ 48 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 150 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวกรูปที่ 49 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 200 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



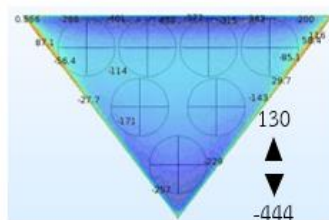
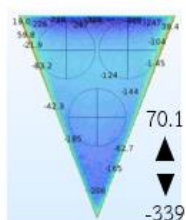
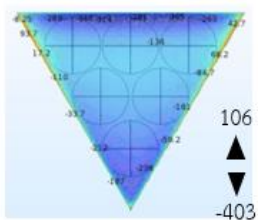
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวกรูปที่ 50 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 250 μm ไม่มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

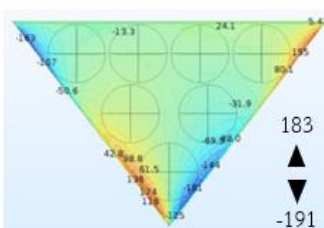
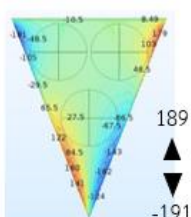
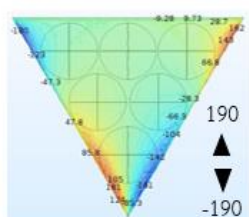
Well depth layer 10 μm

Equilateral triangle Acute triangle Obtuse triangle

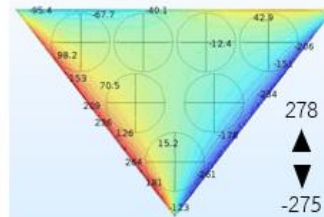
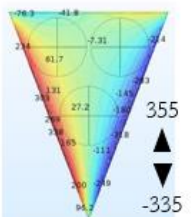
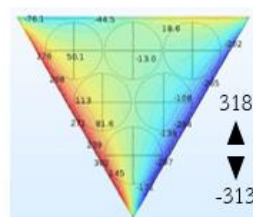
Vorticity field (1/s)



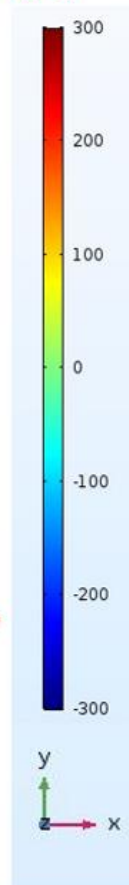
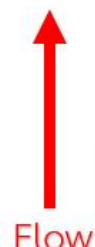
(ก) X axis



(ข) Y axis

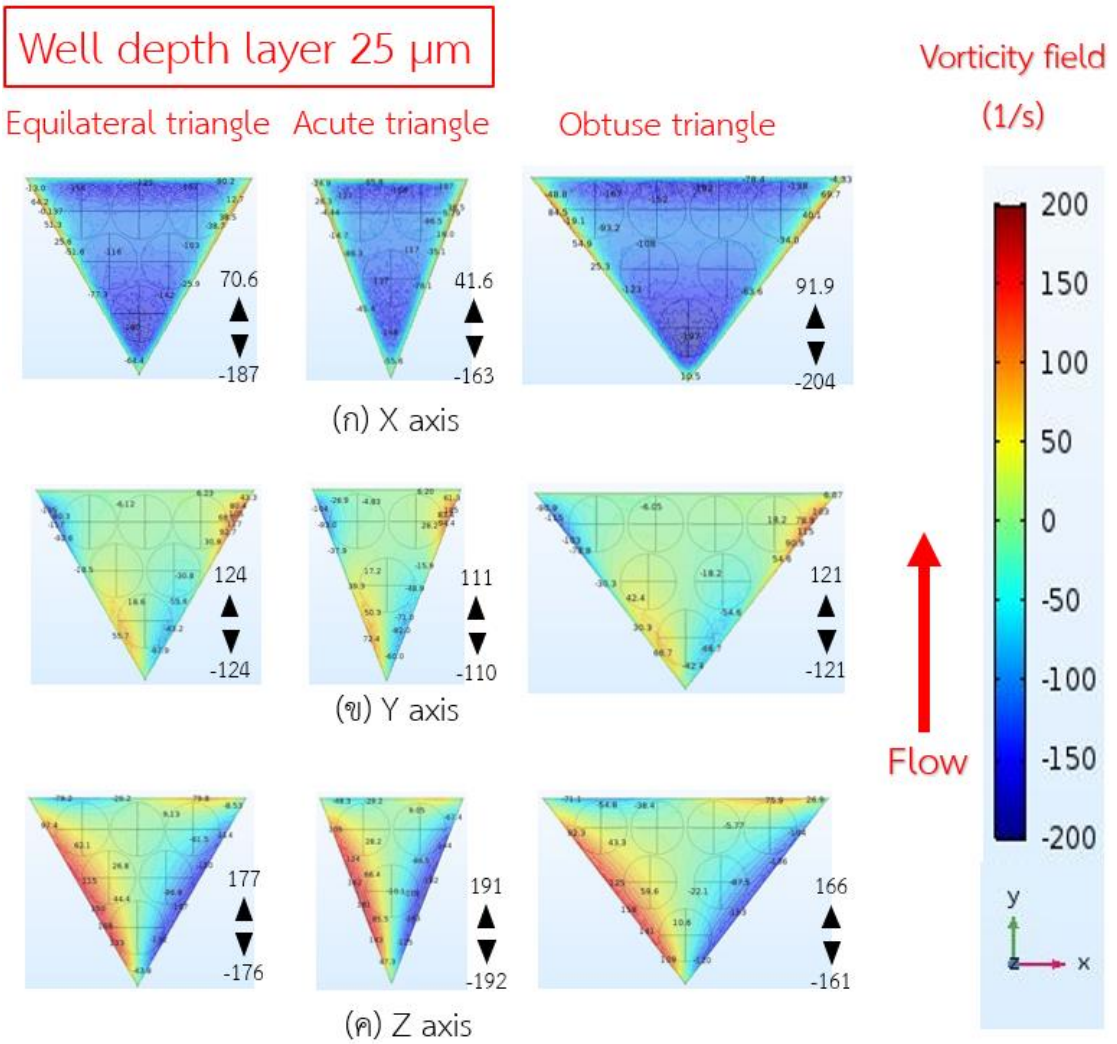


(ค) Z axis



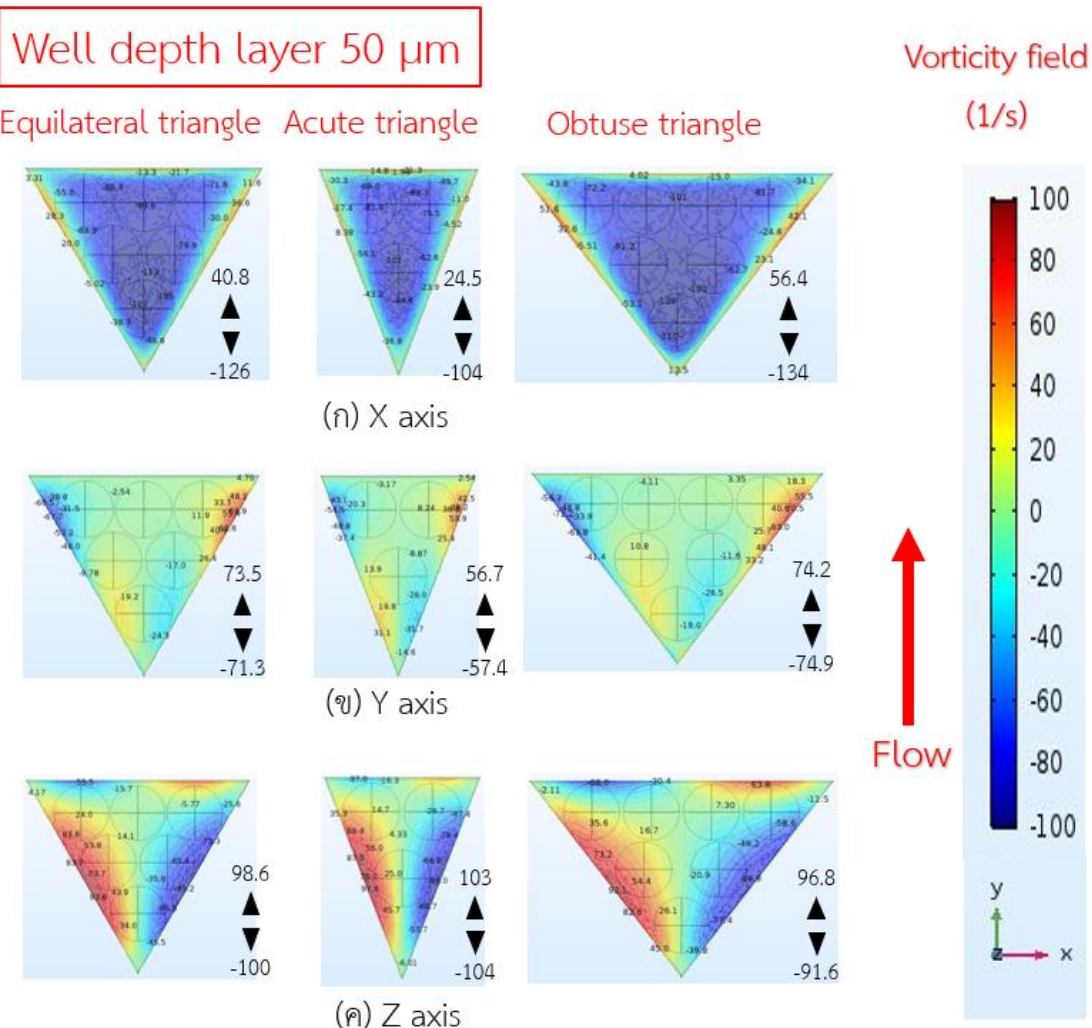
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวกรูปที่ 51 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 10 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวกรูปที่ 52 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 25 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



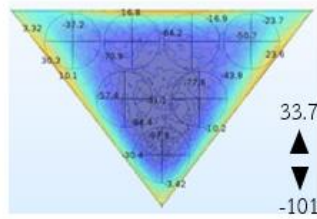
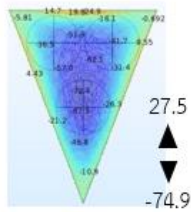
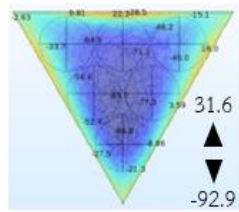
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวกรูปที่ 53 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 50 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

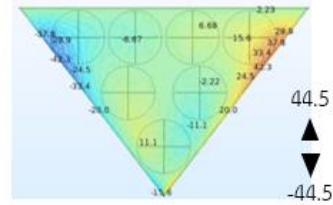
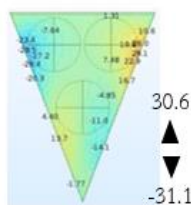
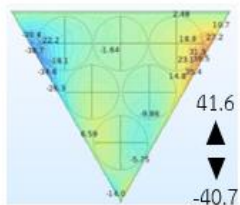
Well depth layer 75 μm

Equilateral triangle Acute triangle Obtuse triangle

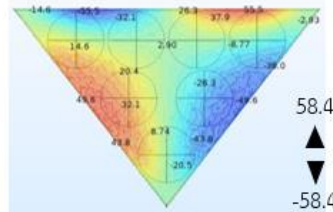
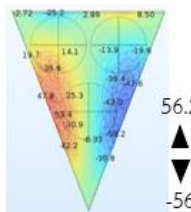
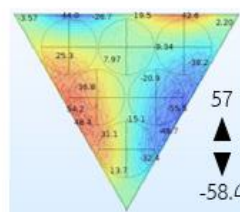
Vorticity field (1/s)



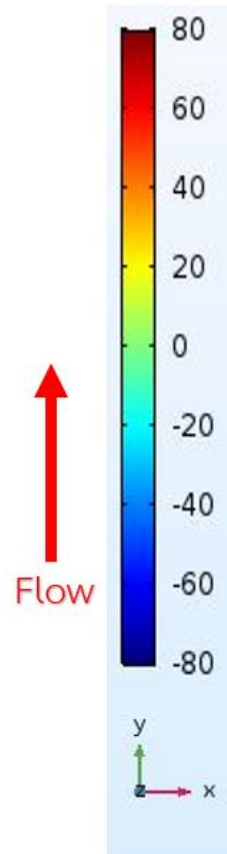
(ก) X axis



(ข) Y axis



(ค) Z axis



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

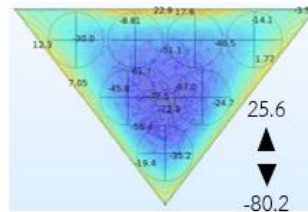
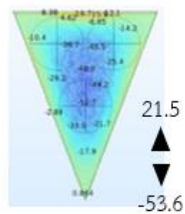
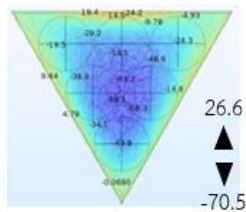
ภาคผนวกรูปที่ 54 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 75 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

Well depth layer 100 μm

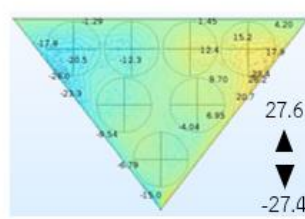
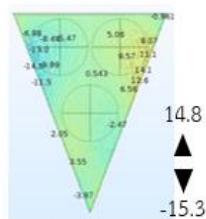
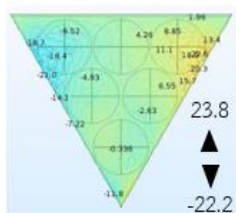
Equilateral triangle Acute triangle

Obtuse triangle

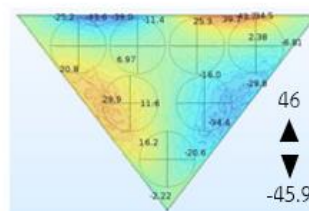
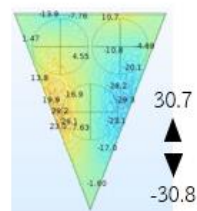
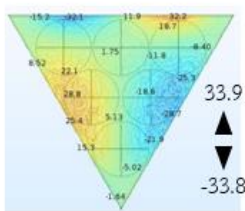
Vorticity field
(1/s)



(ก) X axis



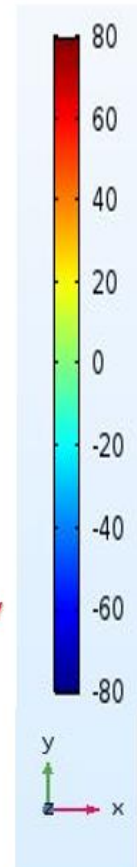
(ข) Y axis



(ค) Z axis

↑

Flow



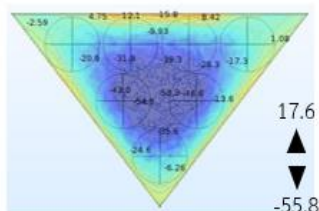
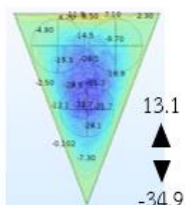
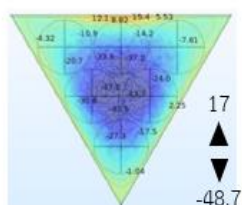
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวกรูปที่ 55 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 100 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

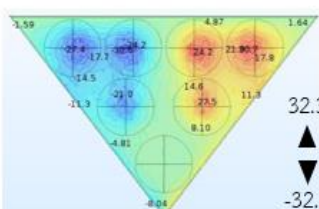
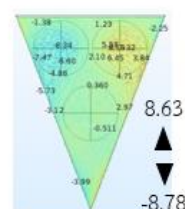
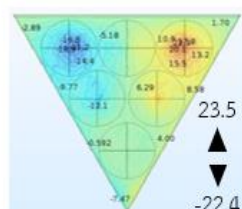
Well depth layer 125 μm

Equilateral triangle Acute triangle Obtuse triangle

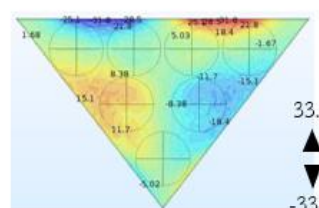
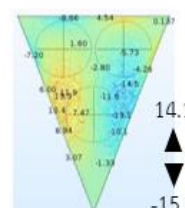
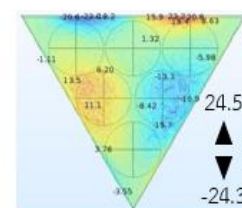
Vorticity field
(1/s)



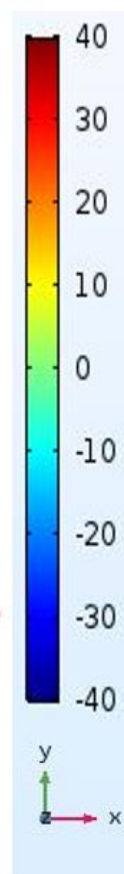
(ก) X axis



(ข) Y axis

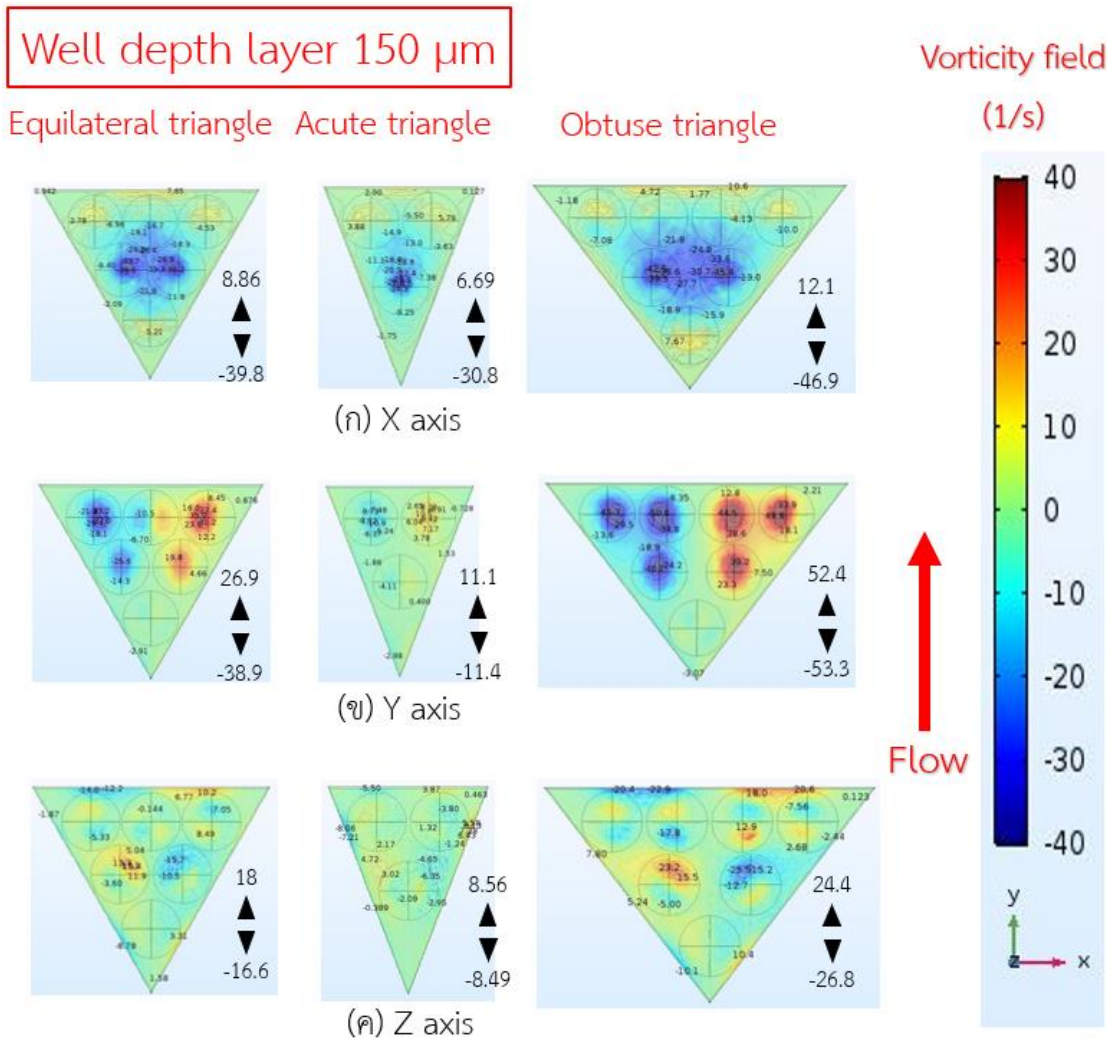


(ค) Z axis



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวกรูปที่ 56 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 125 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

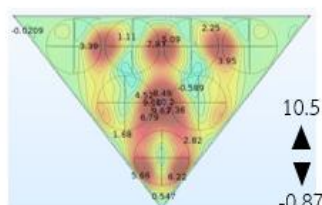
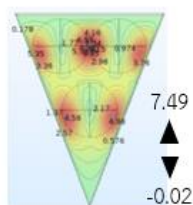
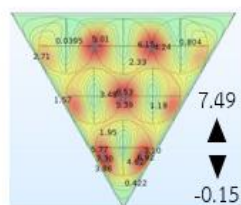
ภาคผนวกรูปที่ 57 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 150 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

Well depth layer 300 μm

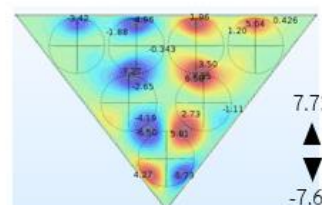
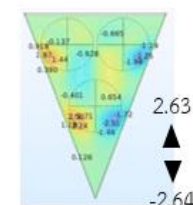
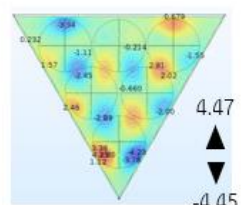
Equilateral triangle Acute triangle

Obtuse triangle

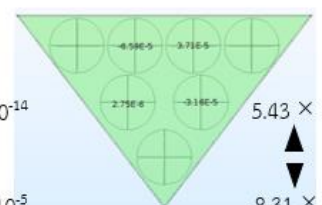
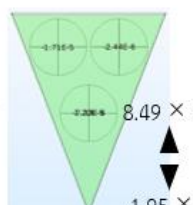
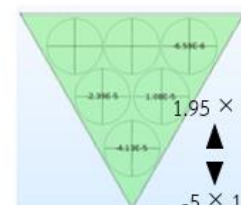
Vorticity field
(1/s)



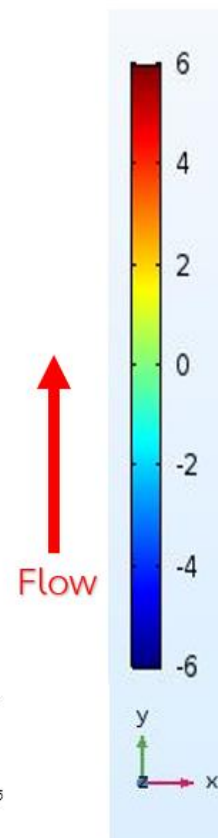
(ก) X axis



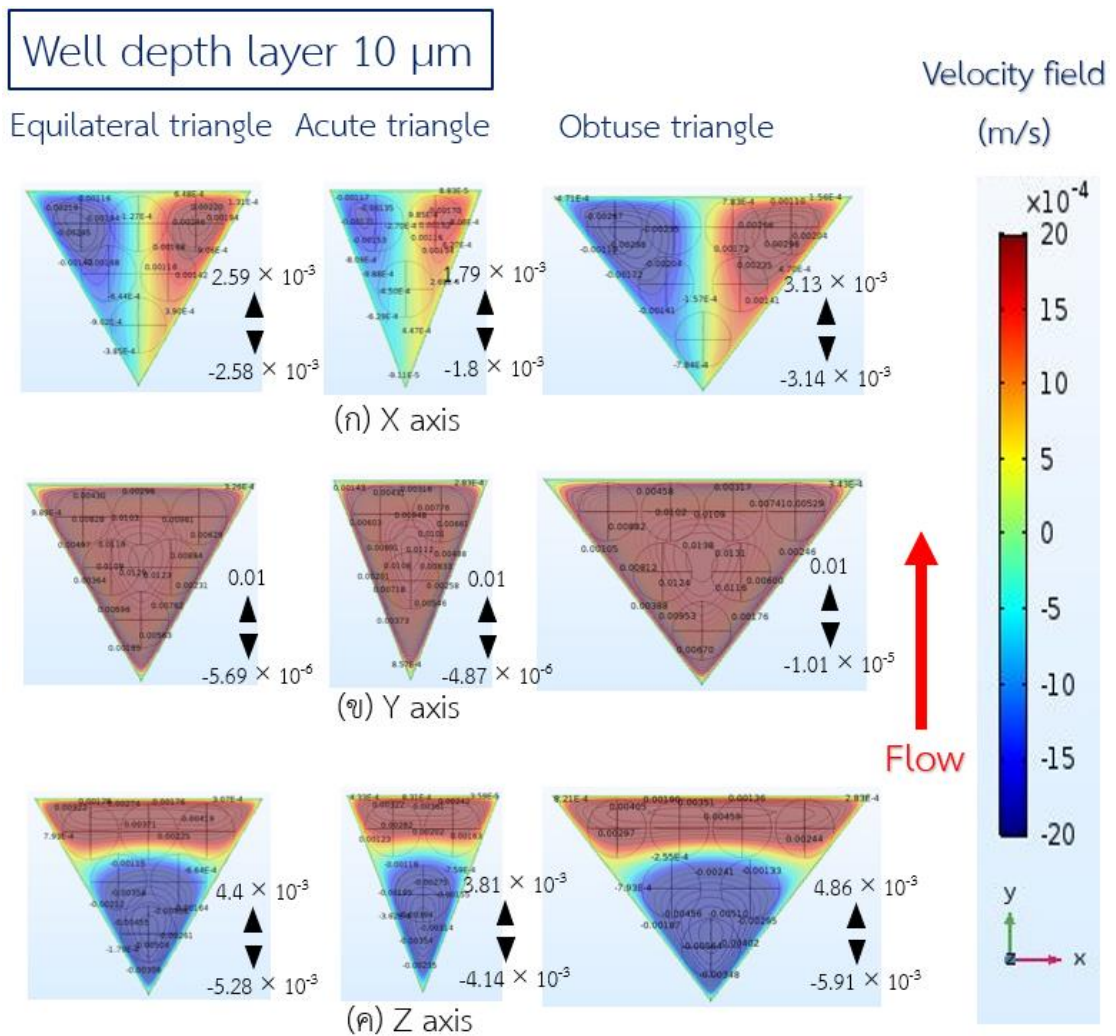
(ข) Y axis



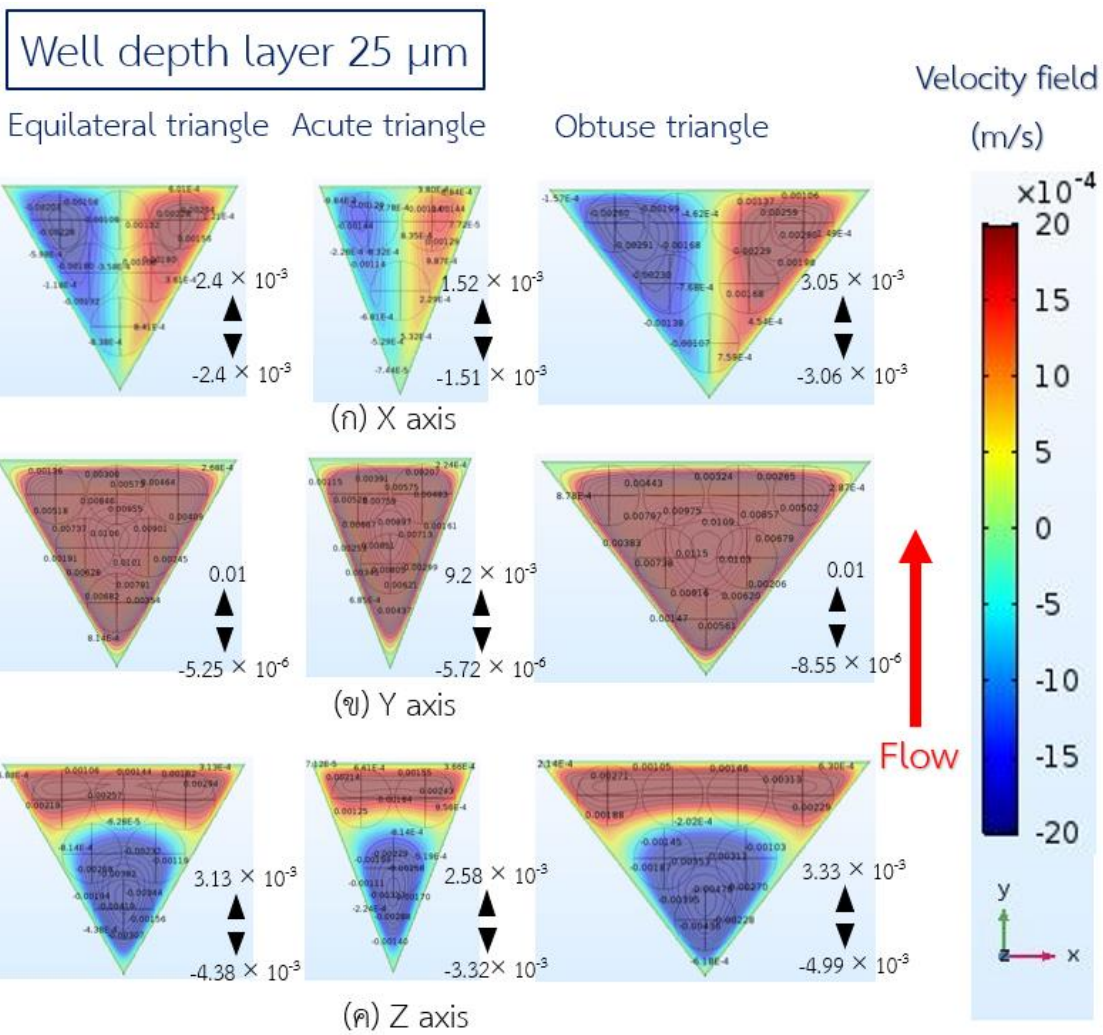
(ค) Z axis



ภาคผนวกรูปที่ 58 การกระจายตัวการหมุน (s^{-1}) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 300 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

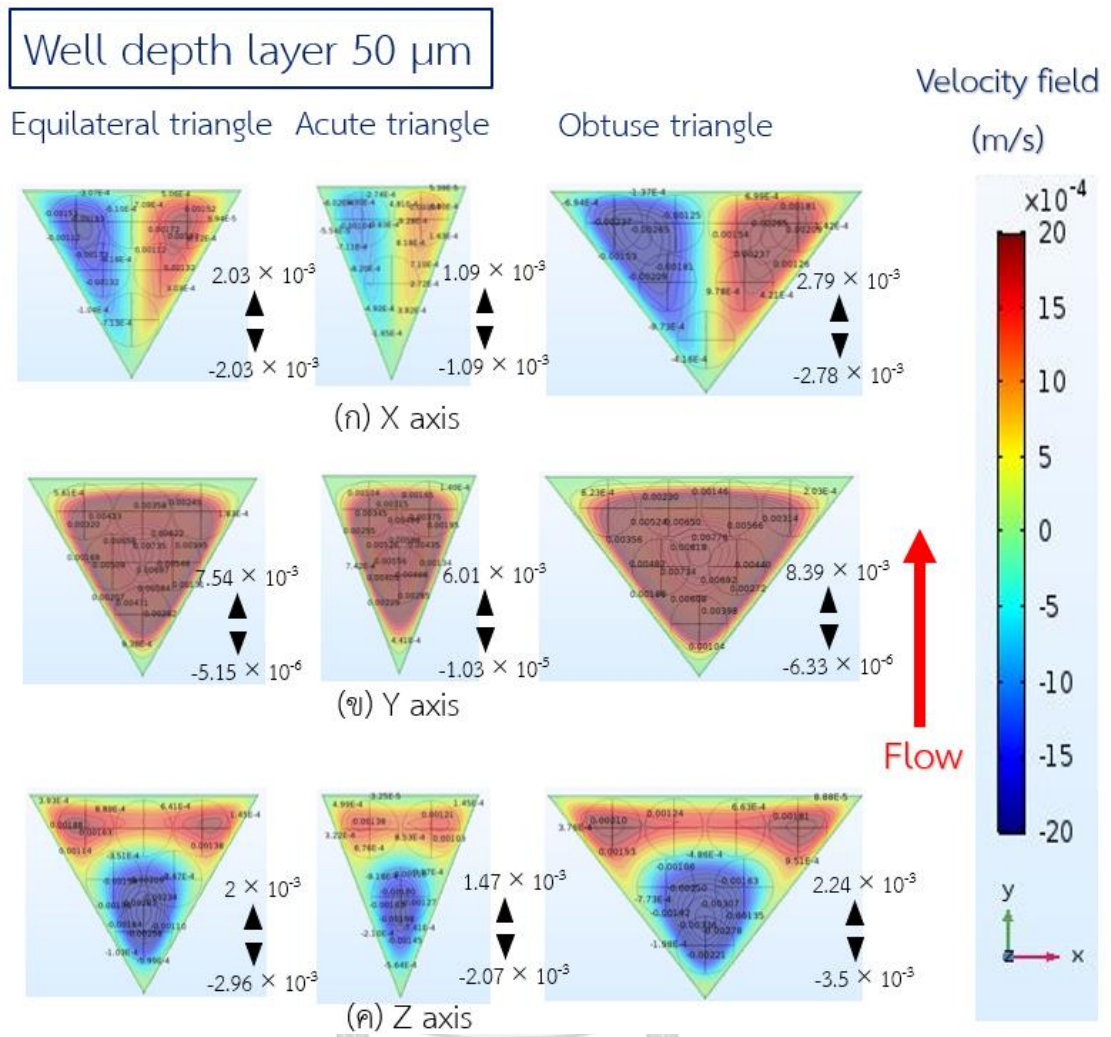


ภาพผนวกรูปที่ 59 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 10 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

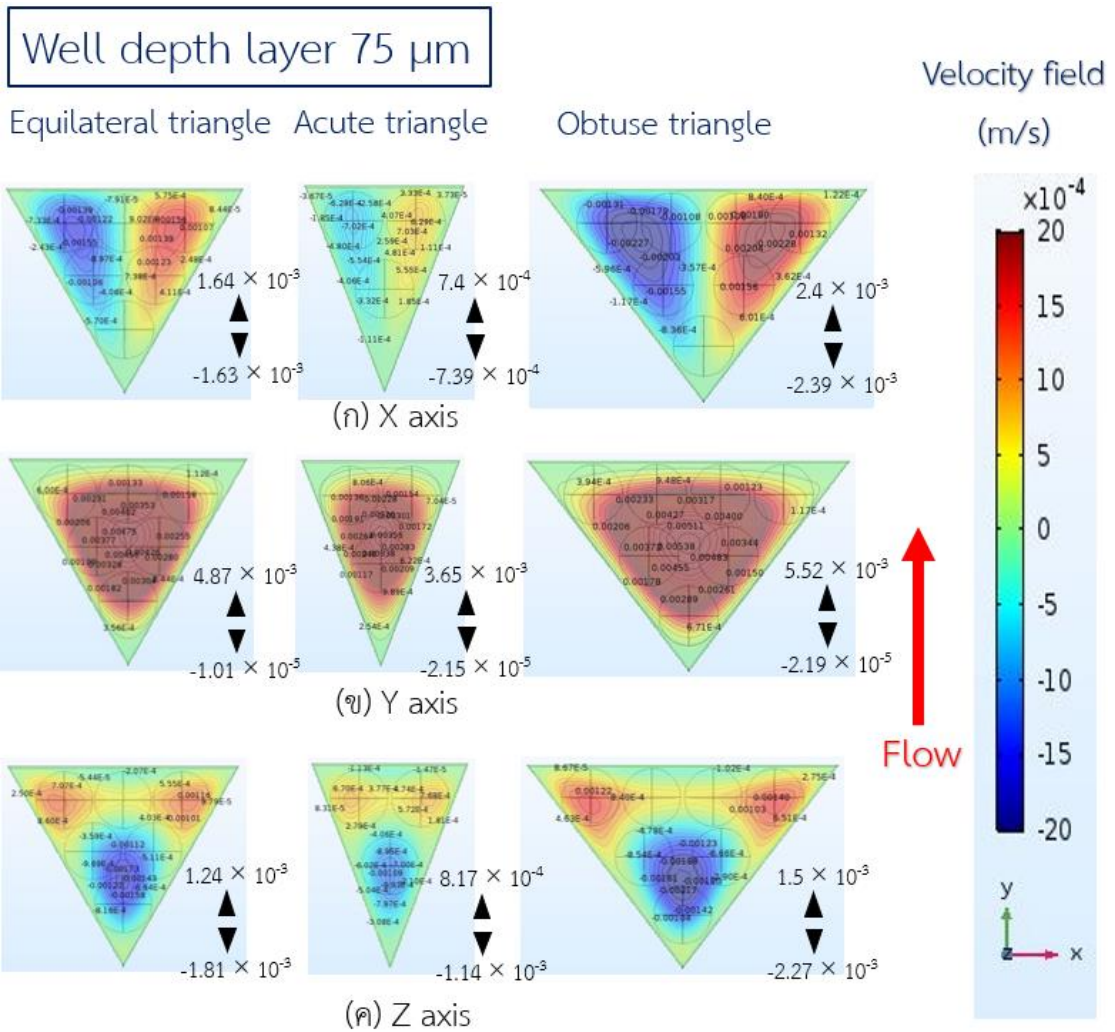


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวกรูปที่ 60 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 25 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

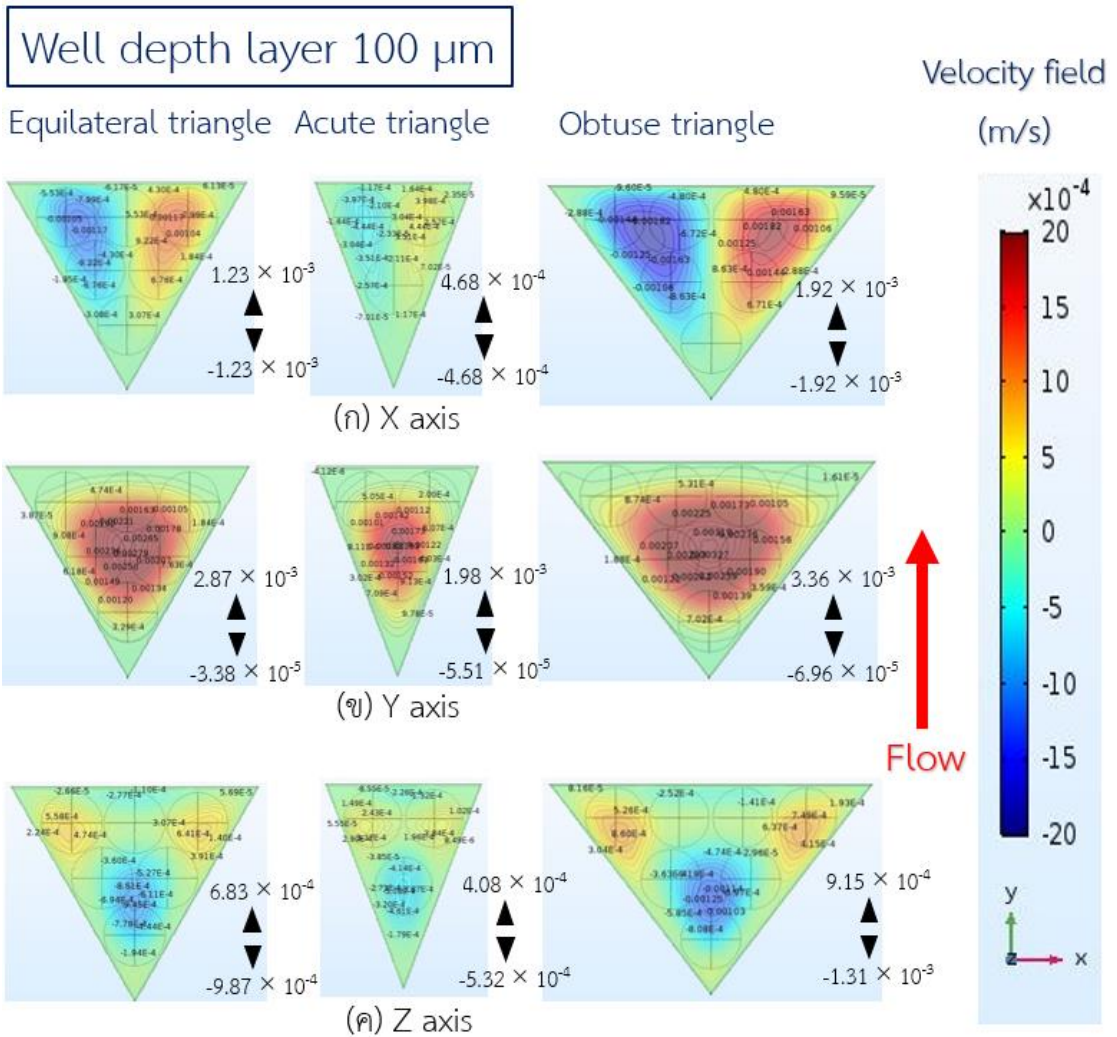


ภาพแผนกรูปที่ 61 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 50 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



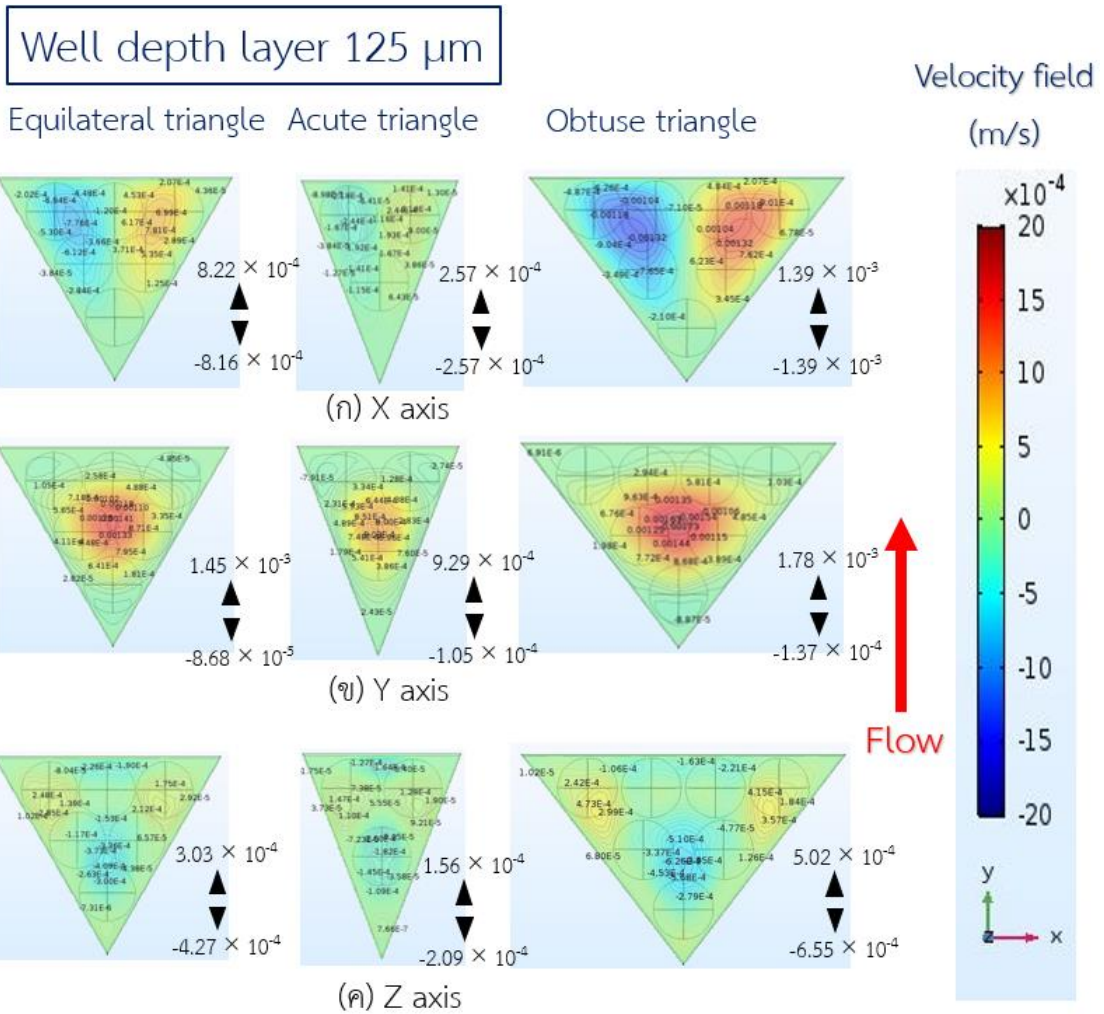
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวกรูปที่ 62 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 75 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวกรูปที่ 63 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 100 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



ภาคผนวกรูปที่ 64 การกระจายตัวความเร็ว (m/s) ของสามเหลี่ยมมุมเท่า สามเหลี่ยมมุมแหลม และ สามเหลี่ยมมุมป้าน ที่ระดับความลึก 125 μm มีอนุภาคภายในหลุม (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

ภาคผนวก ฅ

ตารางการเก็บข้อมูลผลการกระจายตัวการหมุนเฉลี่ยเทียบพื้นที่ผิว (Surface average of vorticity)

Vorticity X [abs(spf.vorticityx)]	Well depth layer [μm]		10	50	100	150	200	250	300
	x	y							
Vorticity [1/s]	Eq triangle		156.26	66.15	28.19	12.39	4.62	1.63	6.39
	Acute triangle		151.06	57.17	21.19	8.37	2.91	1.13	4.26
	Obtuse triangle		157.37	70.47	32.70	15.44	5.99	1.78	7.14

ก

Vorticity Y [abs(spf.vorticityy)]	Well depth layer [μm]		10	50	100	150	200	250	300
	x	y							
Vorticity [1/s]	Eq triangle		33.14	12.51	5.51	3.56	1.90	0.49	1.36
	Acute triangle		35.23	11.88	3.53	2.25	1.35	0.46	0.83
	Obtuse triangle		31.02	13.21	6.86	4.54	2.70	1.36	2.58

ข

Vorticity Z [abs(spf.vorticityz)]	Well depth layer [μm]		10	50	100	150	200	250	300
	x	y							
Vorticity [1/s]	Eq triangle		69.11	34.78	13.28	3.78	1.94	1.72	0.00
	Acute triangle		81.32	35.45	11.01	2.15	1.41	1.54	0.00
	Obtuse triangle		60.29	33.36	14.93	5.83	2.68	1.78	0.00

ค

ภาคผนวกตารางที่ 3 ผลการคำนวณการกระจายตัวการหมุนเฉลี่ยเทียบพื้นที่ผิวของสามเหลี่ยมทั้งสามรูปแบบที่ระนาบความลึกต่างกัน ไม่มีอนุภาคภายในหลุม ตามแนวการหมุน สำหรับกรณี (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

ก

		10	25	50	75	100	125	150	300
Vorticity X [abs(spf.vorticityx)]	x								
	Well depth layer [µm]								
	y	Eq triangle	109.14	66.87	42.78	27.28	16.16	7.94	1.89
		Acute triangle	100.57	57.68	34.43	20.64	11.28	5.34	1.74
		Obtuse triangle	112.07	70.68	46.73	30.64	18.84	9.83	2.07

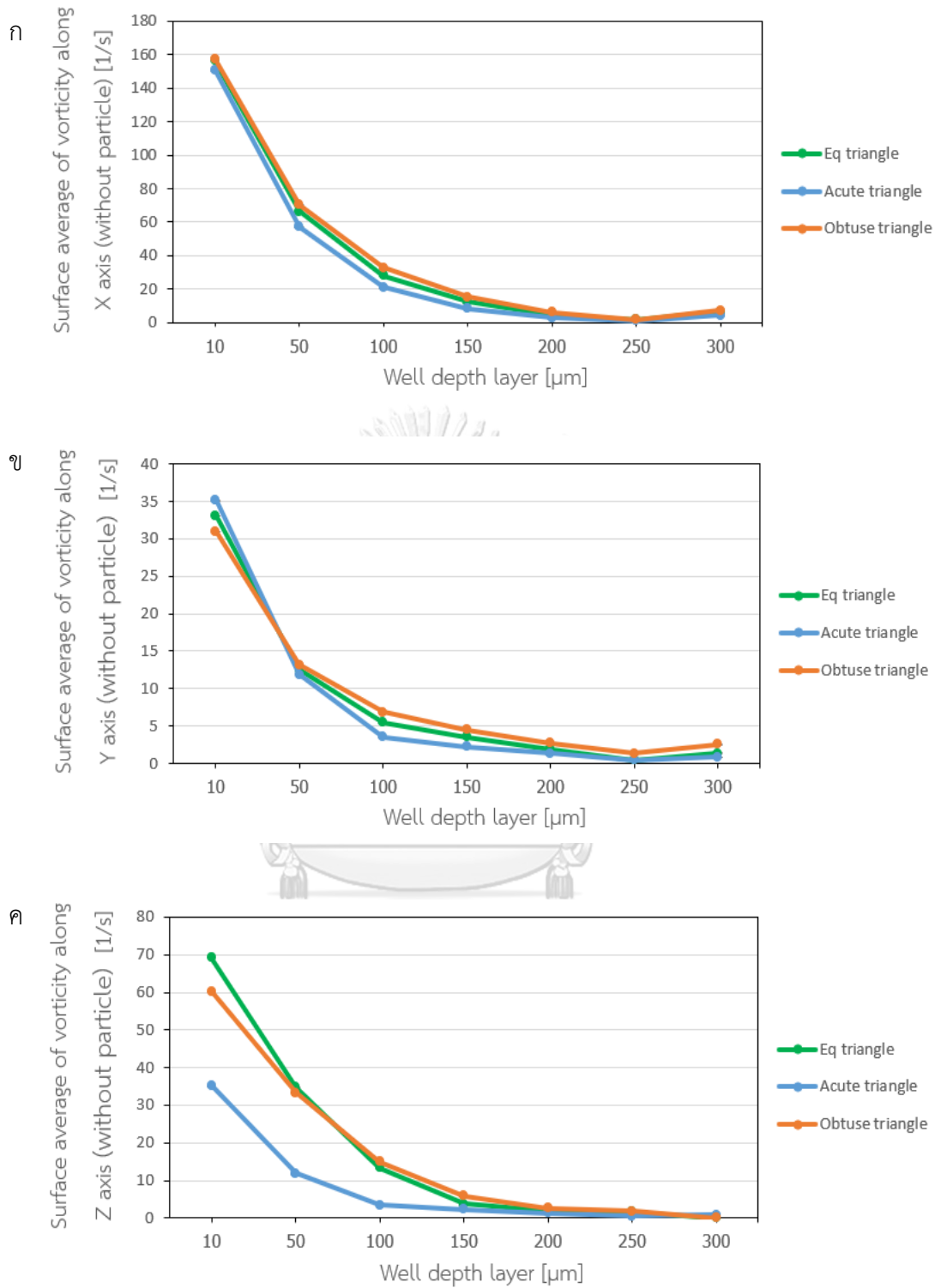
ข

		10	25	50	75	100	125	150	300
Vorticity Y [abs(spf.vorticityy)]	x								
	Well depth layer [µm]								
	y	Eq triangle	22.54	12.87	7.93	6.01	6.16	7.38	1.01
		Acute triangle	23.32	12.56	6.90	3.88	2.56	2.20	0.62
		Obtuse triangle	21.17	12.63	8.67	8.21	9.96	12.47	1.61

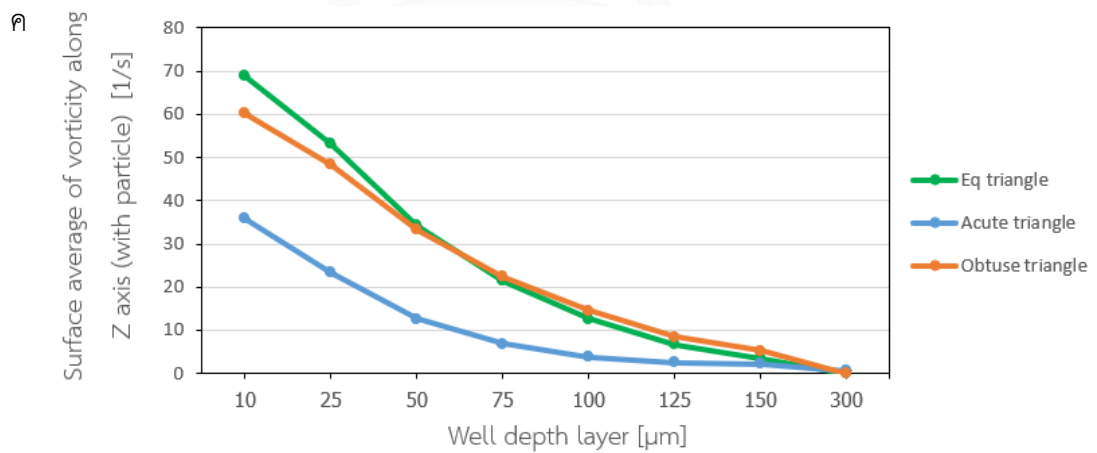
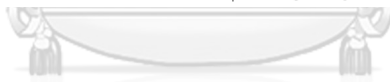
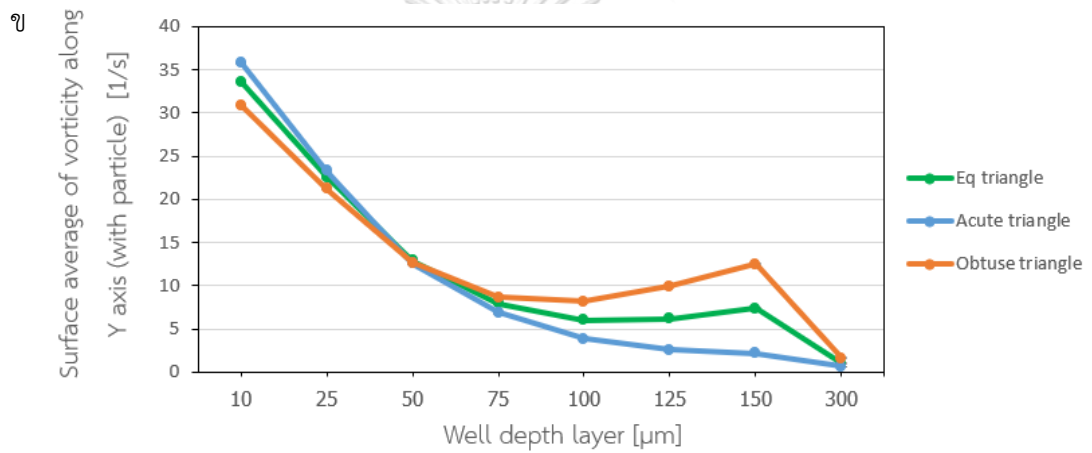
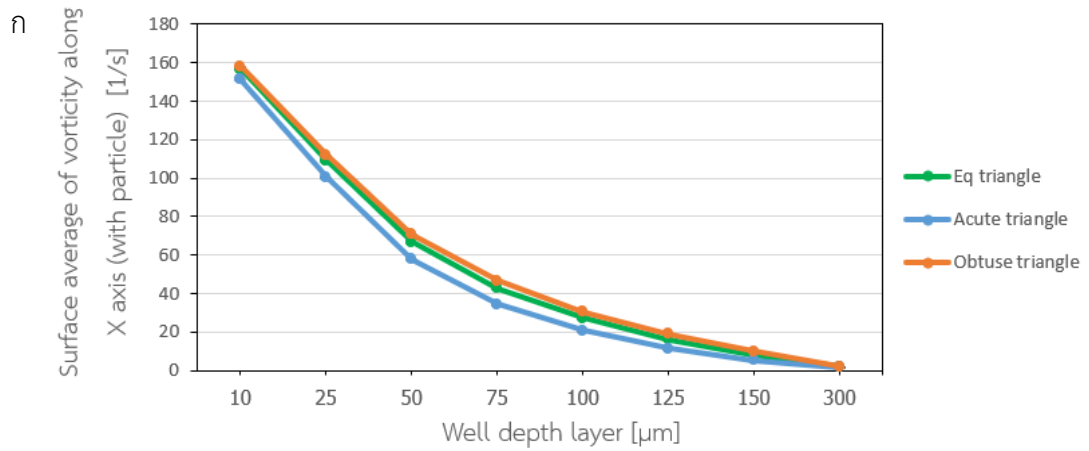
ค

		10	25	50	75	100	125	150	300
Vorticity Z [abs(spf.vorticityz)]	x								
	Well depth layer [µm]								
	y	Eq triangle	53.14	34.29	21.44	12.62	6.63	3.50	0.00
		Acute triangle	59.26	34.88	19.65	10.24	4.65	1.85	0.00
		Obtuse triangle	48.28	33.31	22.44	14.48	8.44	5.19	0.00

ภาคผนวกตารางที่ 4 ผลการคำนวณการกระจายตัวการหมุนเฉลี่ยเทียบพื้นที่ผิวของสามเหลี่ยมทั้งสามรูปแบบที่ระนาบความลึกต่างกัน มีอนุภาคภายในหลุม ตามแนวการหมุน สำหรับกรณี (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



ภาคผนวกรูปที่ 65 กราฟขนาดการกระจายตัวการหมุนภายในหลุมเฉลี่ยเทียบพื้นที่ผิวระนาบความลึกต่างๆ ไม่มีอนุภาคภายในหลุม สำหรับกรณี (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z



ภาคผนวกรูปที่ 66 กราฟขนาดการกระจายตัวการหมุนภายในหลุมเฉลี่ยเทียบพื้นที่ผิวระนาบความลึกต่างๆ มีอนุภาคภายในหลุม สำหรับกรณี (ก) แนวแกน X, (ข) แนวแกน Y, (ค) แนวแกน Z

ภาคผนวก ก
ตารางการเก็บข้อมูลผลการทดลอง

	x	Time [sec]	y	Time [sec]							
				0	5	10	15	20	25	30	
Equilateral triangle	Monitor the change of the trapping pattern with respect to time after high flow rate for single trap only	#1	Number of wells ratio (Single trap)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		#2		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
		#3		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
		#4		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
		#5		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
		#6		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	AVG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
		SD		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

ก

	x	Time [sec]	y	Time [sec]						
				0	5	10	15	20	25	30
Acute triangle	Monitor the change of the trapping pattern with respect to time after high flow rate for single trap only	#1	Number of wells ratio (Single trap)	0.030	0.050	0.050	0.050	0.050	0.060	0.060
		#2		0.020	0.020	0.030	0.030	0.050	0.050	0.050
		#3		0.010	0.020	0.020	0.040	0.040	0.040	0.040
		#4		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		#5		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		#6		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	AVG	0.010	0.015	0.017	0.020	0.023	0.025	0.025		
		SD		0.020	0.021	0.023	0.026	0.028		

ข

	x	Time [sec]	y	Time [sec]						
				0	5	10	15	20	25	30
Obtuse triangle	Monitor the change of the trapping pattern with respect to time after high flow rate for single trap only	#1	Number of wells ratio (Single trap)	0.000	0.000	0.015	0.015	0.015	0.029	0.044
		#2		0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	0.015	0.029
		#3		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		#4		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	0.015
		#5		0.000	0.000	0.015	0.000	0.015	0.015	0.015
		#6		0.000	0.000	0.000	0.015	0.015	0.015	0.015
	AVG	0.000	0.000	0.005	0.005	0.010	0.015	0.020		
		SD		0.000	0.008	0.008	0.008	0.009		

ค

ภาคผนวกตารางที่ 5 ผลการทดลองระยะสั้น อัตราส่วนหลุมที่ดักจับอนุภาคเดี่ยวที่อัตราการไหล 350 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

	x	y	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30
Equilateral triangle			#1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			AVG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			SD	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ก

	x	y	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30
Acute triangle			#1	0.110	0.150	0.190	0.190	0.230	0.220	0.250
			#2	0.050	0.120	0.140	0.150	0.150	0.150	0.180
			#3	0.090	0.120	0.150	0.130	0.130	0.140	0.160
			#4	0.060	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070
			#5	0.070	0.070	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080
			#6	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080
			AVG	0.077	0.102	0.118	0.117	0.123	0.123	0.123
			SD	0.022	0.033	0.049	0.048	0.061	0.058	0.072

ข

	x	y	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30
Obtuse triangle			#1	0.000	0.000	0.029	0.074	0.088	0.103	0.088
			#2	0.000	0.000	0.015	0.029	0.029	0.044	0.029
			#3	0.000	0.015	0.015	0.015	0.029	0.044	0.044
			#4	0.000	0.000	0.000	0.015	0.029	0.029	0.029
			#5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#6	0.000	0.000	0.000	0.015	0.015	0.015	0.015
			AVG	0.000	0.002	0.010	0.025	0.032	0.039	0.034
			SD	0.000	0.006	0.012	0.026	0.030	0.036	0.030

ค

ภาคผนวกตารางที่ 6 ผลการทดลองระยะสั้น อัตราส่วนหลุมที่ดักจับอนุภาคคู่ที่อัตราการไหล 350 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

	x	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30
Equilateral triangle	y	#1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
		#2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
		#3	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
		#4	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
		#5	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
		#6	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	AVG	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
	SD	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

ก

	x	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30
Acute triangle	y	#1	0.860	0.800	0.760	0.760	0.720	0.720	0.690
		#2	0.930	0.860	0.830	0.820	0.800	0.800	0.770
		#3	0.900	0.860	0.830	0.830	0.830	0.820	0.800
		#4	0.940	0.930	0.930	0.930	0.930	0.930	0.930
		#5	0.930	0.930	0.920	0.920	0.920	0.920	0.920
		#6	0.920	0.920	0.920	0.920	0.920	0.920	0.920
	AVG	0.913	0.883	0.865	0.863	0.853	0.852	0.838	
	SD	0.027	0.048	0.063	0.064	0.077	0.078	0.091	

ข

	x	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30
Obtuse triangle	y	#1	1.000	1.000	0.956	0.912	0.897	0.868	0.868
		#2	1.000	1.000	0.985	0.971	0.956	0.941	0.941
		#3	1.000	0.985	0.985	0.985	0.971	0.956	0.956
		#4	1.000	1.000	1.000	0.985	0.971	0.956	0.956
		#5	1.000	1.000	0.985	0.985	0.971	0.971	0.971
		#6	1.000	1.000	1.000	0.971	0.971	0.971	0.971
	AVG	1.000	0.995	0.975	0.956	0.941	0.922	0.922	
	SD	0.000	0.006	0.016	0.029	0.029	0.039	0.039	

ค

ภาคผนวกตารางที่ 7 ผลการทดลองระยะสั้น อัตราส่วนหลุมที่ดักจับสามอนุภาคขึ้นไปที่อัตราการไหล 350 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

	x	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30		
										y	
Equilateral triangle	Monitor the change of the trapping pattern with respect to time after high flow rate for EMPTY well	Number of wells ratio (Empty)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
			#1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			AVG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			SD	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ก

	x	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30		
										y	
Acute triangle	Monitor the change of the trapping pattern with respect to time after high flow rate for EMPTY well	Number of wells ratio (Empty)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
			#1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			AVG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			SD	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ข

	x	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30		
										y	
Obtuse triangle	Monitor the change of the trapping pattern with respect to time after high flow rate for EMPTY well	Number of wells ratio (Empty)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
			#1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			#6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			AVG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			SD	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ค

ภาคผนวกตารางที่ 8 ผลการทดลองระยะสั้น อัตราส่วนหลุมเปล่าที่อัตราการไหล 350 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

ก

	x	Time [sec]	Y						
			0	5	10	15	20	25	30
Equilateral triangle	Monitor the change of the trapping pattern with respect to time after high flow rate for single trap only	#1	0.000	0.000	0.024	0.060	0.202	0.274	0.369
		#2	0.000	0.000	0.036	0.107	0.167	0.262	0.381
		#3	0.000	0.012	0.012	0.167	0.298	0.369	0.417
		#4	0.000	0.000	0.071	0.381	0.440	0.476	0.488
		#5	0.000	0.000	0.071	0.226	0.310	0.345	0.369
		#6	0.000	0.000	0.083	0.310	0.440	0.488	0.488
		AVG	0.000	0.002	0.050	0.208	0.310	0.369	0.419
SD	0.000	0.005	0.030	0.122	0.115	0.097	0.057		

ข

	x	Time [sec]	Y						
			0	5	10	15	20	25	30
Acute triangle	Monitor the change of the trapping pattern with respect to time after high flow rate for single trap only	#1	0.010	0.020	0.030	0.030	0.040	0.060	0.060
		#2	0.000	0.000	0.000	0.010	0.010	0.010	0.020
		#3	0.000	0.010	0.020	0.030	0.050	0.050	0.050
		#4	0.000	0.000	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
		#5	0.000	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
		#6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		AVG	0.002	0.007	0.012	0.015	0.020	0.023	0.025
SD	0.004	0.008	0.012	0.012	0.020	0.025	0.024		

ค

	x	Time [sec]	Y						
			0	5	10	15	20	25	30
Obtuse triangle	Monitor the change of the trapping pattern with respect to time after high flow rate for single trap only	#1	0.000	0.118	0.206	0.206	0.191	0.162	0.162
		#2	0.000	0.088	0.147	0.176	0.176	0.206	0.191
		#3	0.000	0.029	0.176	0.221	0.206	0.206	0.221
		#4	0.015	0.265	0.309	0.324	0.294	0.309	0.279
		#5	0.000	0.088	0.250	0.250	0.309	0.368	0.324
		#6	0.000	0.044	0.221	0.294	0.294	0.294	0.279
		AVG	0.002	0.105	0.218	0.245	0.245	0.257	0.243
SD	0.006	0.084	0.057	0.056	0.060	0.078	0.062		

ภาคผนวกตารางที่ 9 ผลการทดลองระยะสั้น อัตราส่วนหลุมที่ดักจับอนุภาคเดี่ยวที่อัตราการไหล 500 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

ก

	x	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30
Equilateral triangle	y	#1	0.000	0.000	0.036	0.107	0.131	0.143	0.119
		#2	0.000	0.000	0.119	0.107	0.131	0.143	0.143
		#3	0.000	0.012	0.036	0.071	0.083	0.071	0.060
		#4	0.000	0.000	0.143	0.107	0.131	0.095	0.060
		#5	0.000	0.024	0.083	0.083	0.107	0.107	0.095
		#6	0.000	0.000	0.060	0.179	0.107	0.107	0.107
		AVG	0.000	0.006	0.079	0.109	0.115	0.111	0.097
		SD	0.000	0.010	0.044	0.037	0.019	0.028	0.033

ข

	x	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30
Acute triangle	y	#1	0.050	0.140	0.160	0.190	0.210	0.240	0.240
		#2	0.010	0.010	0.030	0.040	0.080	0.100	0.120
		#3	0.020	0.010	0.040	0.100	0.120	0.120	0.120
		#4	0.070	0.080	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070
		#5	0.050	0.060	0.070	0.080	0.080	0.080	0.080
		#6	0.030	0.070	0.090	0.090	0.090	0.090	0.100
		AVG	0.038	0.062	0.077	0.095	0.108	0.117	0.123
		SD	0.022	0.049	0.046	0.051	0.053	0.063	0.060

ค

	x	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30
Obtuse triangle	y	#1	0.000	0.059	0.059	0.118	0.118	0.118	0.118
		#2	0.000	0.118	0.147	0.103	0.103	0.074	0.088
		#3	0.000	0.044	0.088	0.103	0.103	0.103	0.103
		#4	0.015	0.118	0.074	0.074	0.088	0.088	0.088
		#5	0.000	0.074	0.191	0.191	0.221	0.147	0.147
		#6	0.000	0.118	0.103	0.074	0.088	0.074	0.074
		AVG	0.002	0.088	0.110	0.110	0.120	0.100	0.103
		SD	0.006	0.034	0.050	0.043	0.050	0.029	0.026

ภาคผนวกตารางที่ 10 ผลการทดลองระยะสั้น อัตราส่วนหลุมที่ติดกับอนุภาคคู่ที่อัตราการไหล 500 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

	x	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30
Equilateral triangle	Monitor the change of the trapping pattern with respect to time after high flow rate for triple trap or more	#1	1.000	1.000	0.940	0.810	0.607	0.524	0.429
		#2	1.000	1.000	0.845	0.786	0.679	0.571	0.440
	y	#3	1.000	0.976	0.929	0.726	0.583	0.512	0.464
		#4	1.000	1.000	0.750	0.452	0.345	0.262	0.274
		#5	1.000	0.976	0.833	0.631	0.500	0.440	0.393
		#6	1.000	1.000	0.857	0.452	0.345	0.286	0.250
		AVG	1.000	0.992	0.859	0.643	0.510	0.433	0.375
SD	0.000	0.012	0.070	0.160	0.140	0.130	0.091		

ก

	x	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30
Acute triangle	Monitor the change of the trapping pattern with respect to time after high flow rate for triple trap or more	#1	0.940	0.840	0.810	0.780	0.750	0.700	0.680
		#2	0.990	0.990	0.970	0.950	0.910	0.890	0.860
	y	#3	0.980	0.980	0.940	0.870	0.830	0.830	0.830
		#4	0.930	0.920	0.920	0.920	0.920	0.920	0.920
		#5	0.950	0.930	0.920	0.910	0.910	0.910	0.900
		#6	0.970	0.930	0.910	0.910	0.910	0.910	0.900
		AVG	0.960	0.932	0.912	0.890	0.872	0.860	0.848
SD	0.024	0.053	0.054	0.060	0.068	0.085	0.089		

ข

	x	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30
Obtuse triangle	Monitor the change of the trapping pattern with respect to time after high flow rate for triple trap or more	#1	1.000	0.750	0.588	0.471	0.441	0.441	0.441
		#2	1.000	0.765	0.559	0.544	0.500	0.485	0.471
	y	#3	1.000	0.926	0.618	0.544	0.485	0.471	0.456
		#4	0.971	0.397	0.338	0.309	0.309	0.279	0.265
		#5	1.000	0.809	0.397	0.353	0.324	0.294	0.294
		#6	1.000	0.838	0.529	0.456	0.441	0.441	0.441
		AVG	0.995	0.748	0.505	0.446	0.417	0.402	0.395
SD	0.012	0.183	0.112	0.097	0.081	0.091	0.090		

ค

ภาคผนวกตารางที่ 11 ผลการทดลองระยะสั้น อัตราส่วนหลุมที่ดักจับสามอนุภาคขึ้นไปที่อัตราการไหล 500 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

ก

	x	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30	
										0
Equilateral triangle	Monitor the change of the trapping pattern with respect to time after high flow rate for EMPTY well	#1	0.000	0.000	0.000	0.024	0.060	0.060	0.060	0.083
		#2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024	0.024	0.024	0.036
	y	#3	0.000	0.000	0.024	0.036	0.036	0.048	0.048	0.060
		#4	0.000	0.000	0.036	0.060	0.060	0.083	0.167	0.179
		#5	0.000	0.000	0.012	0.060	0.083	0.107	0.107	0.143
		#6	0.000	0.000	0.000	0.060	0.107	0.119	0.119	0.155
		AVG	0.000	0.000	0.012	0.040	0.065	0.087	0.087	0.109
		SD	0.000	0.000	0.015	0.025	0.032	0.053	0.053	0.058
		Number of wells ratio (Empty)								

ข

	x	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30	
										0
Acute triangle	Monitor the change of the trapping pattern with respect to time after high flow rate for EMPTY well	#1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020
		#2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	y	#3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		#4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		#5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		#6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		AVG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003
		SD	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008
		Number of wells ratio (Empty)								

ค

	x	Time [sec]	0	5	10	15	20	25	30
Obtuse triangle	Monitor the change of the trapping pattern with respect to time after high flow rate for EMPTY well	#1	0.000	0.074	0.147	0.206	0.250	0.279	0.279
		#2	0.000	0.029	0.147	0.176	0.221	0.235	0.250
	y	#3	0.000	0.000	0.118	0.132	0.206	0.221	0.221
		#4	0.000	0.221	0.279	0.294	0.309	0.324	0.368
		#5	0.000	0.029	0.162	0.206	0.147	0.191	0.235
		#6	0.000	0.000	0.147	0.176	0.176	0.191	0.206
		AVG	0.000	0.059	0.167	0.199	0.218	0.240	0.260
		SD	0.000	0.084	0.057	0.054	0.057	0.052	0.059
		Number of wells ratio (Empty)							

ภาคผนวกตารางที่ 12 ผลการทดลองระยะสั้น อัตราส่วนหลุมเปล่าที่อัตราการไหล 500 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

ก

x	Time [sec]	y									
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	
Equilateral triangle	#1	0.000	0.000	0.036	0.036	0.036	0.055	0.055	0.073	0.055	
	#2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	AVG	0.000	0.000	0.018	0.018	0.018	0.027	0.027	0.036	0.027	
	SD	0.000	0.000	0.026	0.026	0.026	0.039	0.039	0.051	0.039	

ข

x	Time [sec]	y									
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	
Acute triangle	#1	0.015	0.062	0.062	0.062	0.077	0.077	0.077	0.108	0.108	
	#2	0.015	0.031	0.062	0.062	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	
	AVG	0.015	0.046	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.077	0.077	
	SD	0.000	0.022	0.000	0.000	0.022	0.022	0.022	0.044	0.044	

ค

x	Time [sec]	y									
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	
Obtuse triangle	#1	0.000	0.067	0.156	0.244	0.267	0.267	0.267	0.244	0.244	
	#2	0.000	0.067	0.156	0.156	0.156	0.178	0.178	0.222	0.222	
	AVG	0.000	0.067	0.156	0.200	0.211	0.222	0.222	0.233	0.233	
	SD	0.000	0.000	0.000	0.063	0.079	0.063	0.063	0.016	0.016	

ภาคผนวกตารางที่ 13 ผลการทดลองระยะยาว อัตราส่วนหลุมที่ดักจับอนุภาคเดี่ยวที่อัตราการไหล 350 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

x	Time [sec]		0	15	30	45	60	75	90	105	120
	#1	#2									
Equilateral triangle	Number of wells ratio (Double trap)		0.036	0.091	0.109	0.109	0.127	0.109	0.164	0.145	0.164
	wells ratio		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.018	0.036	0.055	0.055
	AVG		0.018	0.045	0.055	0.055	0.064	0.064	0.100	0.100	0.109
	SD		0.026	0.064	0.077	0.077	0.090	0.064	0.090	0.064	0.077

ก

x	Time [sec]		0	15	30	45	60	75	90	105	120
	#1	#2									
Acute triangle	Number of wells ratio (Double trap)		0.138	0.415	0.415	0.415	0.446	0.446	0.462	0.431	0.431
	wells ratio		0.062	0.308	0.308	0.308	0.308	0.308	0.323	0.323	0.323
	AVG		0.100	0.362	0.362	0.362	0.377	0.377	0.392	0.377	0.377
	SD		0.054	0.076	0.076	0.076	0.098	0.098	0.098	0.076	0.076

ข

x	Time [sec]		0	15	30	45	60	75	90	105	120
	#1	#2									
Obtuse triangle	Number of wells ratio (Double trap)		0.000	0.067	0.133	0.111	0.178	0.178	0.178	0.178	0.178
	wells ratio		0.000	0.044	0.044	0.067	0.089	0.089	0.067	0.044	0.067
	AVG		0.000	0.056	0.089	0.089	0.133	0.133	0.122	0.111	0.122
	SD		0.000	0.016	0.063	0.031	0.063	0.063	0.079	0.094	0.079

ค

ภาคผนวกตารางที่ 14 ผลการทดลองระยะยาว อัตราส่วนหลุมที่ดักจับอนุภาคคู่ที่อัตราการไหล 350 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

x	Time [sec]	0	15	30	45	60	75	90	105	120
Equilateral triangle	#1	0.964	0.909	0.855	0.855	0.836	0.836	0.782	0.782	0.764
	#2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.982	0.964	0.945	0.945
	AVG	0.982	0.955	0.927	0.927	0.918	0.909	0.873	0.864	0.855
	SD	0.026	0.064	0.103	0.103	0.116	0.103	0.129	0.116	0.129

ก

x	Time [sec]	0	15	30	45	60	75	90	105	120
Acute triangle	#1	0.846	0.523	0.523	0.523	0.477	0.477	0.462	0.462	0.462
	#2	0.923	0.662	0.631	0.631	0.631	0.631	0.615	0.615	0.615
	AVG	0.885	0.592	0.577	0.577	0.554	0.554	0.538	0.538	0.538
	SD	0.054	0.098	0.076	0.076	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109

ข

x	Time [sec]	0	15	30	45	60	75	90	105	120
Obtuse triangle	#1	1.000	0.867	0.711	0.644	0.533	0.533	0.511	0.511	0.489
	#2	1.000	0.889	0.800	0.778	0.756	0.733	0.733	0.711	0.689
	AVG	1.000	0.878	0.756	0.711	0.644	0.633	0.622	0.611	0.589
	SD	0.000	0.016	0.063	0.094	0.157	0.141	0.157	0.141	0.141

ค

ภาคผนวกตารางที่ 15 ผลการทดลองระยะยาว อัตราส่วนหลุมที่ดักจับสามอนุภาคขึ้นไปที่อัตราการไหล 350 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

ก

x	Time [sec]	Number of wells ratio (Empty)											
		0	15	30	45	60	75	90	105	120			
Equilateral triangle	#1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.018
	#2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	AVG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009
	SD	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013

ข

x	Time [sec]	Number of wells ratio (Empty)											
		0	15	30	45	60	75	90	105	120			
Acute triangle	#1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	#2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
	AVG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
	SD	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011

ค

x	Time [sec]	Number of wells ratio (Empty)											
		0	15	30	45	60	75	90	105	120			
Obtuse triangle	#1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.022	0.022	0.044	0.067	0.089	0.089	0.089	0.089
	#2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022
	AVG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.011	0.033	0.044	0.056	0.056	0.056	0.056
	SD	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	0.016	0.016	0.031	0.047	0.047	0.047	0.047

ภาคผนวกตารางที่ 16 ผลการทดลองระยะยาว อัตราส่วนหลุมเปล่าที่อัตราการไหล 350 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

x	Time [sec]	0	15	30	45	60	75	90	105	120
Equilateral triangle	#1	0.000	0.655	0.764	0.800	0.782	0.818	0.818	0.764	0.727
	#2	0.000	0.800	0.855	0.873	0.836	0.800	0.727	0.673	0.655
	AVG	0.000	0.727	0.809	0.836	0.809	0.809	0.773	0.718	0.691
	SD	0.000	0.103	0.064	0.051	0.039	0.013	0.064	0.064	0.051

ก

x	Time [sec]	0	15	30	45	60	75	90	105	120
Acute triangle	#1	0.000	0.154	0.215	0.231	0.262	0.262	0.262	0.262	0.308
	#2	0.015	0.215	0.200	0.215	0.246	0.246	0.262	0.262	0.323
	AVG	0.008	0.185	0.208	0.223	0.254	0.254	0.262	0.262	0.315
	SD	0.011	0.044	0.011	0.011	0.011	0.011	0.000	0.000	0.011

ข

x	Time [sec]	0	15	30	45	60	75	90	105	120
Obtuse triangle	#1	0.000	0.133	0.156	0.178	0.178	0.156	0.156	0.156	0.156
	#2	0.000	0.200	0.044	0.067	0.089	0.067	0.067	0.067	0.067
	AVG	0.000	0.167	0.100	0.122	0.133	0.111	0.111	0.111	0.111
	SD	0.000	0.047	0.079	0.079	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063

ค

ภาคผนวกตารางที่ 17 ผลการทดลองระยะยาว อัตราส่วนหลุมที่ดักจับอนุภาคเดียวที่อัตราการไหล 500 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

ก

x	Time [sec]	Number of wells ratio (Double trap)									
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	
Equilateral triangle	#1	0.000	0.055	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	#2	0.000	0.073	0.018	0.036	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055
	AVG	0.000	0.064	0.009	0.018	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027
	SD	0.000	0.013	0.013	0.026	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039

ข

x	Time [sec]	Number of wells ratio (Double trap)									
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	
Acute triangle	#1	0.062	0.292	0.262	0.262	0.246	0.262	0.231	0.215	0.185	
	#2	0.077	0.292	0.277	0.277	0.262	0.262	0.231	0.215	0.154	
	AVG	0.069	0.292	0.269	0.269	0.254	0.262	0.231	0.215	0.169	
	SD	0.011	0.000	0.011	0.011	0.011	0.000	0.000	0.000	0.022	

ค

x	Time [sec]	Number of wells ratio (Double trap)									
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	
Obtuse triangle	#1	0.000	0.178	0.044	0.044	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	
	#2	0.000	0.133	0.044	0.044	0.022	0.044	0.044	0.044	0.044	
	AVG	0.000	0.156	0.044	0.044	0.022	0.033	0.033	0.033	0.033	
	SD	0.000	0.031	0.000	0.000	0.000	0.016	0.016	0.016	0.016	

ภาคผนวกตารางที่ 18 ผลการทดลองระยะยาว อัตราส่วนหลุมที่ดักจับอนุภาคคู่ที่อัตราการไหล 500 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

ก

x	Time [sec]	0	15	30	45	60	75	90	105	120
Equilateral triangle	#1	1.000	0.273	0.109	0.073	0.073	0.018	0.018	0.018	0.018
	#2	1.000	0.091	0.073	0.036	0.036	0.018	0.018	0.018	0.018
	AVG	1.000	0.182	0.091	0.055	0.055	0.018	0.018	0.018	0.018
	SD	0.000	0.129	0.026	0.026	0.026	0.000	0.000	0.000	0.000

ข

x	Time [sec]	0	15	30	45	60	75	90	105	120
Acute triangle	#1	0.938	0.477	0.431	0.415	0.385	0.369	0.369	0.338	0.308
	#2	0.908	0.369	0.369	0.354	0.338	0.338	0.338	0.354	0.354
	AVG	0.923	0.423	0.400	0.385	0.362	0.354	0.354	0.346	0.331
	SD	0.022	0.076	0.044	0.044	0.033	0.022	0.022	0.011	0.033

ค

x	Time [sec]	0	15	30	45	60	75	90	105	120
Obtuse triangle	#1	1.000	0.067	0.044	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	#2	1.000	0.067	0.044	0.022	0.022	0.000	0.000	0.000	0.000
	AVG	1.000	0.067	0.044	0.011	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000
	SD	0.000	0.000	0.000	0.016	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000

ภาคผนวกตารางที่ 19 ผลการทดลองระยะยาว อัตราส่วนหลุมที่ดักจับสามอนุภาคขึ้นไปที่อัตราการไหล 500 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

x	Time [sec]					0	15	30	45	60	75	90	105	120		
	y															
Equilateral triangle	#1	Number of wells ratio					0.000	0.018	0.127	0.127	0.145	0.164	0.164	0.218	0.255	
		#2	(Empty)					0.000	0.036	0.055	0.055	0.073	0.127	0.200	0.255	0.273
	AVG							0.000	0.027	0.091	0.091	0.109	0.145	0.182	0.236	0.264
			SD						0.000	0.013	0.051	0.051	0.051	0.026	0.026	0.026

ก

x	Time [sec]					0	15	30	45	60	75	90	105	120		
	y															
Acute triangle	#1	Number of wells ratio					0.000	0.077	0.092	0.092	0.108	0.108	0.138	0.185	0.200	
		#2	(Empty)					0.000	0.123	0.154	0.154	0.154	0.154	0.169	0.169	0.169
	AVG							0.000	0.100	0.123	0.123	0.131	0.131	0.154	0.177	0.185
			SD						0.000	0.033	0.044	0.044	0.033	0.033	0.022	0.011

ข

x	Time [sec]					0	15	30	45	60	75	90	105	120		
	y															
Obtuse triangle	#1	Number of wells ratio					0.000	0.622	0.756	0.778	0.800	0.822	0.822	0.822	0.822	
		#2	(Empty)					0.000	0.600	0.867	0.867	0.867	0.889	0.889	0.889	0.889
	AVG							0.000	0.611	0.811	0.822	0.833	0.856	0.856	0.856	0.856
			SD						0.000	0.016	0.079	0.063	0.047	0.047	0.047	0.047

ค

ภาคผนวกตารางที่ 20 ผลการทดลองระยะยาว อัตราส่วนหลุมเปล่าที่อัตราการไหล 500 ml/hr สำหรับกรณี (ก) สามเหลี่ยมมุมเท่า, (ข) สามเหลี่ยมมุมแหลม, (ค) สามเหลี่ยมมุมป้าน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ภาคภูมิ ยิ่งประทานพร
วัน เดือน ปี เกิด	7 เมษายน 2534
สถานที่เกิด	อุดรธานี
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาปลายจากโรงเรียนอุดรพิทยานุกูล ปีการศึกษา 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2555 ประสบการณ์ทำงานกับบริษัท อีซูซุมอเตอร์ (ประเทศไทย) ในตำแหน่ง วิศวกรประจำ แผนกงานรับประกันคุณภาพสินค้า สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาภาษาอังกฤษทางด้านวิชาการ (Academic English Programs) มหาวิทยาลัย University of South Florida (USF) ในปีการศึกษา 2558 ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2559
ที่อยู่ปัจจุบัน	136/19 ถ.นิตโย ต.หมากแข้ง อ.เมือง จ.อุดรธานี 41000
ผลงานตีพิมพ์	อิทธิพลของรูปร่างหลุมขนาดจุลภาคต่อกลไกการดักจับอนุภาคได้รับการ ตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32
รางวัลที่ได้รับ	บทความชมเชยสาขา Biomechanics and Bioengineering