

การออกแบบคอมพิวเตอร์แขนงรูปแบบโคงสำหรับการไหลแบบขนานของของไหลสองชนิดที่ไม่  
ละลายเข้าหากัน



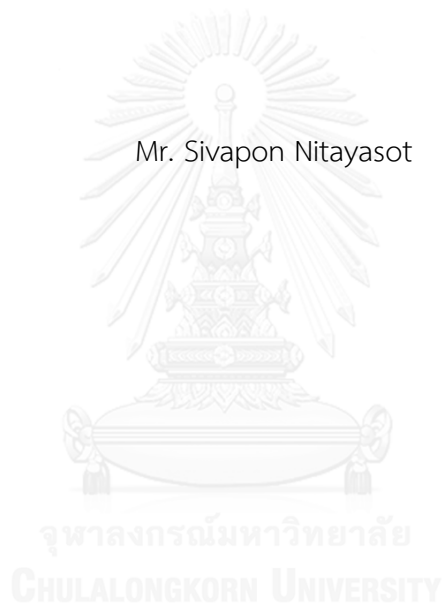
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2559  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN OF COMPACT CURVED MICRO CHANNEL FOR TWO PARALLEL IMMISCIBLE  
FLUID FLOW

Mr. Sivapon Nitayasot



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2016  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบคอมแพคไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งสำหรับการไหลแบบขนานของของไหลสองชนิดที่ไม่ละลายเข้าหากัน
โดย	นายศิวพล นิตยสุทธิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ตฤย์ มณีวัฒนา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เลิศนุวัฒน์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. ชญานุตม์ โฆษิตานนท์)

ศิวพล นิตยสุทธิ : การออกแบบคอมแพคไมโครแชนแนลรูปแบบโค้งสำหรับการไหลแบบขนานของของไหลสองชนิดที่ไม่ละลายเข้าหากัน (DESIGN OF COMPACT CURVED MICRO CHANNEL FOR TWO PARALLEL IMMISCIBLE FLUID FLOW) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ศ. ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์, 73 หน้า.

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขของของไหล 2 ชนิดที่ไม่ละลายเข้าหากันภายในอุปกรณ์ไมโครแชนแนลโดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT VERSION 15.0 เพื่อวิเคราะห์แนวทางการเพิ่มค่าสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหล 2 ชนิดที่ไหลคู่ขนานกันต่อปริมาตรโดยรวมของของไหล (Surface Area to Volume Ratio, SVR) โดยใช้หลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง รูปแบบท่อที่ศึกษาได้แก่รูปแบบโค้งที่มีรัศมีคงที่ และรูปแบบโค้งที่มีรัศมีไม่คงที่ เปรียบเทียบกับรูปแบบท่อตรงโดยกำหนดให้สภาพการไหลภายในอุปกรณ์นั้นยังคงสภาพการแยกชั้นและไหลคู่ขนานกันอย่างต่อเนื่องจนถึงทางออกของอุปกรณ์ไมโครแชนแนล

จากการศึกษาพบว่าอุปกรณ์ไมโครแชนแนลในช่องทางแบบโค้งที่อัตราการไหล  $0.01 - 0.2 \text{ mm}^3/\text{s}$  จะเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในช่องทางไหลส่งผลให้ค่า SVR สูงกว่าแบบตรงประมาณ 10-95 % โดยขึ้นกับค่าอัตราการไหลและรัศมีความโค้งที่แตกต่างกัน การเปรียบเทียบไมโครแชนแนล 2 รูปแบบ พบว่าแบบโค้งที่มีรัศมีไม่คงที่ (Spiral) จะให้ค่า SVR ที่สูงกว่าแบบโค้งที่มีรัศมีคงที่ (Helix) 5-10 % ที่อัตราการไหลที่เท่ากัน โดยค่า SVR ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ไมโครแชนแนลที่มีรูปแบบโค้งนั้นมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนมวลสารและพลังงานตลอดจนการเกิดปฏิกิริยาที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับแบบตรง แต่เมื่อพิจารณาไมโครแชนแนลรูปแบบโค้งจะพบว่าความดันตกคร่อมมีค่าที่สูงกว่าแบบตรงในงานวิจัยชิ้นนี้จึงเปรียบเทียบโดยการลดขนาดความยาวของไมโครแชนแนลรูปแบบโค้งให้มีค่าความดันตกคร่อมที่ใกล้เคียงกับรูปแบบตรงแล้วพิจารณาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสรวม พบว่าที่อัตราการไหลตั้งแต่  $0.08 \text{ mm}^3/\text{s}$  ไมโครแชนแนลรูปแบบโค้งทั้งสองรูปแบบจะให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลและค่าสมรรถนะพื้นผิวสัมผัสต่อค่าความดันตกคร่อมได้สูงกว่า

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5770314621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MICRO CHANNEL, CFD, CENTRIFUGAL FORCE

SIVAPON NITAYASOT: DESIGN OF COMPACT CURVED MICRO CHANNEL FOR TWO PARALLEL IMMISCIBLE FLUID FLOW. ADVISOR: ASST. PROF. SOMPONG PUTIVISUTISAK, Ph.D., CO-ADVISOR: PROF. SUTTICHA ASSABUMRUNGRAT, Ph.D., 73 pp.

The present work simulates flow of two immiscible fluids in a micro channel using ANSYS FLUENT VERSION 15.0. The objective was to increase the surface area to volume ratio (SVR) between those two parallel fluid phases by using centrifugal force while maintaining the continuous separated phases of the fluids along the micro channel. Two types of curved micro channels; helix and spiral were considered and compared with the conventional straight micro channel.

The simulation results demonstrated that the curved micro channels at flow rates of  $0.01 - 0.2 \text{ mm}^3/\text{s}$  offer higher SVR than the straight micro channels about 10-95%, depending on the flow rate and curvature radius. Furthermore, by comparing the SVR of micro channels with different curved configurations, i.e., constant radius (helix) and variant radius (spiral), the result shows that the spiral configuration offers higher SVR than the helix configuration around 5-10 % at the same flow rate. The increased SVR of curved micro channels allows the system to operate at higher mass and heat transfer as well as reaction rate than the conventional straight micro channel. So anyway the curved micro channels will generated pressure drop value higher than the straight micro channels so this present work were considered on equal pressure drop value and the result shown at flow rate more than  $0.08 \text{ mm}^3/\text{s}$  curved micro channel have more efficient.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature .....

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year: 2016 Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยการช่วยเหลือและคำแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ศ.ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ ตลอดจนคณะอาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ถ่ายทอดประสบการณ์ความรู้ คำแนะนำที่มีประโยชน์ตลอดจนความเสียสละและความกรุณา ให้แก่ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา ประธานกรรมการ รศ.ดร.บุญชัย เลิศนุวัฒน์ และ ดร.ชญาณนุตม์ โฆษิตานนท์ กรรมการ ที่ให้คำแนะนำและชี้แนะให้งานวิจัยชิ้นนี้มีความสมบูรณ์ซึ่งทำให้งานวิจัยชิ้นนี้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ หน่วยงานรัฐวิสาหกิจ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้โอกาสในการลาศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล เพื่อนำความรู้ที่ได้รับกลับไปพัฒนาหน่วยงานให้ดียิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณและระลึกเสมอว่าความสำเร็จในงานวิจัยชิ้นนี้จะสำเร็จไม่ได้หากปราศจากความเมตตา และกำลังใจจากบุคคลผู้มีพระคุณ ที่คอยสนับสนุนการศึกษาแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา สถาบันการศึกษาอันทรงเกียรติที่มอบโอกาสในการศึกษา และทุนเพิ่มศักยภาพส่วนงานในด้านการศึกษาของทุนรัชดาภิเษกสมโภชที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยชิ้นนี้

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ณ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.2 การประยุกต์และทดลองใช้ในอุตสาหกรรม .....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการทำวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 วิธีการดำเนินงาน .....	5
บทที่ 2 การศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 ผลการศึกษางานวิจัยที่เป็นการปรับปรุงภายในช่องทางการไหล.....	6
2.2 ผลการศึกษางานวิจัยที่เป็นการปรับปรุงรูปร่างและพื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์ .....	13
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	19
3.1 สมการควบคุม (Governing equation).....	19
3.1.1 กฎอนุรักษ์มวล (The law of mass conservation).....	19
3.1.2 กฎอนุรักษ์โมเมนตัม (The law of momentum conservation) .....	21
3.1.3 กฎอนุรักษ์พลังงาน (the law of energy conservation).....	25
3.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method).....	25

3.2.1 พจน์การพา (Convection Term) .....	26
3.2.2 พจน์การแพร่ (Diffusion term).....	27
3.2.3 พจน์อื่นๆ (Other Terms).....	28
3.3 การคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Scheme) .....	29
3.4 ขั้นตอนการแก้สมการเพื่อหาผลเฉลย (Solution Procedure).....	31
3.5 Volume of Fluid Method (VOF Model) .....	35
บทที่ 4 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	36
4.1 การสอบเทียบในเชิงคุณภาพกับงานวิจัยที่มีการคำนวณและการทดลอง.....	36
4.1.1 การสอบเทียบในส่วนของสนามการไหลเทียบกับการคำนวณของงานวิจัย .....	36
การเลือกขนาดกริดหรือปริมาตรควบคุมที่เหมาะสม .....	37
ขั้นตอนการคำนวณและเปรียบเทียบผล .....	37
4. ทำการเปรียบเทียบกับรูปร่างของสนามการไหลที่อัตราการไหลที่แตกต่างกัน .....	37
4.1.2 การตรวจสอบในส่วนของสนามการไหลเทียบกับผลการทดลอง.....	38
4.2 การสอบเทียบในเชิงปริมาณกับผลการทดลอง .....	41
บทที่ 5 การทำนายการไหลแบบราบเรียบผ่านช่องทางการไหลที่มีลักษณะโค้งและแบบตรง .....	44
5.1 ลักษณะและความสำคัญของปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์.....	44
5.2 การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS WORKBENCH .....	46
5.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบและวิธีการคำนวณที่พิจารณา.....	47
5.4 การแบ่งขนาดกริดของแบบจำลองและการทดสอบหาขนาดกริดที่เหมาะสมสำหรับปัญหา ..	48
5.5 การวิเคราะห์ผลของค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากไมโครเซนแนลรูปร่างโค้ง .....	49
5.6 ผลของความเร็วและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางต่อค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลต่อ ปริมาตร.....	52
5.7 การเพิ่มจำนวนวงรอบของไมโครเซนแนลรูปร่างโค้งและอัตราการไหลที่ไม่เท่ากัน .....	63



บทที่ 6 บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....	67
6.1 บทสรุปของไมโครแซนแนลรูปแบบตรงและรูปแบบโค้ง .....	67
6.1.1 เปรียบเทียบไมโครแซนแนลรูปแบบตรงและรูปแบบโค้งที่มีความยาวเท่ากัน.....	67
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต .....	68
รายการอ้างอิง .....	69
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	73



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละประเภท (Šalić and Zelić (2014)) .....	1
ตารางที่ 2.1 ค่าความเร็วของของไหลที่มีผลต่อรูปแบบการไหลทั้งแบบที่มีการลด Drag force (DRP) และไม่มีการลด Drag force (Al-Yaari et al. (2009)) .....	8
ตารางที่ 2.2 ผลการทดลองในอัตราการไหลที่แตกต่างกันในอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิด (Miyazaki et al. (2011)) .....	12
ตารางที่ 2.3 ค่ามุมสัมผัสที่มีผลต่อการแบ่งชั้นการไหลในค่าต่างๆ (Miyazaki et al. (2011)) .....	13
ตารางที่ 2.4 ค่าพื้นที่หน้าตัดทั้ง 3 แบบที่ใช้ในการทดลองและการคำนวณของ Aqueous และ Organic (Kriel et al. (2015)) .....	14
ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรที่ใช้กำหนดลักษณะของไมโครแชนแนล .....	47
ตารางที่ 5.2 ค่าการทดสอบความเร็วสูงสุดที่ขนาดกริดแตกต่างกัน .....	49
ตารางที่ 5.3 ค่าความดันตกคร่อม (Pa) ที่อัตราการไหล 0.01-0.2 mm <sup>3</sup> /s .....	51
ตารางที่ 5.4 พื้นที่หน้าตัดสถานะการไหลที่อัตราการไหลของน้ำและ Toluene ที่มีค่าไม่เท่ากัน .....	66

## สารบัญภาพ

รูปที่ 1.1 ลักษณะการไหลภายในไมโครรีแอกเตอร์ที่เป็นแบบของไหล 2 ชนิดที่แยกชั้นกัน .....	2
รูปที่ 1.2 แผนผังอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลของ Šalić and Zelić (2014).....	3
รูปที่ 1.3 ลักษณะการไหลภายในช่องไมโครรีแอกเตอร์ของ Yamamoto et al. (2014).....	3
รูปที่ 1.4 ตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆในการทดลอง (Yamamoto et al. (2014)) .....	4
รูปที่ 1.5 ประสิทธิภาพการสกัด Plutonium (IV) เทียบกับ contact time (Yamamoto et al. (2014)) .....	4
รูปที่ 2.1 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นที่ความเร็วของของไหลแตกต่างกัน (Barreto et al. (2015)) .....	7
รูปที่ 2.2 ความแตกต่างของความดันจะมีความสัมพันธ์กับค่ามุมสัมผัสที่จะมีค่าอยู่ระหว่างค่าที่เรียกว่า Advancing กับ Receding (Aota et al. (2007)) .....	9
รูปที่ 2.3 การคำนวณรูปแบบการไหลที่มีตัวนำทางภายในพื้นที่หน้าตัดที่มีขนาดแตกต่างกัน (Kositanont et al. (2013)).....	10
รูปที่ 2.4 a) ไม่มีการปรับปรุงผิวของไมโครแชนแนล, b) มีการปรับปรุงผิวของไมโครแชนแนล (Kositanont et al. (2013)).....	10
รูปที่ 2.5 พื้นผิวของผนังก่อนและหลังทำการปรับปรุง (Miyazaki et al. (2011)) .....	11
รูปที่ 2.6 สัดส่วนมวล Hexane ที่ทางออกของ Organic ที่สูงขึ้นหลังจากทำการเพิ่มความยาว (Miyazaki et al. (2011)) .....	12
รูปที่ 2.7 การปรับพื้นที่การไหลในช่องของไมโครรีแอกเตอร์ (Kriel et al. (2015)).....	14
รูปที่ 2.8 ปริมาณของ Platinum ที่ยังคงเหลืออยู่ในเฟสของ Aqueous (Kriel et al. (2015)).....	15
รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบปริมาณ Platinum ที่สกัดได้ที่ flow rate ratio ต่างๆ(Kriel et al. (2015)) .....	15
รูปที่ 2.10 สัดส่วนมวลที่ทางออกของเฟส Organic (Kriel et al. (2015)).....	16
รูปที่ 2.11 รูปร่างของ Microchannel (MCFI) ที่ทำการทดลอง (Kurt et al. (2015)) .....	16
รูปที่ 2.12 ประสิทธิภาพในการสกัดของไมโครรีแอกเตอร์รูปแบบต่างๆ (Kurt et al. (2015)).....	17
รูปที่ 2.13 ไมโครรีแอกเตอร์รูปแบบ Bend ที่ทำการทดลอง (Kurt et al. (2015)).....	17

รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสกัดระหว่าง MCFI กับ Bend (Kurt et al. (2015)) .....	18
รูปที่ 3.1 กฎอนุรักษ์มวลภายใน Element.....	19
รูปที่ 3.2 องค์ประกอบของความเค้นและความดันในแนวแกน $x$ .....	22
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ shear rate ในของไหลนิวโตเนียน .....	24
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแสดงด้วยพื้นที่แรเงา .....	27
รูปที่ 3.5 ทิศทางของความเร็วนวแกน $x$ ที่เป็นบวกหรือลบและการประมาณค่าที่ขอบ.....	29
รูปที่ 3.6 ทิศทางของความเร็วนวแกน $y$ ที่เป็นบวกหรือลบและการประมาณค่าที่ขอบ.....	30
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนในการคำนวณของ SIMPLE Algorithm .....	34
รูปที่ 4.1 ลักษณะรูปร่างของไมโครเซนแนลที่ทำการทดสอบตามงานวิจัยของ Kositanont et al. (2014) a) ลักษณะการโค้งงอของอุปกรณ์ b) ขนาดของพื้นที่หน้าตัด .....	36
รูปที่ 4.2 ลักษณะการแบ่งเฟสระหว่างของไหล 2 ชนิดที่ความเร็วต่างกัน ในงานของ Kositanont et al. (2014) โดยมีอัตราการไหลดังนี้ (a) 0.025 ml/min โดยมี Toluene ไหลที่วงนอก, (b) 0.025 ml/min โดยมี Water ไหลที่วงนอก, (c) 0.5 ml/min โดยมี Toluene ไหลที่วงนอก .....	37
รูปที่ 4.3 ลักษณะการแบ่งเฟสระหว่างของไหล 2 ชนิดที่ความเร็วต่างกัน ในงานที่ทำการสอบเทียบโดยมีอัตราการไหลดังนี้ (a) 0.025 ml/min โดยมี Toluene ไหลที่วงนอก, (b) 0.025 ml/min โดยมี Toluene ไหลที่วงใน, (c) 0.5 ml/min โดยมี Toluene ไหลที่วงนอก .....	38
รูปที่ 4.4 รูปแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของ Huh et al. (2009).....	39
รูปที่ 4.5 รูปแบบ Flow Pattern ที่อัตราการไหลแตกต่างจากการทดลองของ Huh et al. (2009).....	39
รูปที่ 4.6 กริดที่ใช้ในการคำนวณขนาด $5.0 \mu\text{m}$ .....	40
รูปที่ 4.7 รูปแบบการไหล Stable stratified flow ที่ได้จากการคำนวณ (รูปทางด้านซ้าย) เทียบกับการทดลอง (รูปทางด้านขวา) (Huh et al. (2009)).....	40
รูปที่ 4.8 รูปแบบ Flow Pattern Wavy stratified flow ที่ได้จากการคำนวณ (รูปทางด้านซ้าย) เทียบกับการทดลอง (รูปทางด้านขวา) (Huh et al. (2009)).....	41

รูปที่ 4.9 รูปแบบ Flow Pattern Detached stratified flow ที่ได้จากการคำนวณ(รูปทางด้านซ้าย) เทียบกับการทดลอง (รูปทางด้านขวา) (Huh et al. (2009)).....	41
รูปที่ 4.10 ขนาดของช่องทางการไหลที่ใช้ในการทดลองของ Yue et al. (2004).....	42
รูปที่ 4.11 ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองของ Yue et al. (2004).....	42
รูปที่ 4.12 ค่าความดันตกคร่อมจากการคำนวณเทียบกับผลการทดลองของ Yue et al. (2004)....	43
รูปที่ 4.13 ลักษณะการกระจายตัวของความดันภายในไมโครแชนแนล .....	43
รูปที่ 5.1 การไหลแบบ Slug flow ที่ต้องการอุปกรณ์ที่แยกของไหลทั้งสองชนิดออกจากกัน .....	45
รูปที่ 5.2 ไมโครแชนแนลรูปแบบตรง .....	46
รูปที่ 5.3 ไมโครแชนแนลที่มีรูปร่างโค้งรัศมีคงที่ .....	46
รูปที่ 5.4 ไมโครแชนแนลที่มีรูปร่างโค้งไม่รัศมีคงที่ .....	46
รูปที่ 5.5 ขนาดของพื้นที่หน้าตัดไมโครแชนแนล .....	47
รูปที่ 5.6 ตำแหน่งระนาบที่ทำการพิจารณาการหาขนาดกริดอิสระ .....	48
รูปที่ 5.7 Velocity profile ที่ทำการทดสอบที่ขนาดกริดที่แตกต่างกันบนระนาบที่ทำการพิจารณา.....	49
รูปที่ 5.8 ความดันตกคร่อมภายในไมโครแชนแนลรูปแบบตรง ที่อัตราการไหล 0.1 mm <sup>3</sup> /s.....	50
รูปที่ 5.9 ความดันตกคร่อมภายในไมโครแชนแนลรูปแบบรัศมีคงที่ ที่อัตราการไหล 0.1 mm <sup>3</sup> /s....	50
รูปที่ 5.10 ความดันตกคร่อมภายในไมโครแชนแนลรูปแบบรัศมีไม่คงที่ ที่อัตราการไหล 0.1 mm <sup>3</sup> /s.....	51
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับอัตราการไหลของไมโครแชนแนลทั้ง 3 รูปแบบ.....	52
รูปที่ 5.12 ตำแหน่งที่พิจารณาพื้นที่ผิวสัมผัสของไหลบนค่า Toluene Volume of Fraction เท่ากับ 0.5 .....	52
รูปที่ 5.13 ลักษณะพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลทั้งสองชนิดที่อัตราการไหล 0.01 mm <sup>3</sup> /s กับ 0.2 mm <sup>3</sup> /s ตามลำดับ (สีแดง คือ Toluene, สีน้ำเงิน คือ น้ำ) .....	53
รูปที่ 5.14 ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของไมโครแชนแนลรูปแบบตรง .....	53

รูปที่ 5.15 รูปร่างของพื้นผิวสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆในไมโครเซนแนลรูปแบบตรง .....	54
รูปที่ 5.16 การไหลที่กำหนดให้ Toluene มีตำแหน่งการไหลอยู่วงนอกและน้ำมีตำแหน่งการไหลอยู่วงในที่อัตราการไหล $0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$ .....	55
รูปที่ 5.17 การไหลที่กำหนดให้น้ำมีตำแหน่งการไหลอยู่วงนอกและ Toluene มีตำแหน่งการไหลอยู่วงในที่อัตราการไหล $0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$ .....	55
รูปที่ 5.18 รูปร่างพื้นที่หน้าตัดแต่ละตำแหน่งที่เกิดขึ้นภายในไมโครเซนแนลรูปแบบรัศมีคงที่ (Helix) ที่อัตราการไหล $0.08 \text{ mm}^3/\text{s}$ .....	56
รูปที่ 5.19 ความยาวของเส้นแบ่งเฟสที่เปลี่ยนแปลงตามความยาวของไมโครเซนแนลที่ .....	56
รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ของค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรกับอัตราการไหลของไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งที่รัศมีคงที่ .....	57
รูปที่ 5.21 การไหลที่กำหนดให้ Toluene มีตำแหน่งการไหลอยู่วงนอกและน้ำมีตำแหน่งการไหลอยู่วงในที่อัตราการไหล $0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$ .....	58
รูปที่ 5.22 การไหลที่กำหนดให้ Toluene มีตำแหน่งการไหลอยู่วงในและน้ำมีตำแหน่งการไหลอยู่วงนอกที่อัตราการไหล $0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$ .....	58
รูปที่ 5.23 รูปร่างพื้นที่หน้าตัดแต่ละตำแหน่งที่เกิดขึ้นภายในไมโครเซนแนลรูปแบบรัศมีไม่คงที่ (Spiral) ที่อัตราการไหล $0.08 \text{ mm}^3/\text{s}$ .....	59
รูปที่ 5.24 ความยาวของเส้นผิวสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงตามความยาวของไมโครเซนแนลที่ .....	59
รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ของค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรกับอัตราการไหลของไมโครเซนแนล .....	60
รูปที่ 5.26 อัตราการไหลและพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของไมโครเซนแนลทั้ง 3 รูปแบบ .....	60
รูปที่ 5.27 การไหลภายในไมโครเซนแนลที่รัศมีคงที่ที่อัตราการไหล $0.3 \text{ mm}^3/\text{s}$ .....	61
รูปที่ 5.28 แสดงการไหลภายในไมโครเซนแนลที่รัศมีไม่คงที่ที่อัตราการไหล $0.3 \text{ mm}^3/\text{s}$ .....	61
รูปที่ 5.29 ค่าความดันตกคร่อมของไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งที่ลดความยาวเทียบกับไมโครเซนแนลรูปแบบตรง .....	62
รูปที่ 5.30 ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสของไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งทั้ง 2 รูปแบบและรูปแบบตรง .....	62
รูปที่ 5.31 ไมโครเซนแนลแบบโค้งที่มีรัศมีคงที่ (Helix) ที่มีรอบการโค้งที่ 5 รอบ .....	63
รูปที่ 5.32 ไมโครเซนแนลแบบโค้งที่มีรัศมีไม่คงที่ (Spiral) ที่มีรอบการโค้งที่ 5 รอบ .....	63

รูปที่ 5.33 เส้นผิวสัมผัสที่บริเวณทางออกของไมโครเซนแนลแบบบรัคมีคองที่ ..... 64

รูปที่ 5.34 เส้นผิวสัมผัสที่บริเวณทางออกของไมโครเซนแนลแบบบรัคมีไม่คองที่โดยมีการโค้งที่ 5  
 รอบ..... 64



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$a$	ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการพีชคณิต
$A$	พื้นที่หน้าตัดปริมาตรควบคุม
$f$	แรงกระทำภายนอก, สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
$F$	แรง
$g$	แรงโน้มถ่วง
$H$	ความสูงของช่องทางการไหล
$L$	ความยาวของช่องทางการไหล
$P$	ความดัน
$Pe$	เพกเลตน์มเบอร์ (Peclet number)
$Re$	เรย์โนลด์์นัมเบอร์ (Reynolds number)
$S$	Source term
$T$	อุณหภูมิ
$u$	ความเร็วในแนวแกน $x$
$V$	ปริมาตรควบคุม
$w$	ความเร็วในแนวแกน $z$
$v$	ความเร็วในแนวแกน $y$
$x$	ระยะในแนวแกน $x$
$y$	ระยะในแนวแกน $y$
$z$	ระยะในแนวแกน $z$
$\phi$	ตัวแปรสเกลาร์
$\Gamma$	สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient)
$\mu$	ความหนืดพลศาสตร์ (Dynamic viscosity)
$\rho$	ความหนาแน่น
$\sigma$	ความเค้น
$\tau$	ความเค้นเฉือน
$\nu$	ความหนืดจลศาสตร์ (Kinematic viscosity)
$\alpha$	Under-relaxation



## ตัวห้อย (Subscripts)

$T, B, E, W, N, S$	จุดที่อยู่ข้างเคียงตามทิศ Top, Bottom, East, West, North และ South
$t, b, e, w, n, s$	ผิวของปริมาตรควบคุม
$x, y, z$	ทิศทางในแนวแกน $x, y, z$
$nb$	จุดต่อที่อยู่ข้างเคียง

## ตัวยก (Superscripts)

\*

Current value



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

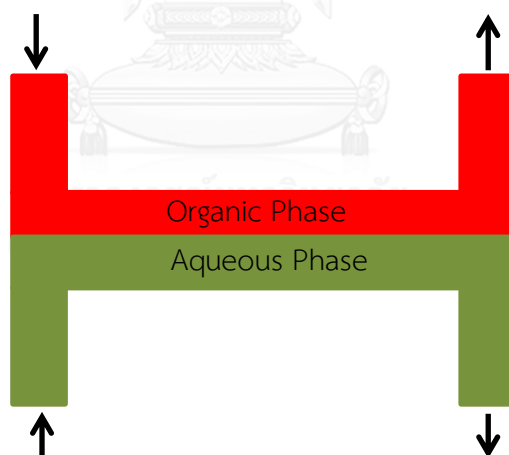
ในปัจจุบันเทคโนโลยีขนาดเล็กที่ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่มีลักษณะของการแลกเปลี่ยนความร้อน การแลกเปลี่ยนมวลหรือการสกัดสารเคมี กำลังเป็นที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเพราะเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูง อันเนื่องมาจากค่าสัดส่วนที่เทียบกันระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรมีค่าที่สูงและการมีขนาดที่เล็กส่งผลให้มี การควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมไหล การเกิดปฏิกิริยาที่มีความต่อเนื่องทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในอุปกรณ์ขนาดใหญ่ประเภท Batch Reactor ปรากฏดังในตารางที่ 1.1 (Šalić and Zelić (2014)) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอุปกรณ์ขนาดใหญ่เทียบกับอุปกรณ์ขนาดเล็ก

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละประเภท (Šalić and Zelić (2014))

ประเภทของอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อน	Shell and tube heat exchanger	Compact heat exchanger	Microchannel heat exchanger
พารามิเตอร์			
พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร $m^2/m^3$	50-100	850-1500	>1,500
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน $W/(m^2 K)$ (ของเหลว)	~5,000 (tube side)	3,000-7,000	>7,000
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน $W/(m^2 K)$ (ก๊าซ)	20-100	50-300	400-2,000
Approach temperature	~20 °C	~10 °C	<10 °C
รูปแบบการไหล	Turbulent	Turbulent	Laminar

นอกจากการพัฒนาของอุปกรณ์ประเภทแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วยังมีอุปกรณ์ที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาพร้อมกันคืออุปกรณ์ที่เรียกว่า ไมโครรีแอกเตอร์ (Micro reactor) หรือเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กโดยมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเช่น อุตสาหกรรมพลังงาน อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมเครื่องมือการแพทย์ ฯลฯ เนื่องมาจากการใช้สารตัวอย่างที่น้อย และการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของเทคโนโลยีในการขึ้นรูปจึงส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตอุปกรณ์ไมโครรีแอกเตอร์มีราคาที่ถูกลงกว่าเดิม

โดยการพัฒนาของอุปกรณ์ไมโครรีแอกเตอร์นั้นเริ่มมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอย่างจริงจังครั้งแรกเมื่อประมาณปลายศตวรรษที่ 19 เป็นการไหลภายในไมโครรีแอกเตอร์ที่สารทำปฏิกิริยาเป็นของเหลวกับของเหลวซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการไหลแบบต่อเนื่องที่มีพื้นที่หน้าตัดในการไหลอยู่ในระดับมิลลิเมตรทำให้สามารถควบคุมได้ง่ายมีความปลอดภัยและเกิดปฏิกิริยาได้ดี โดยการไหลของของไหลที่เป็น 2 เฟส ภายในไมโครรีแอกเตอร์ที่ได้รับการพัฒนาและเป็นที่ยอมรับคือการไหลของของไหลที่เป็นแบบของไหล 2 ชนิดที่ไม่ละลายเข้าหากันไหลคู่ขนานกันไปแล้วทำการแลกเปลี่ยนมวล หรือแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอุปกรณ์ (รูปที่ 1.1) โดยขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานดังที่จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



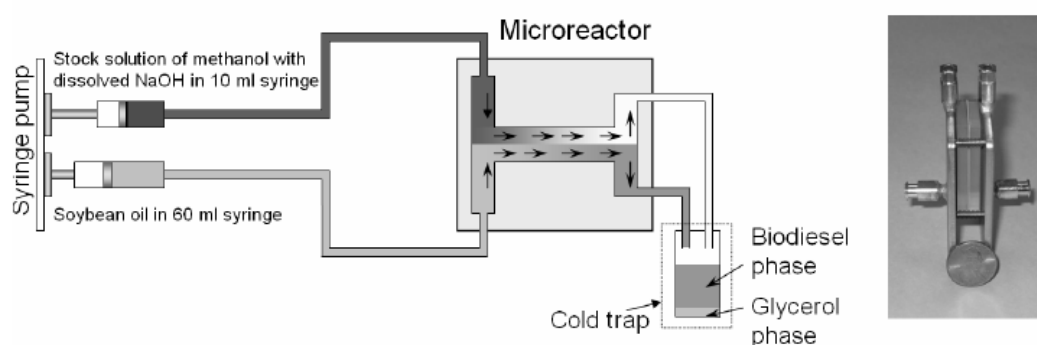
รูปที่ 1.1 ลักษณะการไหลภายในไมโครรีแอกเตอร์ที่เป็นแบบของไหล 2 ชนิดที่แยกชั้นกัน

## 1.2 การประยุกต์และทดลองใช้ในอุตสาหกรรม

เนื่องจากข้อดีของไมโครรีแอกเตอร์ที่ได้กล่าวมาในข้างต้นส่งผลให้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วยกตัวอย่างเช่น ในอุตสาหกรรมพลังงานมีการใช้ไมโครรีแอกเตอร์ในการผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรเจน โดยใช้ของเหลวประเภทไฮโดรคาร์บอนกับไอน้ำมาทำปฏิกิริยากันภายใน

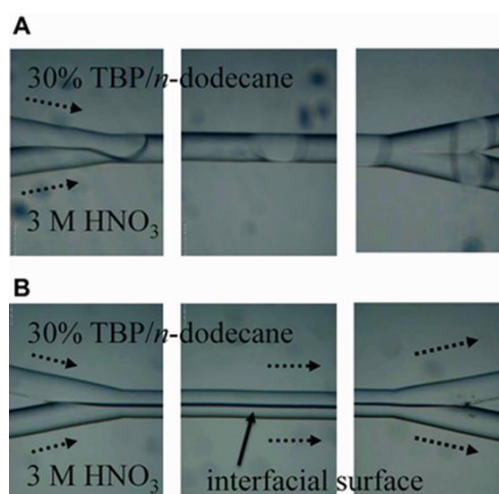
อุปกรณ์เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนเพื่อส่งให้กับ PEMFC (polymer electrolyte membrane fuel cell) เพื่อนำไปประยุกต์เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็กหรือยานพาหนะต่างๆ

นอกจากนั้นยังมีการทดลองใช้ไมโครรีแอกเตอร์ในการผลิตไบโอดีเซลเทียบกับในระดับอุตสาหกรรมด้วยโดยในแง่ของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง Šalić and Zelić (2014) ได้ทำการทดลองโดยใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดกว้าง : ยาว : สูง เท่ากับ 50.8 cm : 40.64 cm : 20.32 cm ซึ่งสามารถที่จะผลิตไบโอดีเซล ออกมาได้ 12 ml/min หรือ 17.28 l/day ตามรูปที่ 1.2

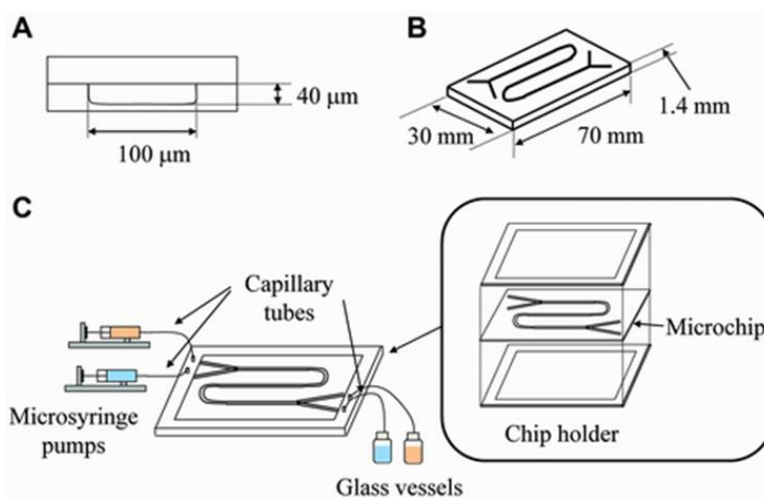


รูปที่ 1.2 แผนผังอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลของ Šalić and Zelić (2014)

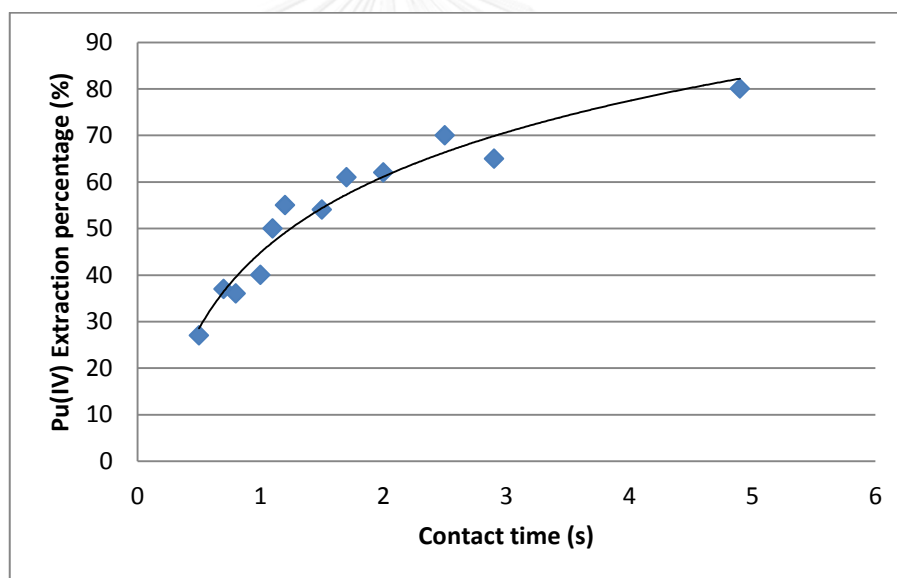
การคิดค้นไมโครรีแอกเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการสกัด Plutonium (IV) โดย Yamamoto et al. (2014) ระหว่างสารละลาย 2 ชนิดคือ tri-n-butylphosphate กับ nitric acid ไหลคู่ขนานกันตามรูปที่ 1.3 และ 1.4 ก็เป็นอีกวิธีที่กำลังได้รับความนิยมและพัฒนาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเนื่องจากใช้ Contact Time ที่น้อยลงและให้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นมากกว่ารูปที่ 1.5



รูปที่ 1.3 ลักษณะการไหลภายในช่องไมโครรีแอกเตอร์ของ Yamamoto et al. (2014)



รูปที่ 1.4 ตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆในการทดลอง (Yamamoto et al. (2014))



รูปที่ 1.5 ประสิทธิภาพการสกัด Plutonium (IV) เทียบกับ contact time (Yamamoto et al. (2014))

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการทำวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษารูปแบบการไหลและพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลทั้งสองชนิดภายในไมโครแชนแนลที่มีลักษณะโค้ง
2. ลดการผสมกันของของไหลสองชนิดที่บริเวณทางออกของอุปกรณ์เพื่อลดภาระงานของอุปกรณ์แยกสารในกระบวนการถัดไป

3. ออกแบบอุปกรณ์ให้มีขนาดที่เล็กลงโดยที่ของไหลทั้งสองชนิดยังคงสภาวะแยกชั้นกัน

#### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลที่แตกต่างกันภายในไมโครแชนแนลที่มีลักษณะโค้งที่มีต่อพื้นที่ผิวสัมผัสของๆไหลทั้งสองชนิดต่อปริมาตรรวมด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT 15.0

2. ศึกษาการแยกชั้น Toluene กับ Water โดยควบคุมอัตราการไหลเข้าอุปกรณ์เพื่อให้ภายในเป็นการไหลแบบราบเรียบ 3 มิติ

3. ศึกษาอิทธิพลแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในรูปแบบโค้งที่มีรัศมีที่ต่างกัน และเทียบค่าพื้นที่ผิวสัมผัสของๆไหลทั้งสองชนิดต่อปริมาตรรวมของอุปกรณ์

4. ศึกษาขนาดของไมโครรีแอกเตอร์ที่มีขนาดที่เล็กลงแต่ยังคงค่าพื้นที่ผิวสัมผัสของๆไหลให้มีขนาดเท่าเดิมอันเนื่องมาจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเมื่อเทียบกับแบบตรง

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับทราบถึงอิทธิพลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่มีผลต่อการแยกชั้นของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

2. ได้รับทราบถึงอิทธิพลของอัตราการไหลที่มีผลต่อการแบ่งชั้นในช่องทางการไหลรูปแบบโค้งขนาดเล็ก

3. นำผลการศึกษาที่ได้รับไปพัฒนาไมโครแชนแนลที่ให้ค่าสัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสของๆไหลทั้งสองชนิดต่อปริมาตรรวมและค่าสมรรถนะพื้นที่ผิวสัมผัสต่อค่าความดันตกคร่อมที่มากขึ้นกว่าแบบตรง

#### 1.6 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูล และรูปแบบของไมโครรีแอกเตอร์ในรูปแบบต่างๆที่มีการใช้อยู่
2. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหลภายในช่องขนาดเล็ก
3. ทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม ANSYS FLUENT กับผลการทดลอง และงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อหาความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้คำนวณ
4. ทำการสร้างรูปแบบที่พิจารณาและทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อการไหลภายในไมโครรีแอกเตอร์เช่น อัตราการไหล รูปแบบไมโครแชนแนล ค่าความดันตกคร่อม ค่าสมรรถนะ เป็นต้น
5. สรุปการวิจัยและวิเคราะห์ผลการศึกษาถึงความเหมาะสมในการเลือกใช้ไมโครแชนแนลแต่ละรูปแบบ
6. นำเสนอผลงานและจัดทำรูปเล่ม

## บทที่ 2

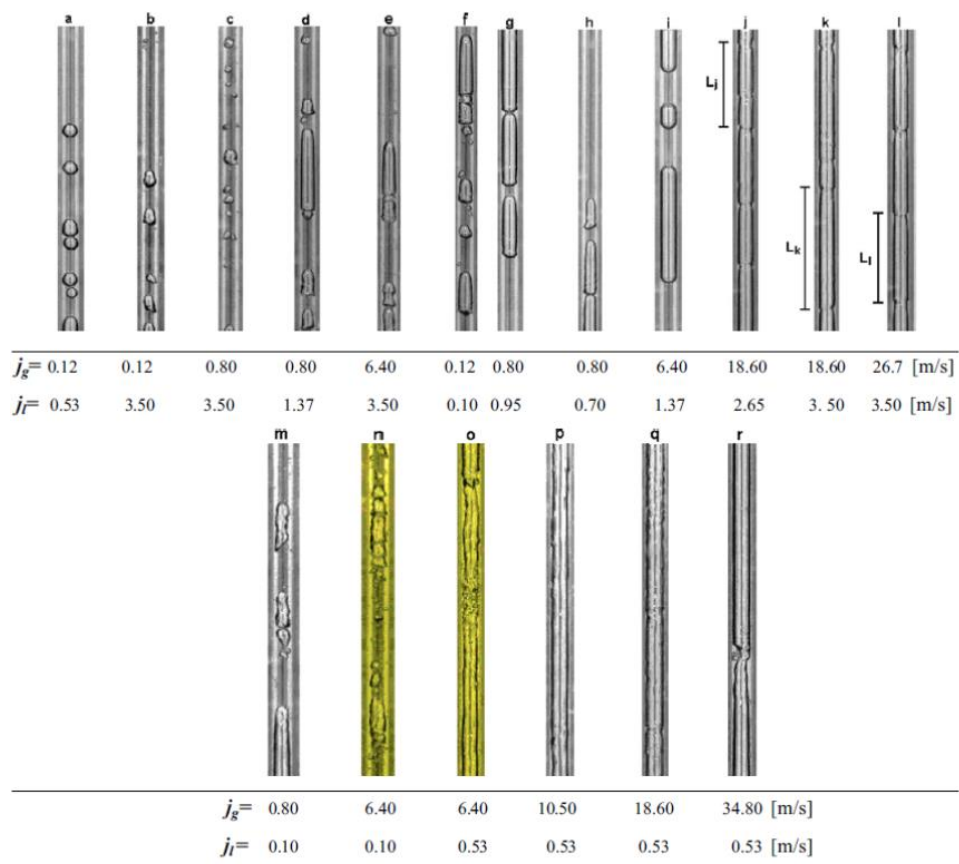
### การศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการไหลภายในไมโครแชนแนลพบว่ามีการศึกษาตัวแปรต่างๆที่ หลากหลายเช่น การปรับค่ามุมสัมผัสระหว่างของไหล การปรับรูปร่างของอุปกรณ์ ทางผู้วิจัยจึงแยก การศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 หัวข้อดังนี้

1. ผลการศึกษางานวิจัยที่เป็นการปรับปรุงภายในช่องทางการไหลได้แก่ การปรับปรุงพื้นผิว ให้มีค่ามุมสัมผัสมากขึ้น การใส่ตัวนำทางลงไปภายในไมโครแชนแนล เป็นต้น
2. ผลการศึกษางานวิจัยที่เป็นการปรับปรุงรูปร่างและพื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์ได้แก่ การ ปรับสัดส่วนพื้นที่หน้าตัด การปรับลักษณะการโค้ง เป็นต้น

#### 2.1 ผลการศึกษางานวิจัยที่เป็นการปรับปรุงภายในช่องทางการไหล

โดยทั่วไปอุปกรณ์ไมโครรีแอกเตอร์ได้ถูกพัฒนาโดยให้ของไหลทั้งสองชนิดคือ สารละลาย ประเภทอินทรีย์กับสารละลายที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบหลักมีการไหลแบบแยกชั้นที่ชัดเจนและให้ผล การสกัดที่ต้องการดีมากยิ่งขึ้น เพื่อที่จะเป็นการลดภาระให้กับการบำบัดขั้นหลังในกระบวนการถัดไป โดยงานพัฒนาอุปกรณ์ไมโครรีแอกเตอร์นั้นได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเช่น Barreto et al. (2015) ได้ทำการทดสอบของไหล 2 ชนิด คืออากาศกับน้ำภายในไมโครรีแอกเตอร์ที่อัตราการไหลภายในช่วง 0.1-3.5 m/s สำหรับน้ำ และช่วง 0.1-34.8 m/s สำหรับอากาศโดยเป็นการไหลภายในท่อที่มีรัศมี 1.2 mm พบว่าการไหลที่ความเร็วต่ำกว่า 14.5 m/s จะเกิดการไหลแบบ Bubbly, Slug, Churn ส่วนการไหลแบบ Annular ที่ชัดเจนนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อถ้ามีความเร็วมากกว่า 18.6 m/s.ซึ่งรูปแบบ การไหลที่ความเร็วที่แตกต่างกันนี้แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นที่ความเร็วของของไหลแตกต่างกัน (Barreto et al. (2015))

Al-Yaari et al. (2009) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ Drag Reducing Polymer โดยทำการเทียบ Flow pattern ภายในท่อขนาด 2.54 cm ที่มีความเร็วของไหลที่ทางเข้าในช่วง 0.1-0.9 m/s โดยได้ข้อสรุปว่าของไหลน้ำและน้ำมันจะสามารถคงตัวแยกชั้นได้ดีกว่าตัวที่ไม่มี Drag reducing Polymer โดยในการทดสอบผลที่ความเร็วน้ำ 0.15 m/s, 0.2 m/s และความเร็วน้ำมัน 0.85 m/s, 0.8 m/s (ตารางที่ 2.1) ให้ผลที่ดีที่สุด ในส่วนของวัสดุนั้นได้มีการทำการทดสอบวัสดุที่นำมาใช้ทำช่องทางการไหลโดยทดสอบในท่อที่ทำจากวัสดุที่ต่างชนิดกันคือ สแตนเลส กับ อคริลิก ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว โดยทำการทดสอบที่ความเร็วของของไหลผสมที่ 0.2-3.9 m/s และสัดส่วน Water Volume Fraction ที่ 6-86% โดยผลที่ได้มีตั้งแต่แยกชั้นกันชัดเจนจนไปถึงยังคงสถานะเป็นของไหลผสม



ตารางที่ 2.1 ค่าความเร็วของของไหลที่มีผลต่อรูปแบบการไหลทั้งแบบที่มีการลด Drag force (DRP) และไม่มีการลด Drag force (Al-Yaari et al. (2009))

Experimental matrix and flow pattern.

$U_{SW}$ (m/s)	$U_{SO}$ (m/s)	Flow pattern without DRP	Flow pattern with DRP
0.15	0.85	SW	S
0.2	0.8	SW	S
0.25	0.75	SW	SW
0.3	0.7	SW	SW
0.35	0.65	SWD	SW
0.4	0.6	SWD	SW
0.45	0.55	SWD	SW
0.5	0.5	SWD	SW
0.55	0.45	3L	SW
0.6	0.4	3L	SWD
0.65	0.35	3L	SWD
0.7	0.3	3L	SWD
0.75	0.25	SMW	SWD
0.8	0.2	SMW	SWD
0.85	0.15	SMW	SWD
0.9	0.1	SMW	SWD

**S:** Smooth Stratified flow.

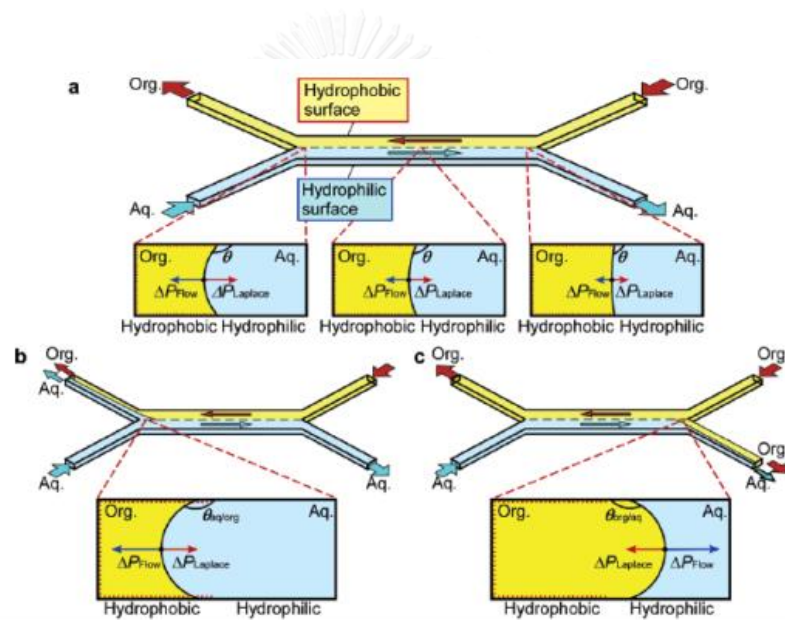
**SW:** Stratified Wavy flow.

**SWD:** Stratified Wavy flow with some droplets in the interface region.

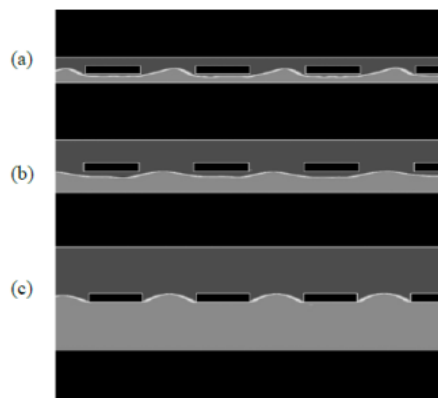
**SMW:** Stratified flow (mixed layer in the upper part of the tube and separated water layer in the bottom part).

**3L:** Three layers flow. There are clear oil and water layers at the top and bottom of the pipe respectively with a dispersed layer between them.

Aota et al. (2007) ได้ทำการศึกษากลไกทางกายภาพของของไหลสองชนิดคือ Toluene กับ น้ำที่ไหลสวนทางกันโดยได้ผลสรุปว่าที่ความดันที่มีค่าแตกต่างกันน้อยจะมีเส้นแบ่งเฟส (Separate Line) ที่ชัดเจนโดยความแตกต่างของความดันนั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่ามุมสัมผัสที่จะมีค่าอยู่ระหว่าง Advancing กับ Receding มุมสัมผัส (รูปที่ 2.2) จนกระทั่งความดันแตกต่างกันมากขึ้น จนถึงจุดหนึ่งของไหลจะเกิดการแพร่กระจายเข้าไปในอีกเฟสหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีการทดลอง Flow pattern ในรูปแบบ Model Serpentine ของ Angeli and Hewitt (1999) โดยได้ข้อสรุปว่าที่ความเร็วต่ำๆ จะมีการไหลเป็นแบบ Slug flow และ Droplet flow ส่วนตำแหน่งในการป้อนของไหลภายในไมโครรีแอกเตอร์นั้น พบว่าเมื่อนำของไหลที่มีค่าความหนืดที่น้อยกว่าไหลอยู่ตรงกลางช่องทาง การไหลจะส่งผลให้ได้รูปแบบการไหลที่มีเส้นแบ่งสภาวะที่เสถียรกว่า



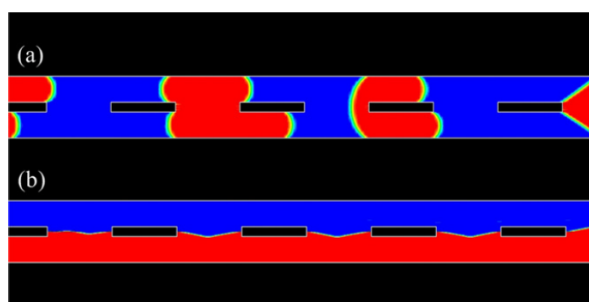
รูปที่ 2.2 ความแตกต่างของความดันจะมีความสัมพันธ์กับค่ามุมสัมผัสที่จะมีค่าอยู่ระหว่างค่าที่เรียกว่า Advancing กับ Receding (Aota et al. (2007))



รูปที่ 2.3 การคำนวณรูปแบบการไหลที่มีตัวนำทางภายในพื้นที่หน้าตัดที่มีขนาดแตกต่างกัน  
(Kositanont et al. (2013))

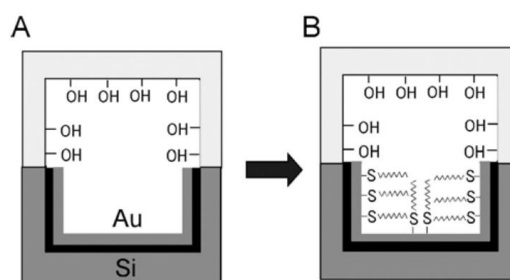
สำหรับการพัฒนาช่องทางการไหลและพื้นผิวที่ผนังของอุปกรณ์ไมโครรีแอกเตอร์เพื่อให้ของไหลสองชนิดสามารถไหลคู่ขนานกันได้นั้นที่ผ่านมามีผู้ที่ทำการค้นคว้ามากมายซึ่งในที่นี่ได้ยกมา 2 งานวิจัย ดังนี้

Kositanont et al. (2013) ทำการใส่โครงสร้างนำทางลงในช่องทางการไหลที่มีขนาดของพื้นที่หน้าตัดที่แตกต่างกัน (รูปที่ 2.3) และเคลือบผิวของไมโครเซนแนลที่ทำจากกระจกด้วยวิธี Silanization เพื่อเพิ่มค่ามุมสัมผัสของของไหลระหว่าง Toluene กับน้ำจาก  $37^\circ$  เป็น  $143^\circ$  ส่งผลให้ของไหลทั้งสองชนิดยังคงสภาวะแบ่งแยกชั้นอย่างชัดเจนที่อัตราการไหลต่ำลงที่ 0.0005 ml/min ตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 a) ไม่มีการปรับปรุงผิวของไมโครเซนแนล, b) มีการปรับปรุงผิวของไมโครเซนแนล  
(Kositanont et al. (2013))

Miyazaki et al. (2011) ได้ทำการทดลองเคลือบผิวผนังของอุปกรณ์ด้วย Au และปรับปรุงพื้นผิวด้วย Octadecanethiol บนผนังภายในอุปกรณ์ส่วนที่เป็น Silicon ที่เป็นช่องทางการไหลของ Organic ตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 พื้นผิวของผนังก่อนและหลังทำการปรับปรุง (Miyazaki et al. (2011))

โดยผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ว่าที่อัตราการไหล 0.01-100  $\mu\text{L}/\text{min}$  ในอุปกรณ์ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวจะสามารถให้การไหลแบบแยกชั้นที่มีผลแบบเสถียรได้แต่ถ้าไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวจะให้การไหลที่เสถียรได้แค่ที่อัตราการไหล 100  $\mu\text{L}/\text{min}$  โดยช่วงอื่นจะเป็นการไหลแบบ Slug Flow ตามตารางที่ 2.2

นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Miyazaki et al. (2011) ยังได้ทำการทดลองเพิ่มความดันลดที่ทางออกของอุปกรณ์ 2 ช่องทางให้มีค่าที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อทำการต่อท่อทางออกของอุปกรณ์ด้าน Silicon ที่เป็นช่องทางการไหลของ Organic ออกไปให้ยาวกว่าทางออกของ Aqueous ที่เป็นด้าน Glass อีก 10 cm สามารถให้ประสิทธิภาพในการแยกของไหลได้เพิ่มขึ้นโดยเทียบจากสัดส่วนมวล Organic ที่ทางออกของ Silicon มีค่าเพิ่มขึ้นตามรูปที่ 2.6

ตารางที่ 2.2 ผลการทดลองในอัตราการไหลที่แตกต่างกันในอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิด

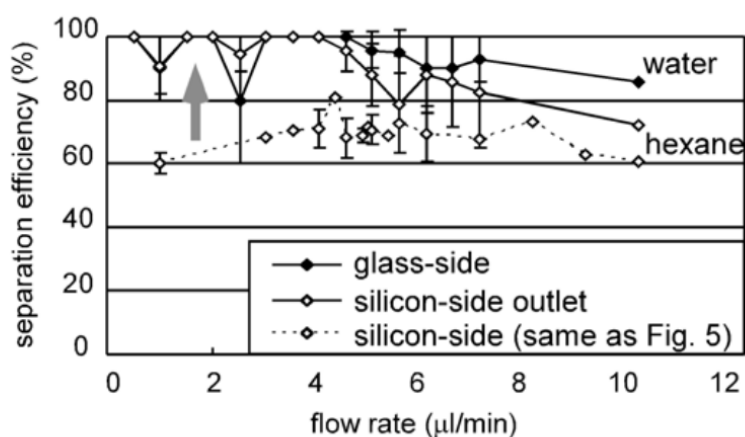
(Miyazaki et al. (2011))

อัตราการไหลของ ของไหลแต่ละชนิด ( $\mu\text{L}/\text{min}$ )	มีการปรับปรุงพื้นผิว Octadecanethiol SAM	ไม่มีการปรับปรุง พื้นผิว Octadecanethiol SAM	Reynolds Number (น้ำ)
0.01	OK	NG	0.001
0.05	OK	NG	0.006
0.1	OK	NG	0.01
0.5	OK	NG	0.06
1	OK	NG	0.1
5	OK	NG	0.6
10	OK	NG	1
50	OK	NG	6
100	OK	OK	10

OK: ให้ผลการไหลแบบแยกชั้นที่เสถียร

NG: ให้ผลการไหลแบบแยกชั้นที่เป็น Slug flow

SAM: Self Assembled Monolayer

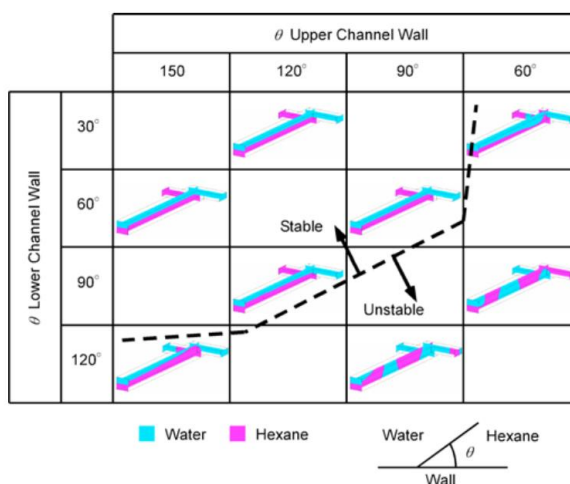


รูปที่ 2.6 สัดส่วนมวล Hexane ที่ทางออกของ Organic ที่สูงขึ้นหลังจากทำการเพิ่มความยาว

(Miyazaki et al. (2011))

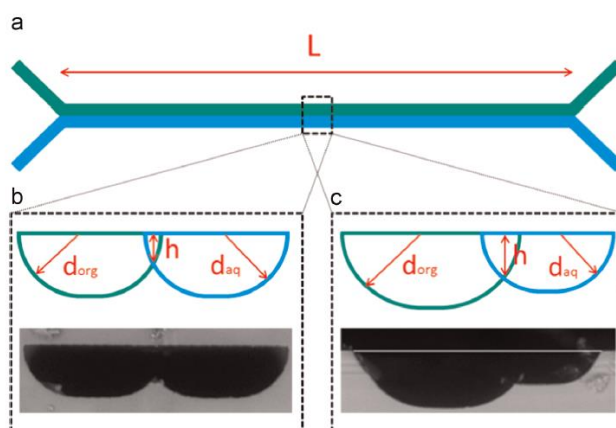
ในส่วนของการคำนวณนั้นได้ศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากค่ามุมสัมผัสของของไหลทั้ง 2 ชนิด จะส่งผลกระทบต่อการไหลที่แยกชั้นที่ชัดเจนและเสถียรขนาดไหนโดยได้ใช้ Volume of Fluid หรือ VOF model ในการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์โดยได้ค่าตามตารางที่ 2.3 มุมสัมผัสของช่องการไหลล่าง (Hexane) ที่น้อยกว่า  $120^\circ$  และช่องการไหลบน (Water) ที่มีมุมสัมผัสมากกว่า  $60^\circ$  จะให้ผลการไหลแบบแยกชั้นที่เสถียร

ตารางที่ 2.3 ค่ามุมสัมผัสที่มีผลต่อการแบ่งชั้นการไหลในค่าต่างๆ (Miyazaki et al. (2011))



## 2.2 ผลการศึกษางานวิจัยที่เป็นการปรับปรุงรูปร่างและพื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์

อุปกรณ์ประเภทไมโครรีแอกเตอร์ที่มีรูปร่างโค้งงอถือได้ว่าเป็นการใช้งานในลักษณะที่ได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากให้ประสิทธิภาพที่ดี โดยที่ผ่านมามีการทำวิจัยในเรื่องของรูปร่างและพื้นที่หน้าตัดเช่น Kriel et al. (2015) ได้ทำการทดลองด้วยวิธีการสกัด Platinum (Pt) (IV) จากเฟส Aqueous สู่เฟส Organic โดยมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปครึ่งวงกลมที่รัศมีแตกต่างกันภายในไมโครรีแอกเตอร์ตามรูปที่ 2.7 และตารางที่ 2.4 โดยช่องทางการไหลจะเริ่มปรับตั้งแต่ขนาดของช่องการไหลทั้ง 2 เท่ากันและปรับช่องการไหลของ Aqueous ให้มีขนาดเล็กลง



รูปที่ 2.7 การปรับพื้นที่การไหลในช่องของไมโครรีแอกเตอร์ (Kriel et al. (2015))

ตารางที่ 2.4 ค่าพื้นที่หน้าตัดทั้ง 3 แบบที่ใช้ในการทดลองและการคำนวณของ Aqueous และ Organic (Kriel et al. (2015))

Chip	$d_{aq}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{org}$ ( $\mu\text{m}$ )	$R$		
			Calculation		Exp.
			$D = \frac{4A}{P}$	$D \cong \frac{4d}{3}$	
A	40	40	0.56	0.56	0.6
B	39	56	2.24	2.38	2.2
C	30	58	6.9	7.82	5.7

$R$  = flow rate ratio (Organic/Aqueous)

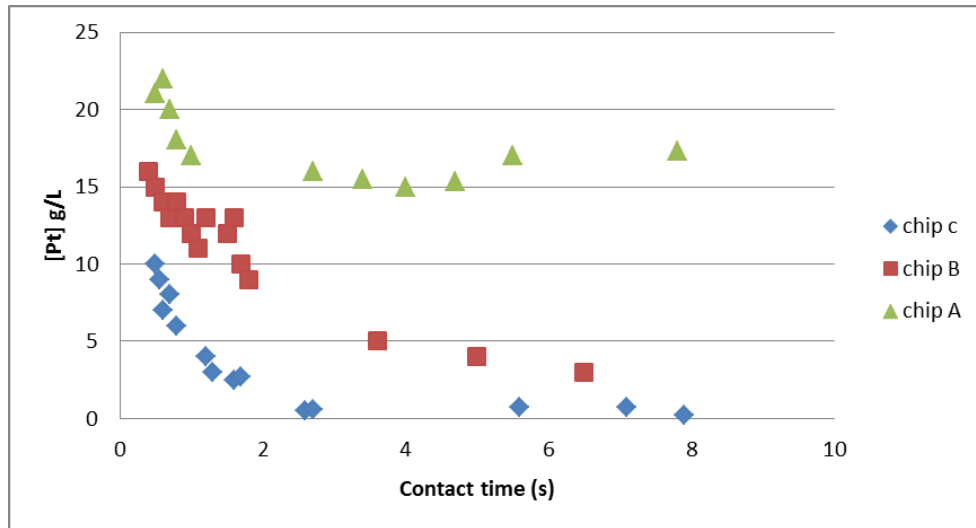
$A$  = cross section area

$D$  = hydraulic diameter

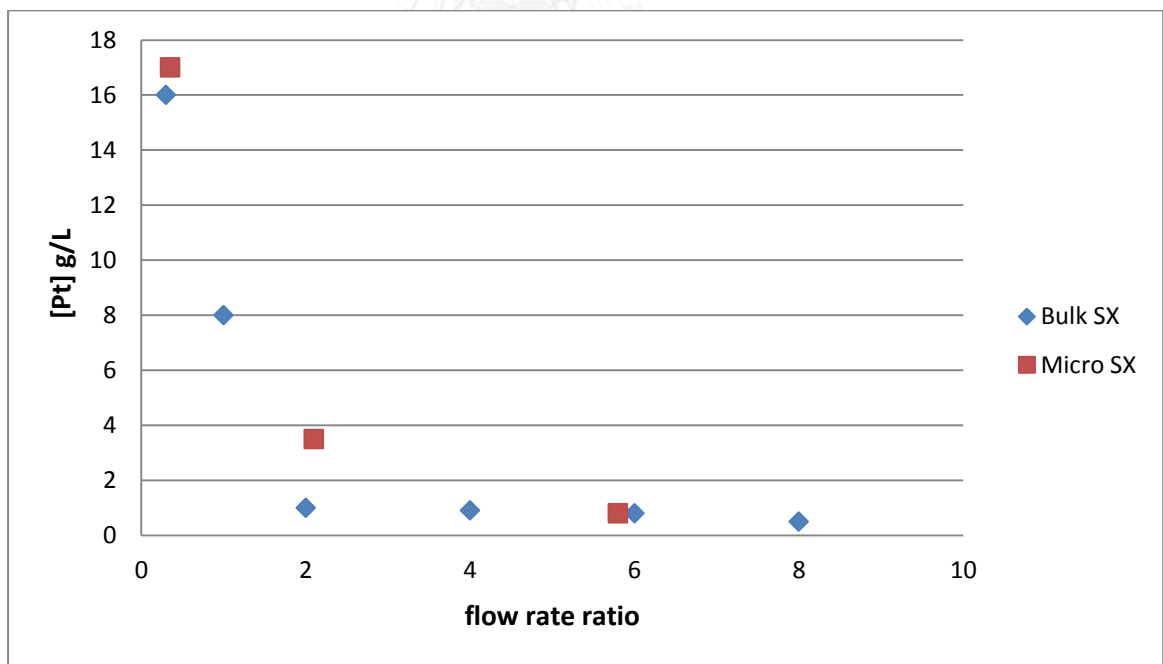
$P$  = Hydrodynamic pressure drop

โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า Chip C เป็นแบบที่ให้ผลการสกัด Platinum (IV) ที่ดีที่สุดจากรูปที่ 2.8 แสดงถึงปริมาณของ Platinum ที่ยังคงเหลืออยู่ในเฟสของ Aqueous ที่ Contact Time ต่างๆ และยังได้ทำการเทียบความสามารถของอุปกรณ์ที่เป็นแบบ Microsx (Micro solvent

extraction) กับอุปกรณ์ที่เป็นแบบ Bulks (การนำสารสองชนิดมาใส่ภาชนะแล้วทำการเขย่าและปล่อยให้เกิดการแยกชั้น) โดยพบว่าอุปกรณ์แบบ Microsx ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าตามรูปที่ 2.9



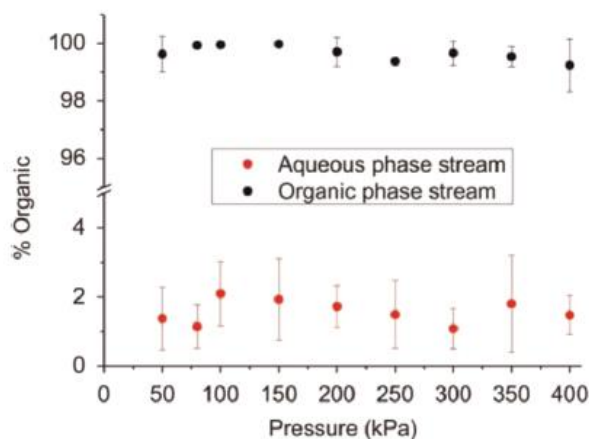
รูปที่ 2.8 ปริมาณของ Platinum ที่ยังคงเหลืออยู่ในเฟสของ Aqueous (Kriel et al. (2015))



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบปริมาณ Platinum ที่สกัดได้ที่ flow rate ratio ต่างๆ(Kriel et al. (2015))

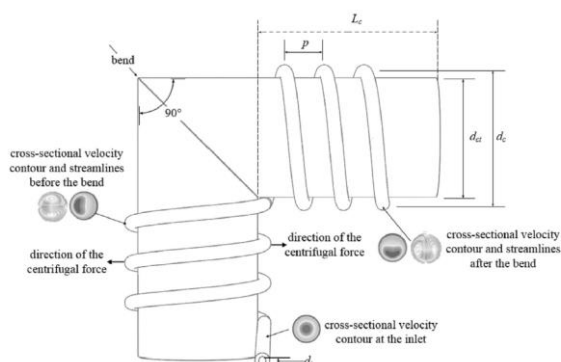


นอกจากนี้ Kriel et al. (2015) ยังได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าความดันที่ด้านทางเข้าระหว่าง 50-400 kPa เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อ การแบ่งแยกชั้นของของไหลทั้งสองชนิดโดยพบว่าในช่วงของการทดลองนั้นที่ทางออกของเฟส Aqueous จะมีเฟส Organic ปะปนอยู่น้อยกว่า 4% แต่ที่ทางออกของเฟส Organic จะมีเฟส Aqueous ปะปนอยู่น้อยกว่า 2% ตามรูปที่ 2.10



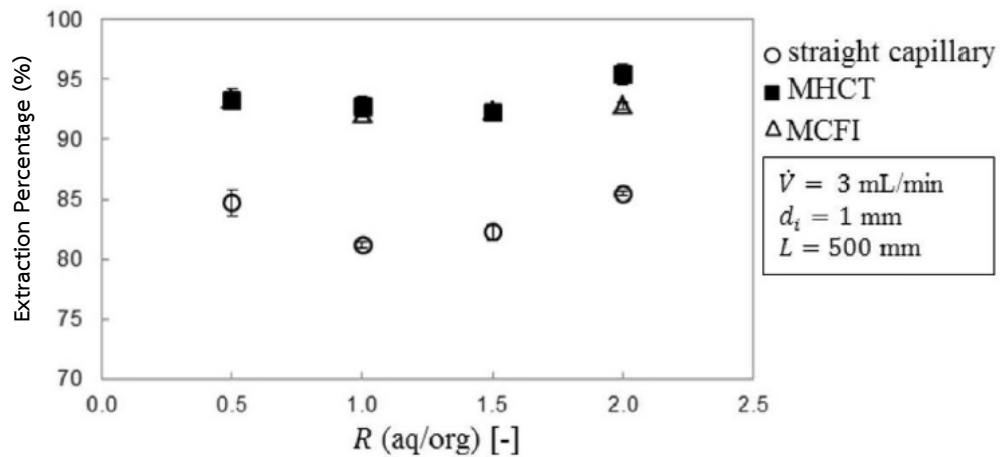
รูปที่ 2.10 สัดส่วนมวลที่ทางออกของเฟส Organic (Kriel et al. (2015))

นอกจากการปรับเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดแล้วยังคงมีการทดลองหลายรูปแบบเพื่อที่จะทำการเพิ่มประสิทธิภาพโดยล่าสุด Kurt et al. (2015) ได้ทำการทดลอง Micro extraction แบบการไหลในลักษณะที่เป็น Slug Flow ของช่องทางการไหลที่มีลักษณะการวางตัวในรูปแบบโค้งเป็นเกลียวสปริงในแนวตรง (Microstructure helically coiled tube, MHCT) เทียบกับโค้งเป็นเกลียวสปริงที่มีการหักมุม 90° องศา (Microstructure coiled flow inverter, MCFI) ตามรูปที่ 2.11



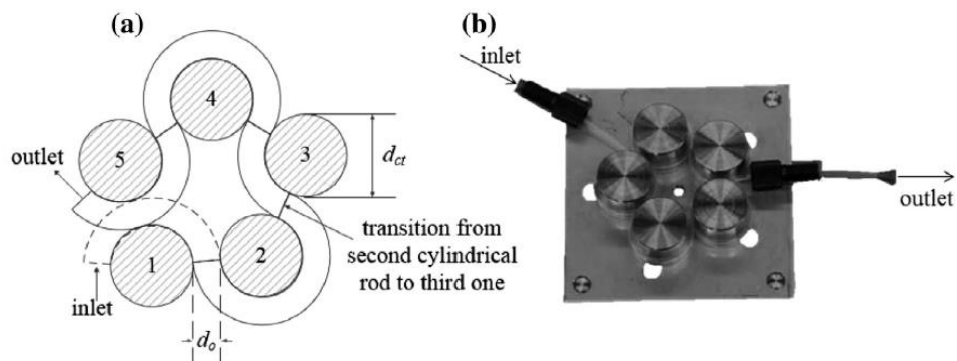
รูปที่ 2.11 รูปร่างของ Microchannel (MCFI) ที่ทำการทดลอง (Kurt et al. (2015))

หลังจากทำการทดลองเสร็จจึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งสามแบบได้แก่ แบบตรง แบบเกลียว และแบบเกลียวที่มีการงอ  $90^\circ$  โดยได้ผลการทดลองตามรูปที่ 2.12 ที่แสดงว่ารูปแบบโค้งเป็นเกลียวสปริงในแนวตรง (MHCT) ให้ผลการสกัดที่ดีที่สุด

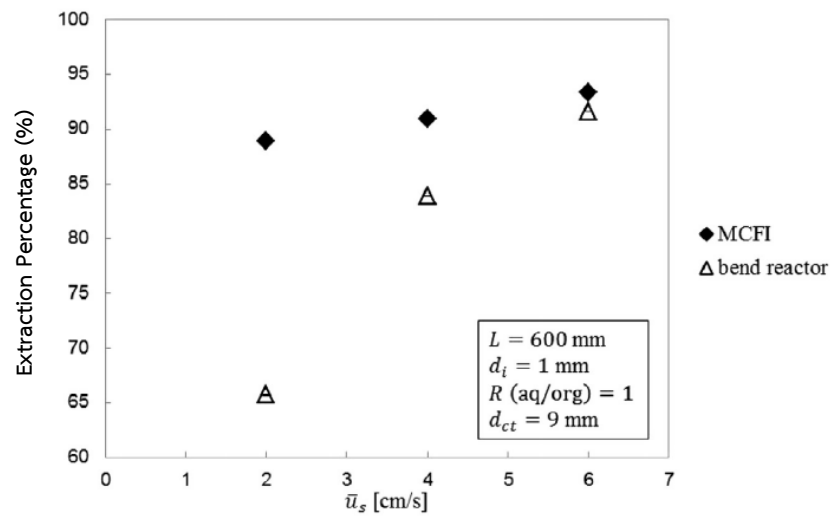


รูปที่ 2.12 ประสิทธิภาพในการสกัดของไมโครรีแอกเตอร์รูปแบบต่างๆ (Kurt et al. (2015))

โดยรูปแบบสุดท้ายที่ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดคือ ไมโครรีแอกเตอร์แบบ Bend ที่เป็นการโค้งแบบซ้ายขวาสลับกันตามรูปที่ 2.13 และเปรียบเทียบผลการสกัดตามรูปที่ 2.14 พบว่าการโค้งที่ไปในทิศทางเดียวกันแบบลักษณะโค้งเป็นเกลียวสปริงที่มีการหักมุม  $90^\circ$  องศา (MCFI) จะให้ผลในการสกัดที่ดีกว่าการโค้งสลับซ้ายขวา (Bend)



รูปที่ 2.13 ไมโครรีแอกเตอร์รูปแบบ Bend ที่ทำการทดลอง (Kurt et al. (2015))



รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสกัดระหว่าง MCFI กับ Bend (Kurt et al. (2015))



## บทที่ 3

### ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการจำลองของไหลตามคุณสมบัติของของไหลและลักษณะของสนามการไหลที่พิจารณา โดยใช้หลักการของกฎอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ (conservation laws of physics) ซึ่งจะทำให้สามารถสรุปออกมาเป็นสมการควบคุมพื้นฐานตามกฎการอนุรักษ์ทั้ง 3 ข้อ คือ

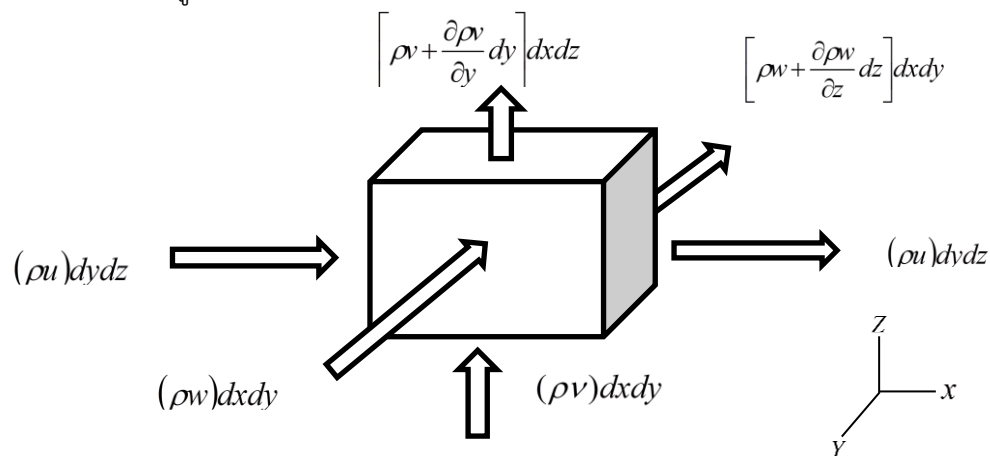
1. การอนุรักษ์มวล (conservation of mass)
2. การอนุรักษ์โมเมนตัม (conservation of momentum)
3. การอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy)

โดยกฎทั้ง 3 ข้อ นี้จะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยและพิจารณาให้อยู่ในรูปที่มีความต่อเนื่องกัน (Continuum) หรือกล่าวได้ว่าจะเป็นการพิจารณาในระดับมหภาคโดยคุณสมบัติที่จะนำมาพิจารณาได้แก่ ความเร็ว ความดัน ความหนาแน่น ค่าแรงตึงผิว เป็นต้น ส่วนในระดับอนุภาคที่พิจารณาเรื่อง โครงสร้างโมเลกุล พันธะของแขนอะตอม ช่องว่างระหว่างโมเลกุล จะไม่ทำการพิจารณาเนื่องจากมีผลต่อการไหลที่น้อยและจะทำให้สมการไม่มีความต่อเนื่อง

### 3.1 สมการควบคุม (Governing equation)

#### 3.1.1 กฎอนุรักษ์มวล (The law of mass conservation)

กฎอนุรักษ์มวลนั้นจะกล่าวถึง สมการอนุพันธ์ย่อยที่อ้างอิงบนพื้นฐานที่ว่ามวลนั้นไม่สูญหายไปโดยพิจารณาจากรูปที่ 3.1 ที่แสดง Flux ของมวลที่ไหลผ่าน Element หรือปริมาตรควบคุมขนาดเล็กที่แสดงอยู่บนสนามการไหลแบบ Cartesian coordinate



รูปที่ 3.1 กฎอนุรักษ์มวลภายใน Element

จากรูปที่ 3.1 เมื่อพิจารณาพร้อมกับกฎอนุรักษ์มวลโดยกำหนดให้มวลที่ไหลเข้าปริมาตรควบคุมเป็นบวกจะสามารถกล่าวได้ว่า

อัตราการไหลเข้าของมวลในปริมาตรควบคุม - อัตราการไหลออกของปริมาตรควบคุม = อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุม

เมื่อพิจารณาแยกตามระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinates) จะได้สมการดังนี้

Conservation of mass on  $x$  axis

$$(\rho u)dydz - \left[ \rho u + \frac{\partial \rho u}{\partial x} dx \right] dydz \quad (3.1)$$

Conservation of mass on  $y$  axis

$$(\rho v)dx dz - \left[ \rho v + \frac{\partial \rho v}{\partial y} dy \right] dx dz \quad (3.2)$$

Conservation of mass on  $z$  axis

$$(\rho w)dx dy - \left[ \rho w + \frac{\partial \rho w}{\partial z} dz \right] dx dy \quad (3.3)$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลเทียบกับเวลาต่อปริมาตรควบคุม

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz \quad (3.4)$$

โดยกำหนดให้

$\rho$  คือ ความหนาแน่น

$dx, dy, dz$  คือ ความยาวของปริมาตรควบคุมตามแนวแกน  $x, y, z$  ตามลำดับ

$u, v, w$  คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน  $x, y, z$  ตามลำดับ

$t$  คือ เวลา

เมื่อรวมสมการ 3.1-3.4 เข้าด้วยกันบนพื้นฐานตามกฎอนุรักษ์มวลจะสามารถสรุปสมการอนุพันธ์ออกมาได้เป็นสมการ 3.5 หรือในรูปของเทนเซอร์ตามสมการ 3.6

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.6)$$

จากสมการ 3.6 จะสามารถกล่าวได้ว่าเป็นสมการอนุรักษ์มวลสำหรับของไหลที่ใช้กับกรณีที่มีความหนาแน่นไม่คงที่หรือที่เรียกว่า Compressible flow โดยความหนาแน่นจะเปลี่ยนไปตามความเร็ว ตำแหน่งในสนามการไหลและเวลา แต่ในการพิจารณาของไหลที่ไม่ใช่แก๊สจะสามารถกล่าวได้ว่าค่าความหนาแน่นนั้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับค่าคงที่คือมีค่าคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาหรือสนามการไหลที่จุดต่างๆ เราจึงสามารถที่จะลดรูปสมการได้ตามสมการ 3.7

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.7)$$

### 3.1.2 กฎอนุรักษ์โมเมนตัม (The law of momentum conservation)

กฎอนุรักษ์โมเมนตัมจะกล่าวถึงสมการอนุพันธ์ย่อยที่อ้างอิงตามกฎข้อที่สองของนิวตันที่กล่าวว่าความเร่งของวัตถุจะแปรผันตรงและมีทิศทางเดียวกับแรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุและแปรผกผันกับมวลของวัตถุหรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการ 3.8

$$\Sigma \vec{F} = m\vec{a} \quad (3.8)$$

โดยกำหนดให้  $\vec{a}$  คือ ความเร่งในแต่ละแนวแกน ดังนั้นเมื่อทำการพิจารณาภายในปริมาตรควบคุมต่อ 1 หน่วยปริมาตรจะสามารถพิจารณาแยกตามแนวแกนโดยเทียบกับความเร็วแต่ละแกนได้ ดังนี้

$$\frac{\rho Du_i}{Dt} = \text{แรงในแนวแกน } x \text{ ต่อ 1 หน่วยปริมาตรควบคุม}$$

$$\frac{\rho Dv_j}{Dt} = \text{แรงในแนวแกน } y \text{ ต่อ 1 หน่วยปริมาตรควบคุม}$$

$$\frac{\rho Dw_k}{Dt} = \text{แรงในแนวแกน } z \text{ ต่อ 1 หน่วยปริมาตรควบคุม}$$

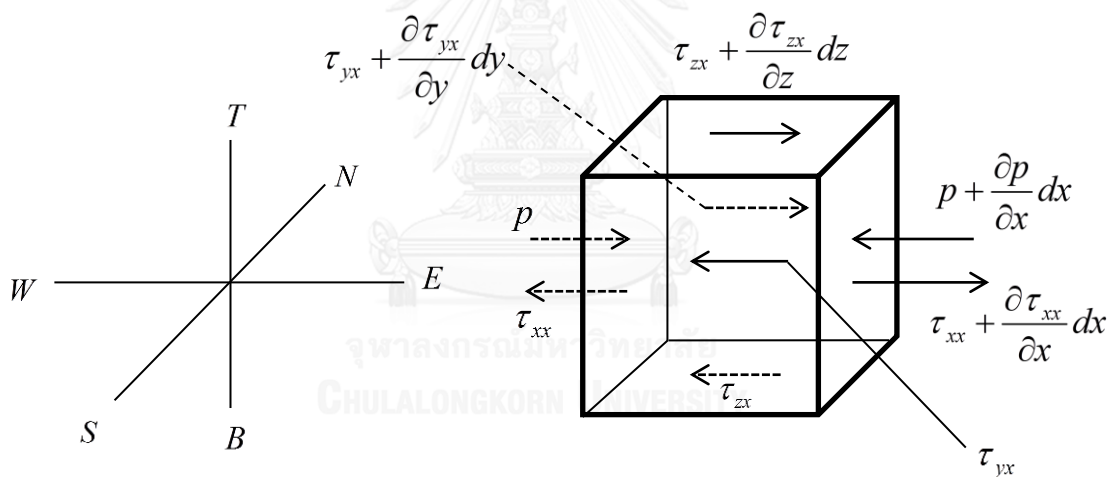
ในที่นี้เราจะแบ่งแยกแรงที่จะทำการพิจารณาออกเป็น 2 ลักษณะคือ 1.แรงภายนอกที่กระทำโดยมีการสัมผัสหรือปฏิสัมพันธ์กับผิวของปริมาตรควบคุมหรือที่เรียกว่า Surface Force เช่น แรงเสียดทานที่ผนัง แรงที่เกิดจากความดัน ค่าความหนืด แรงตึงผิว เป็นต้น 2.แรงภายนอกที่มา

กระทำโดยที่ไม่มีการสัมผัสกับปริมาตรควบคุมหรือที่เรียกว่า Body force เช่น แรงโน้มถ่วง แรงเหวี่ยง แรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก เป็นต้น

เมื่อพิจารณาแรงทั้ง 2 ชนิดและกฎข้อที่สองนิวตันเข้ามาอยู่ในรูปสมการจะได้ว่า

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} + \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} + \rho \frac{D\vec{w}}{Dt} = \vec{f}_{body} + \vec{f}_{surface} = \vec{f}_i \quad (3.9)$$

โดยกำหนดให้  $f_i$  เป็นแรงต่อหน่วยปริมาตรควบคุมของอนุภาคในสนามการไหลซึ่งในที่นี้เราจะพิจารณาเฉพาะความเค้นและความดันซึ่งเป็น Surface Force ( $f_{surface}$ ) ส่วน Body Force นั้นเราจะพิจารณาเป็นค่าคงที่ร่วมกับ Source Term ดังนั้นเมื่อเราพิจารณาปริมาตรควบคุมในสนามการไหลจะทำให้สามารถเขียนองค์ประกอบความดันและความเค้นของปริมาตรควบคุม ในแนวแกน  $x$  ได้ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 องค์ประกอบของความเค้นและความดันในแนวแกน  $x$

พิจารณาองค์ประกอบของความเค้นและแรงดันในแนวแกน  $x$  ของด้าน ( $E, W$ )

$$\left[ \left( p - \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right) + \left( \tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx - \tau_{xx} \right) \right] dydz = \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial x} \right) dx dy dz \quad (3.10)$$

พิจารณาองค์ประกอบของความเค้นและแรงดันในแนวแกน  $x$  ของด้าน  $(T, B)$

$$\left[ \tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz - \tau_{zx} \right] dx dy = \left( \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (3.11)$$

พิจารณาองค์ประกอบของความเค้นและแรงดันในแนวแกน  $x$  ของด้าน  $(N, S)$

$$\left[ \tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial z} dz - \tau_{yx} \right] dx dy = \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (3.12)$$

เมื่อรวมสมการ 3.10-3.12 เข้าด้วยกันจะทำให้ได้สมการโมเมนตัมในแนวแกน  $x$  หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมในปริมาตรควบคุมจะเท่ากับแรงทั้งหมดที่มากระทำที่ปริมาตรควบคุม โดยเป็นตามกฎข้อสองของนิวตันตามสมการ 3.13-3.15 ในแนวแกน  $x, y, z$  ตามลำดับ

Conservation of momentum on  $x$ -axis

$$\frac{\rho Du}{Dt} = \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial x} \right) dx dy dz + \left( \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz + \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right) dx dy dz + f_x \quad (3.13)$$

Conservation of momentum on  $y$ -axis

$$\frac{\rho Dv}{Dt} = \left( \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial y} \right) dx dy dz + \left( \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) dx dy dz + \left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \right) dx dy dz + f_y \quad (3.14)$$

Conservation of momentum on  $z$ -axis

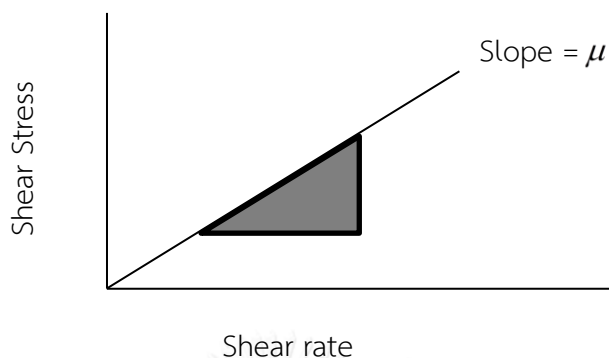
$$\frac{\rho Dw}{Dt} = \left( \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial z} \right) dx dy dz + \left( \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} \right) dx dy dz + \left( \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} \right) dx dy dz + f_z \quad (3.15)$$

โดยกำหนดให้  $f_{Bodyforce}$  นั้นรวมกับ Source Term ในพจน์ของ  $f_x, f_y, f_z$  ในแนวแกน  $x, y, z$  ตามลำดับ

จากสมการ 3.13-3.15 นั้นเมื่อทำการพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่เกิดขึ้นจากความหนืดในของไหลแบบนิวโตเนียนจะได้ว่าค่าความเค้นแปรผันโดยตรงกับอัตราความเครียด



เชิงมุม โดยอัตราความเครียดเชิงมุมนั้นจะเกี่ยวข้องกับอัตราการเปลี่ยนรูปเชิงเส้นและอัตราการเปลี่ยนรูปเชิงปริมาตรทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว  $u, v, w$  กับค่าความเค้นและความหนืดได้



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ shear rate ในของไหลนิวโตเนียน

เมื่อทำการพิจารณาเราจะสามารถกำจัดตัวแปรค่าความเค้นออกจากสมการคงเหลือแต่ค่าความหนืดกับความเร็วดังตามแนวแกนในสมการอนุพันธ์โมเมนต์สำหรับการไหลอัดตัวไม่ได้ดังสมการต่อไปนี้

Conservation of momentum on  $x$ -axis

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (3.16)$$

Conservation of momentum on  $y$ -axis

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \quad (3.17)$$

Conservation of momentum on  $z$ -axis

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u w) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v w) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w w) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (3.18)$$

### 3.1.3 กฎอนุรักษ์พลังงาน (the law of energy conservation)

เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ประยุกต์โดยใช้กฎข้อแรกของเทอร์โมไดนามิกส์ที่กล่าวว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในมวลก่อนใดก่อนหนึ่งจะเท่ากับอัตราปริมาณความร้อนที่ให้แก่มวลก่อนนั้นรวมกับอัตราของงานที่เกิดขึ้นจากแรงต่างๆ ที่กระทำโดยสามารถเขียนในรูปสมการที่มีอนุหภูมิเป็นตัวแปรตามได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u c_p T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v c_p T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w c_p T) = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q'' \quad (3.19)$$

### 3.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม คือระเบียบวิธีที่ใช้ในการเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ในหัวข้อที่ 3.1 ให้เป็นสมการพีชคณิตด้วยการอินทิเกรตภายในปริมาตรควบคุมที่ได้แบ่งเอาไว้ โดยในปัจจุบันถือได้ว่าเป็นระเบียบวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์สภาวะการไหลซึ่งถูกใช้ในซอฟต์แวร์ระดับสากลอย่างแพร่หลาย

จากสมการพื้นฐาน (Governing Equations) ที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 3.1 สามารถแสดงให้อยู่ในรูปทั่วไปของตัวแปร  $\phi$  ในรูปของสมการอนุพันธ์ของการไหลได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\phi u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (3.20)$$

ทำการอินทิเกรตภายในปริมาตรควบคุมทำให้ได้สมการ 3.21

$$\int_{cv} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{cv} \frac{\partial(\rho\phi u_i)}{\partial x_i} dV = \int_{cv} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_i} \right) dV + \int_{cv} S_\phi dV \quad (3.21)$$

โดยกำหนดให้  $\phi$  เป็นตัวแปรหลักต่างๆของของไหล  $u, v, w$  เป็นต้น

$\Gamma$  เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่

$S_\phi$  เป็น source term ของตัวแปรหลักที่เราพิจารณา

ในกรณีนี้จะยกตัวอย่างของไหลที่ทำการพิจารณาในรูปของ Steady-State คือการไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลาและไม่พิจารณา Body Force บนสนามการไหล 2 มิติ จึงสามารถลดรูปสมการแล้วจัดสมการให้อยู่ในรูปใหม่ได้เป็น

$$\int_{cv} \frac{\partial(\rho\phi u_i)}{\partial x_i} dV = \int_{cv} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_i} \right) dV + \int_{cv} S_\phi dV \quad (3.22)$$

โดยกำหนดให้

$$\int_{cv} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV = 0 \quad \text{เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา}$$

ในสมการ 3.22 นั้นสามารถแยกออกเป็น 3 เทอมเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาดังนี้

$$\int_{cv} \frac{\partial(\rho\phi u_i)}{\partial x_i} dV \quad \text{กำหนดให้เป็น Convection term หรือ เทอมการพา}$$

$$\int_{cv} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_i} \right) dV \quad \text{กำหนดให้เป็น Diffusion term หรือ เทอมการแพร่}$$

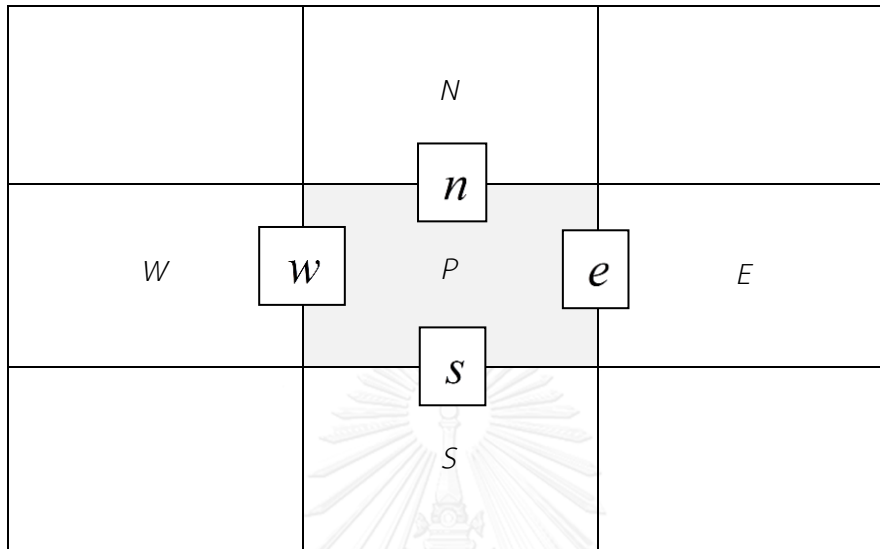
$$\int_{cv} S_\phi dV \quad \text{กำหนดให้เป็น Source Term}$$

### 3.2.1 พจน์การพา (Convection Term)

พจน์การพา (Convection Term) เป็นพจน์ที่ตัวแปรที่พิจารณาจะขึ้นกับตำแหน่งความเร็วที่อยู่ในสนามการไหล

$$\begin{aligned} \int_{cv} \frac{\partial(\rho\phi u_i)}{\partial x_i} dv &= \\ \int \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} dv + \int \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} dv &= [(\rho u A)_e \phi_e - (\rho u A)_w \phi_w] + [(\rho v A)_n \phi_n - (\rho v A)_s \phi_s] \end{aligned} \quad (3.23)$$

โดยกำหนดให้  $\phi_e, \phi_w, \phi_n, \phi_s$  เป็นตัวแปรหลักที่ขอบของปริมาตรควบคุมที่เราพิจารณาคือ ทิศตะวันออก ทิศตะวันตก ทิศเหนือ และทิศใต้ ตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแสดงด้วยพื้นที่แรเงา

จากสมการ 3.23 จะกำหนดให้อยู่ในรูป Convective Coefficient ( $F_i = \rho u_i A_i$ ) ของแต่ละตำแหน่งดังนี้

$$(\rho u A)_n \phi_n = F_n \phi_n \quad (3.24)$$

$$(\rho u A)_e \phi_e = F_e \phi_e \quad (3.25)$$

$$(\rho u A)_s \phi_s = F_s \phi_s \quad (3.26)$$

$$(\rho u A)_w \phi_w = F_w \phi_w \quad (3.27)$$

### 3.2.2 พจน์การแพร่ (Diffusion term)

พจน์การแพร่ (Diffusion Term) เป็นเทอมที่ตัวแปรที่พิจารณาจะขึ้นกับตำแหน่งในสนามการไหลแต่ไม่ขึ้นกับความเร็วของสนามการไหล

$$\int \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy + \int \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy = \left[ \Gamma_e A_e \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \Gamma_w A_w \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] + \left[ \Gamma_n A_n \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \Gamma_s A_s \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] \quad (3.28)$$

พิจารณาร่วมกับรูปที่ 3.4 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{Diffusion Term} = & \left[ \Gamma_e A_e \frac{(\phi_E - \phi_P)}{\delta x_{P \rightarrow E}} - \Gamma_w A_w \frac{(\phi_P - \phi_W)}{\delta x_{W \rightarrow P}} \right] \\ & + \left[ \Gamma_n A_n \frac{(\phi_N - \phi_P)}{\delta y_{P \rightarrow N}} - \Gamma_s A_s \frac{(\phi_P - \phi_S)}{\delta y_{S \rightarrow P}} \right] \end{aligned} \quad (3.29)$$

แทนค่าให้อยู่ในรูปของ  $D_i$  หรือสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายตามสมการที่ 3.30

$$D_i = \frac{\Gamma A}{\delta_i} \quad (3.30)$$

นำสมการที่ 3.30 แทนค่าในสมการที่ 3.29 จะได้สมการ Diffusion Term ใหม่ตาม สมการที่ 3.29

$$\text{Diffusion Term} = [D_e(\phi_E - \phi_P) - D_w(\phi_P - \phi_W)] + [D_n(\phi_N - \phi_P) - D_s(\phi_P - \phi_S)] \quad (3.31)$$

### 3.2.3 พจน์อื่นๆ (Other Terms)

ในกรณีของ Source Term นั้นจะพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นค่าคงที่กับส่วนที่เป็นสัมประสิทธิ์ของ  $\phi_p$  ซึ่งการกำหนด Source term นั้นสามารถกำหนดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ได้หลายรูปแบบโดยในที่นี้ได้ยกตัวอย่างการกำหนดให้อยู่ในรูป Linearization Source term ตามสมการที่ 3.32

$$\bar{S} = S_c + S_p \phi_p \quad (3.32)$$

โดยกำหนดให้  $S_c$  คือค่าคงที่

$S_p$  คือสัมประสิทธิ์ของ  $\phi_p$  (โดยค่าสัมประสิทธิ์ต้องมีค่าเป็นลบเท่านั้น)

ทำการอินทิเกรตสมการ 3.32 จะได้

$$\int_{cv} S_\phi dx dy = S_u \Delta V + S_p \phi_p \Delta V \quad (3.33)$$

### 3.3 การคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Scheme)

ปัจจุบันมีขั้นตอนวิธีเชิงตัวเลขหลายรูปแบบให้ใช้ในการประมาณค่า  $\phi_i$  ที่บริเวณขอบเขตของปริมาตรควบคุมในด้านต่างๆ ได้แก่ Upwind Scheme, Quick Scheme, Hybrid Scheme, Power Law Scheme เป็นต้น

โดยงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการเลือกใช้ Second Order Upwind Scheme เนื่องจากให้ค่าที่แม่นยำและมีความเสถียร

#### Second Order Upwind Scheme

Second Order Upwind Scheme เป็นการประมาณค่าที่ขอบจาก cell ที่ทิศทางการไหลนั้นไหลผ่านมาโดยให้ขอบของปริมาตรควบคุมที่พิจารณาจากจุดกึ่งกลางของปริมาตรควบคุมที่ไหลผ่านก่อนหน้าจำนวน 2 ตำแหน่งจากรูปที่ 3.4 จะแสดงให้เห็นถึงวิธีในการประมาณค่าเมื่อความเร็วเป็นบวกและลบ



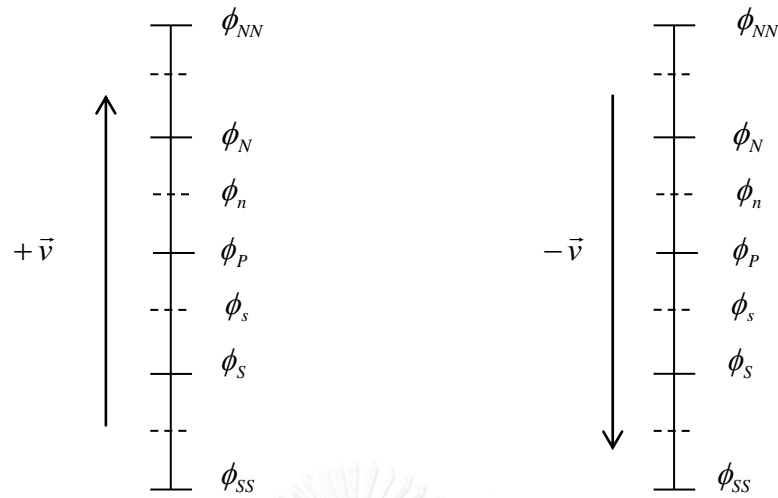
รูปที่ 3.5 ทิศทางของความเร็วแนวแกน  $x$  ที่เป็นบวกหรือลบและการประมาณค่าที่ขอบ

กรณีที่ 1  $F_e \geq 0$  และ  $F_w \geq 0$  ( $\rho u \geq 0$ ) จะได้ว่า

$$\phi_w = \phi_W + \frac{1}{2}(\phi_W - \phi_{WW}), \quad \phi_e = \phi_P + \frac{1}{2}(\phi_P - \phi_W)$$

กรณีที่ 2  $F_e \leq 0$  และ  $F_w \leq 0$  ( $\rho u \leq 0$ ) จะได้ว่า

$$\phi_w = \phi_P + \frac{1}{2}(\phi_P - \phi_E), \quad \phi_e = \phi_E + \frac{1}{2}(\phi_E - \phi_{EE})$$



รูปที่ 3.6 ทิศทางของความเร็วแนวแกน  $y$  ที่เป็นบวกหรือลบและการประมาณค่าที่ขอบ

กรณีที่ 1  $F_n \geq 0$  และ  $F_s \geq 0$  ( $\rho v \geq 0$ ) จะได้ว่า

$$\phi_s = \phi_S + \frac{1}{2}(\phi_S - \phi_{SS}), \quad \phi_n = \phi_P + \frac{1}{2}(\phi_P - \phi_S)$$

กรณีที่ 2  $F_n \leq 0$  และ  $F_s \leq 0$  ( $\rho v \leq 0$ ) จะได้ว่า

$$\phi_s = \phi_P + \frac{1}{2}(\phi_P - \phi_N), \quad \phi_n = \phi_N + \frac{1}{2}(\phi_N - \phi_{NN})$$

นำค่า  $\phi_i^*$  ทั้งหมดแทนค่าลงในสมการ 3.23 แล้วเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการพีชคณิตในสมการ 3.32 จะได้ว่า

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_w \phi_w + a_n \phi_n + a_s \phi_s + S_c \Delta V \quad (3.34)$$

$$a_E = D_e + [[-F_e, 0]] \quad (3.35)$$

$$a_w = D_w + [[F_w, 0]] \quad (3.36)$$

$$a_n = D_n + [[-F_n, 0]] \quad (3.37)$$

$$a_s = D_s + [[F_s, 0]] \quad (3.38)$$

$$a_p = D_e + [[-F_e, 0]] + D_w + [[F_w, 0]] + D_n + [[-F_n, 0]] + D_s + [[F_s, 0]] \quad (3.39)$$

$[[F,0]]$  จะเลือกค่าที่มีค่ามากที่สุดที่อยู่ในวงเล็บแต่ละกรณีเช่น

กรณีที่ 1  $F > 0$  จะได้ว่า  $[[F,0]] = F$

กรณีที่ 2  $F < 0$  จะได้ว่า  $[[F,0]] = 0$

### 3.4 ขั้นตอนการแก้สมการเพื่อหาผลเฉลย (Solution Procedure)

จากการที่สามารถพิจารณาประมาณค่าสมการอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิตได้แล้ว นั้นขั้นตอนที่จะกล่าวถึงต่อไปคือขั้นตอนการหาผลเฉลยที่จะทำให้เราสามารถหาคำตอบที่ต้องการได้จากสมการพีชคณิตโดยในการแก้ระบบสมการนั้นจะใช้เทคนิควิธีที่เรียกว่า Tri-diagonal matrix algorithm (TDMA) ควบคู่กับกระบวนการหาผลเฉลยที่เรียกว่า Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations หรือ SIMPLE ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาโดย Patankar (1980) เพื่อให้สมการอนุพันธ์ 2 สมการคือ สมการโมเมนตัมและสมการอนุพันธ์มวลมีความสอดคล้องกัน

การแก้สมการเพื่อหาผลเฉลยของวิธี SIMPLE Algorithm นั้นจะใช้กฎอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ 2 ข้อคือ Conservation of Momentum กับ Conservation of Mass โดยสามารถสรุปออกมาเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

เริ่มต้นจากการสมมุติค่า  $P^*, u^*, v^*$  ลงในสมการโมเมนตัมในแนวแกน  $x, y$  จะได้ว่า

แนวแกน  $x$

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (P_p^* - P_E^*) \Delta y \quad (3.40)$$

แนวแกน  $y$

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (P_p^* - P_N^*) \Delta x \quad (3.41)$$

ทำการแก้สมการจะได้ค่า  $u^*, v^*$  ใหม่ที่มาจากสมการโมเมนตัม

ทำการเทียบกับสมการที่เป็นจริงของค่าขอบ คือ

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + (P_p - P_E) \Delta y \quad (3.42)$$

พิจารณาในแนวแกน  $x$  จับสมการ 3.40 ลบกับ 3.42 จะได้ว่า



$$a_e(u_e - u_e^*) = \sum a_{nb}(u_{nb} - u_{nb}^*) + (P_p - P_E)\Delta y \quad (3.43)$$

กำหนดให้ Correction Term ของ  $P, u, v$  คือ  $P', u', v'$  โดยมีความสัมพันธ์กับค่าที่ถูกต้องดังนี้

$$u_e = u_e^* + u_e' \quad (3.44)$$

$$v_e = v_e^* + v_e' \quad (3.45)$$

$$P_e = P_e^* + P_e' \quad (3.46)$$

นำสมการ 3.44-3.46 ไปแทนในสมการ 3.42 ก็จะได้ว่า

$$a_e u_e' = \sum a_{nb} u_{nb}' + (P_p' - P_E')\Delta y \quad (3.47)$$

กำหนดให้  $\sum a_{nb} u_{nb}'$  และ  $\sum a_{nb} v_{nb}'$  มีค่าเท่ากับ 0 (Patankar, 1980) เพื่อลดความซับซ้อนของสมการในการหาค่าตอบสำหรับการไหลที่มีความต่อเนื่อง ทำให้สามารถลดรูปสมการได้เป็น

$$a_e u_e' = (P_p' - P_E')\Delta y$$

$$u_e' = d_e (P_p' - P_E') \quad \text{เมื่อ} \quad d_e = \frac{A_e}{a_e}$$

นำกลับไปแทนค่าในสมการ 3.44 จะได้ว่า

$$u_e = u_e^* + d_e (P_p' - P_E') \quad (3.48)$$

พิจารณาแบบเดียวกันในตำแหน่งอื่นๆ บน cell

$$u_w = u_e^* + d_w (P_w' - P_p') \quad (3.49)$$

$$u_n = u_n^* + d_n (P_p' - P_n') \quad (3.50)$$

$$u_s = u_s^* + d_s (P_s' - P_p') \quad (3.51)$$

จากสมการข้างบนจะทำให้เราสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความดันได้ แต่ยังไม่เพียงพอต่อการหาค่าที่ถูกต้องได้จึงต้องพิจารณาใช้สมการ Conservation of mass เข้ามาช่วยในการแก้ไข

$$\frac{(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad \text{จากสมการ Conservation of Mass Equation (steady state)} \quad (3.52)$$

ทำการ ดิฟเฟอเรนเชียลบนปริมาตรควบคุมจะได้

$$\iint \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx dy + \iint \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dx dy = 0 \quad (3.53)$$

หรือ

$$((\rho u)_e - (\rho u)_w)\Delta y + ((\rho v)_n - (\rho v)_s)\Delta x = 0 \quad (3.54)$$

แทนค่าสมการ 3.48-3.51 ลงในสมการ 3.54 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \rho_e(u_e^* + d_e(P_p' - P_E')) - \rho_w(u_w^* + d_w(P_w' - P_p')) + \rho_n(u_n^* + d_n(P_p' - P_n')) \\ - \rho_s(u_s^* + d_s(P_s' - P_s')) = 0 \end{aligned} \quad (3.55)$$

จัดให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิตจะได้ว่า

$$a_p P_p' = a_E P_E' + a_W P_W' + a_N P_N' + a_S P_S' + b \quad (3.56)$$

โดยกำหนดให้

$$a_E = \rho_e d_e \Delta y$$

$$a_W = \rho_w d_w \Delta y$$

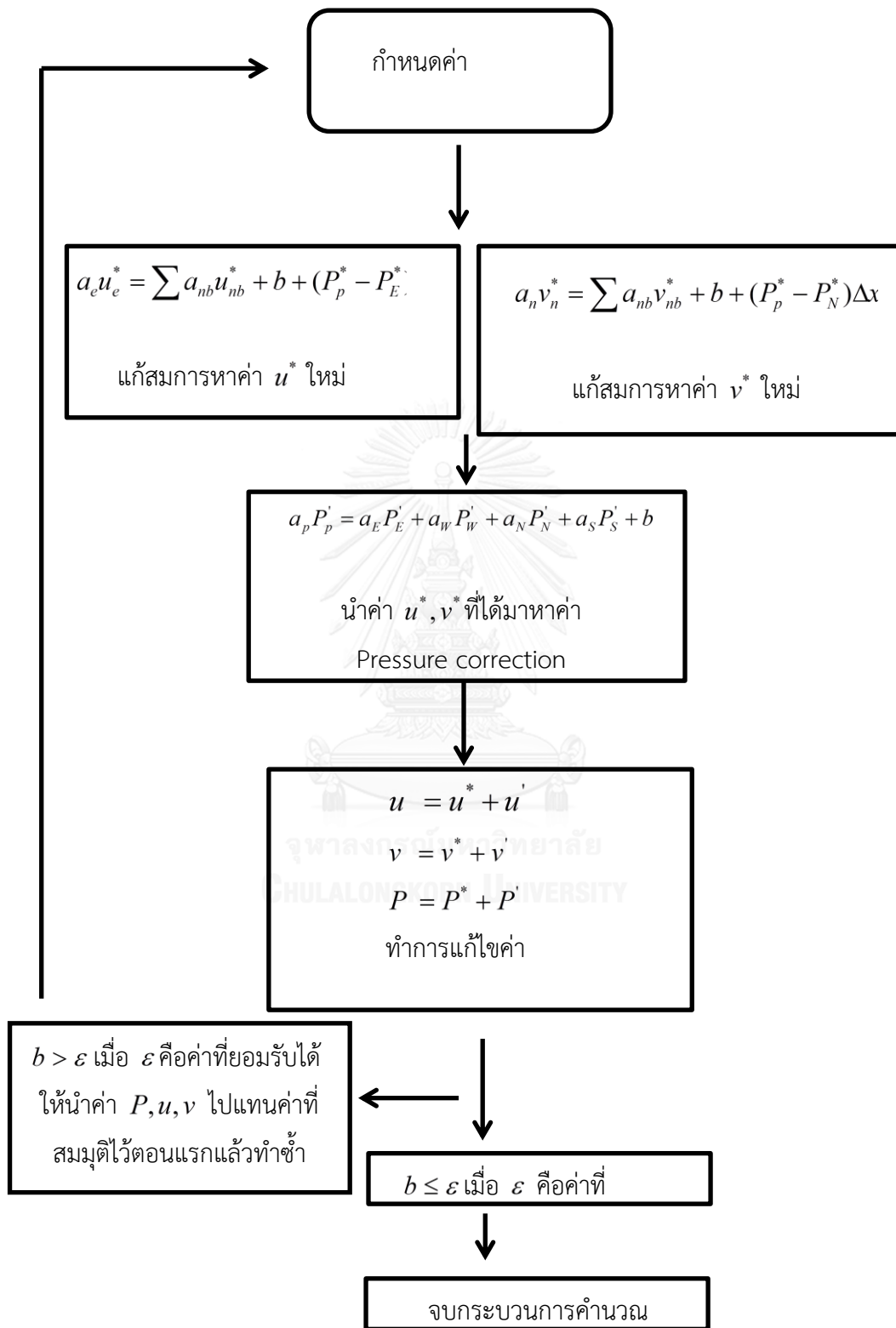
$$a_N = \rho_n d_n \Delta x$$

$$a_S = \rho_s d_s \Delta x$$

$$b = (\rho_w u_w^* - \rho_e u_e^*)\Delta y + (\rho_s v_s^* - \rho_n v_n^*)\Delta x$$

ทำการแก้สมการ 3.56 จะได้ค่า  $P'$  ที่ตำแหน่งต่างๆทำให้สามารถหาค่า  $P$ ,  $u$ ,  $v$  ได้จากสมการ 3.44 ถึง 3.46 นำค่า  $P$ ,  $u$ ,  $v$  ที่ได้ไปแทนค่าที่ทำการสมมุติค่าใหม่ซ้ำจนกว่าจะได้ค่า  $b$  ที่ค่าเข้าใกล้ 0 หรือน้อยกว่าค่าที่กำหนด

จากขั้นตอนทั้งหมดสามารถสรุปออกมาเป็น Flow Chart ได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนในการคำนวณของ SIMPLE Algorithm

### 3.5 Volume of Fluid Method (VOF Model)

ในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลที่เป็น Multiphase Flow นั้นในปัจจุบันมีการใช้หลากหลายรูปแบบเช่น Level-set, Lattice Boltzmann และ volume of fluid เป็นต้น โดยในงานวิจัยขั้นนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ volume of fluid อันเนื่องมาจากการใช้ VOF Model ถือได้ว่าเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมและสามารถที่จะคำนวณรูปร่างของของไหลที่แยกชั้นกันอยู่ได้อย่างแม่นยำ ด้วยวิธีการเฉลี่ยคุณสมบัติของของไหลที่เราพิจารณาแล้วรวมสมการ การไหลของของไหลทั้งสองให้เป็นสมการเดียวกันด้วยการใช้ Interface indicator function ( $\gamma$ ) เป็นตัวแปรในการพิจารณาพื้นผิวสัมผัสโดย ( $\gamma$ ) จะมีค่าอยู่ในช่วง  $0 \leq \gamma \leq 1$  การใช้คุณสมบัติดังกล่าวจึงเหมาะกับการคำนวณในการหาพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลที่ไม่ละลายเข้าหากันซึ่งค่า volume fraction ( $\gamma$ ) จะเป็นตัวแปรสำหรับติดตามคุณสมบัติและบริเวณพื้นผิวสัมผัสของของไหลทั้ง 2 ชนิดดังนี้

$\gamma = 1$  ของไหลมีคุณสมบัติเหมือนกับของไหลชนิดที่ 1

$\gamma = 0$  ของไหลมีคุณสมบัติเหมือนกับของไหลชนิดที่ 2

$0 < \gamma < 1$  ของไหลมีคุณสมบัติที่ผสมกันระหว่างของไหลชนิดที่ 1 และ 2

สมการที่ใช้ใน Volume of Fluid Method สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังแสดงด้านล่าง

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla(\rho_m u) &= 0 \\ \frac{\partial \rho_m u}{\partial t} + \nabla(\rho_m uu) &= -\nabla p + \nabla \tau + \rho_m g + S \\ \frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla(\gamma u) &= 0 \end{aligned}$$

โดยที่

$$\rho_m = \sum \gamma_k \rho_k$$

Subscript  $m$  หมายถึง คุณสมบัติของของผสม

Subscript  $k$  หมายถึง ของไหล เฟส  $k$  ใดๆ

## บทที่ 4

### การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

ในบทนี้จะทำการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ทำการคำนวณออกมาด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT VERSION 15.0 เพื่อให้มั่นใจได้ว่าผลลัพธ์ที่ออกมามีความถูกต้องโดยจะทำการแบ่งการสอบเทียบของโปรแกรมออกเป็น 2 ส่วนคือ

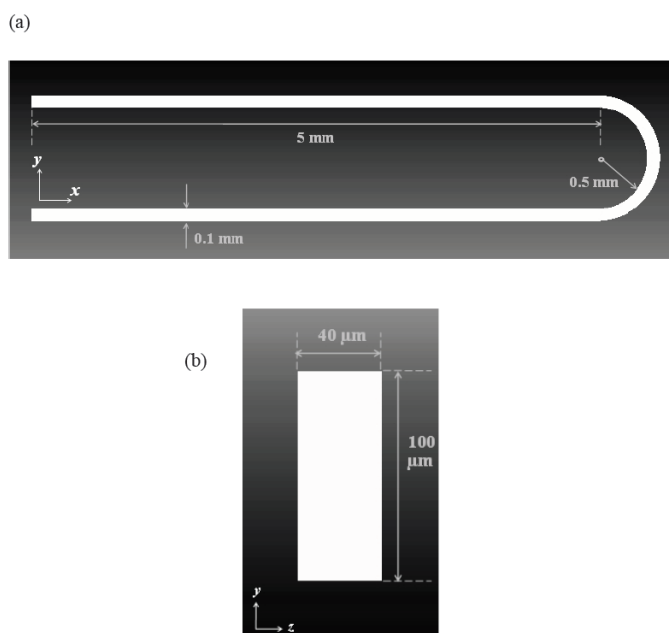
1. การสอบเทียบในเชิงคุณภาพกับงานวิจัยที่มีการคำนวณและการทดลอง (Qualitative validation)

2. การสอบเทียบในเชิงปริมาณกับผลการทดลอง (Quantitative validation)

#### 4.1 การสอบเทียบในเชิงคุณภาพกับงานวิจัยที่มีการคำนวณและการทดลอง

##### 4.1.1 การสอบเทียบในส่วนของสนามการไหลเทียบกับการคำนวณของงานวิจัย

ส่วนแรกจะทำการเทียบกับลักษณะและรูปร่างสนามการไหลของของไหลภายในไมโครแชนแนล โดยจะเป็นการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพกับผลงานวิจัยของ Kositanont et al. (2014) ที่ทำการคำนวณของไหลที่ไม่ละลายเข้าหากัน 2 ชนิดภายในไมโครแชนแนลที่มีรูปร่างของอุปกรณ์ที่มีการโค้งตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะรูปร่างของไมโครแชนแนลที่ทำการทดสอบตามงานวิจัยของ Kositanont et al.

(2014) a) ลักษณะการโค้งของอุปกรณ์ b) ขนาดของพื้นที่หน้าตัด

การเลือกขนาดกริดหรือปริมาตรควบคุมที่เหมาะสม

ในการทดสอบเลือกใช้กริดที่มีขนาด  $0.51 - 2.0 \mu\text{m}$  ในทิศทางตามแนวแกน  $x$  และ ขนาด  $0.51 - 2.0 \mu\text{m}$  ในทิศทางตามแนวแกน  $y$

ขั้นตอนการคำนวณและเปรียบเทียบผล

1. ทำการกำหนดอัตราการไหลที่ทางเข้าทั้ง 2 เฟส เป็น  $0.025 \text{ mL/s}$  ถึง  $0.5 \text{ mL/s}$  และ กำหนดให้ทางออกมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ

2. ทำการเลือกชนิดของของไหลคือ Toluene และ น้ำ, กำหนดค่าแรงตึงผิวที่  $0.037 \text{ N/m}$ , กำหนดค่ามุมสัมผัสที่  $37^\circ$  และเลือกใช้ Volume of Fluid Model ในการพิจารณา

3. ทำการคำนวณจนได้ผลลัพธ์ที่ลู่เข้า

4. ทำการเปรียบเทียบกับรูปร่างของสนามการไหลที่อัตราการไหลที่แตกต่างกัน

ในส่วนนี้จะทำการสอบเทียบรูปร่างการแบ่งเฟสระหว่างของไหล 2 ชนิด ในช่วงความเร็ว  $0.025-0.5 \text{ mL/min}$  ตามผลการคำนวณของ Kositanont et al. (2014) ที่แสดงในรูปที่ 4.2 และผลการสอบเทียบที่คำนวณโดยผู้วิจัยตามรูปที่ 4.3

(a)



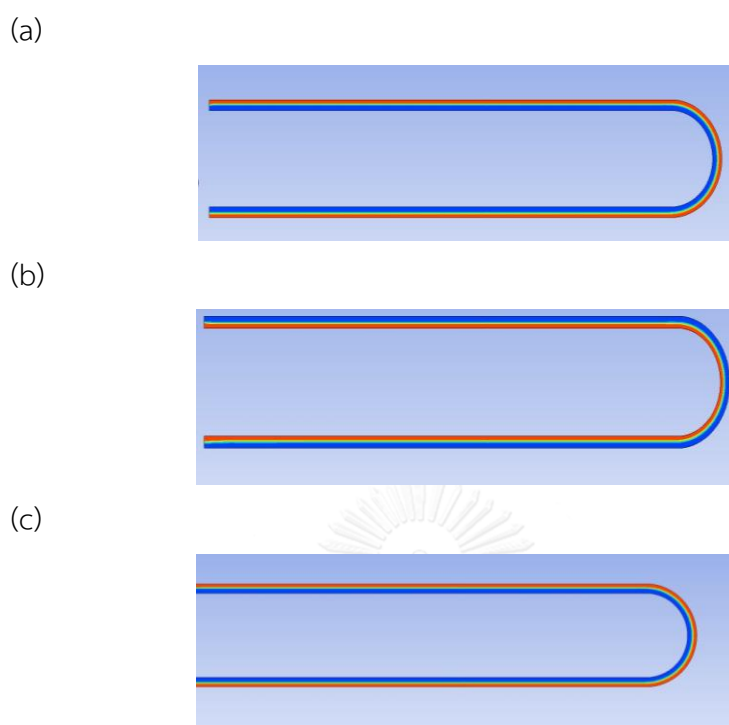
(b)



(c)



รูปที่ 4.2 ลักษณะการแบ่งเฟสระหว่างของไหล 2 ชนิดที่ความเร็วต่างๆกัน ในงานของ Kositanont et al. (2014) โดยมีอัตราการไหลดังนี้ (a)  $0.025 \text{ mL/min}$  โดยมี Toluene ไหลที่วงนอก, (b)  $0.025 \text{ mL/min}$  โดยมี Water ไหลที่วงนอก, (c)  $0.5 \text{ mL/min}$  โดยมี Toluene ไหลที่วงนอก

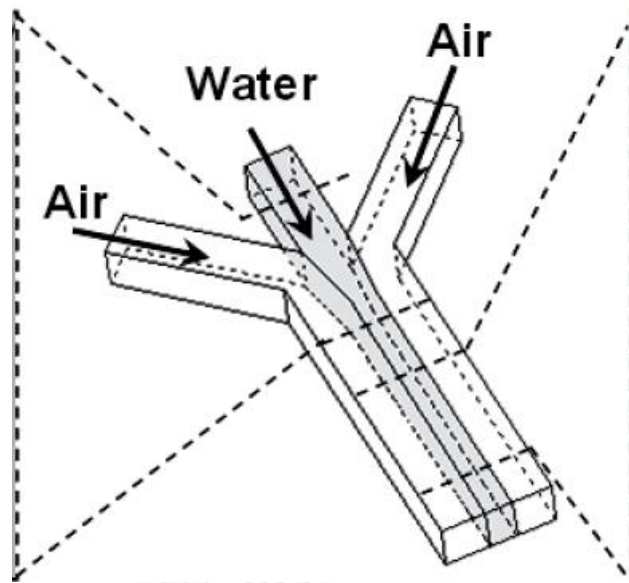


รูปที่ 4.3 ลักษณะการแบ่งเฟสระหว่างของไหล 2 ชนิดที่ความเร็วต่างๆกัน ในงานที่ทำการสอบเทียบ โดยมีอัตราการไหลดังนี้ (a) 0.025 ml/min โดยมี Toluene ไหลที่วงนอก, (b) 0.025 ml/min โดยมี Toluene ไหลที่วงใน, (c) 0.5 ml/min โดยมี Toluene ไหลที่วงนอก

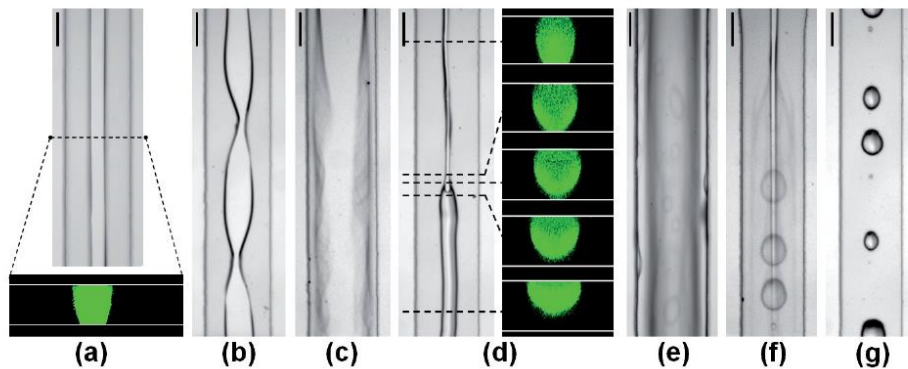
จากผลการคำนวณรูปแบบการไหลของผู้วิจัยกับงานวิจัยของ Kositanont et al. (2014) ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการคำนวณมีความใกล้เคียงและสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันตามรูปที่ 4.2-4.3 ที่แสดงถึงลักษณะการไหลที่อัตราการไหลต่างๆ กัน

#### 4.1.2 การตรวจสอบในส่วนของสนามการไหลเทียบกับผลการทดลอง

ในส่วนของสนามการไหลที่เทียบกับการทดลองนั้นได้ทำการสอบเทียบกับงานวิจัยของ Huh et al. (2009) ที่ทำการทดลองการไหลระหว่างของไหล 2 ชนิดคืออากาศกับน้ำที่อัตราเร็วต่างๆกัน ภายในไมโครแชนแนลตามรูปที่ 4.4 โดยได้รูปแบบการไหลออกมาทั้งหมด 7 รูปแบบตามรูปที่ 4.5 ได้แก่ (a) stable stratified flow, (b) wavy stratified flow, (c) wiggly stratified flow, (d) detached stratified flow, (e) annular-droplet flow, (f) spreading stratified-droplet flow, และ (g) break-up



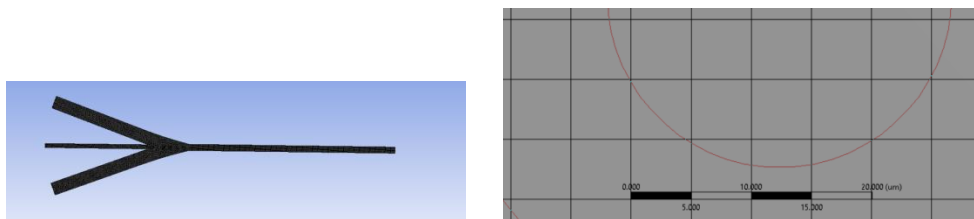
รูปที่ 4.4 รูปแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของ Huh et al. (2009)



รูปที่ 4.5 รูปแบบ Flow Pattern ที่อัตราการไหลแตกต่างจากการทดลองของ Huh et al. (2009)

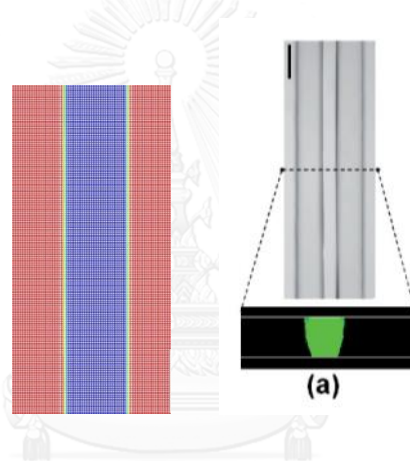
โดยการสอบเทียบกับการทดลองในงานนี้จะเลือกการสอบเทียบเฉพาะที่มีการแบ่งแยกชั้นขอบเขตของการไหลอย่างชัดเจนเท่านั้นซึ่งเป็นแบบที่ผู้วิจัยสนใจ โดยแยกเป็นจำนวน 3 รูปแบบได้แก่ Stable, Wavy และ Detached stratified flow โดยใช้กริดขนาด  $5.0 \mu\text{m}$  (รูปที่ 4.6) ในการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบโดยได้ผลการคำนวณดังนี้





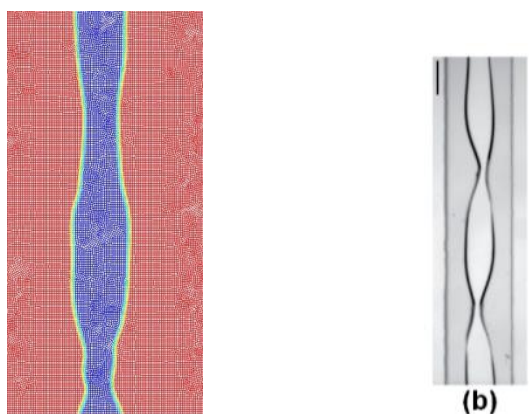
รูปที่ 4.6 กริดที่ใช้ในการคำนวณขนาด  $5.0 \mu\text{m}$

แบบที่ 1. Stable stratified flow ทำการสอบเทียบที่สถานะความเร็วของอากาศที่ 20 m/s, ความเร็วของน้ำที่ 0.4 m/s ได้ผลการคำนวณตามรูปที่ 4.7 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยความกว้างของช่องทางการไหลของน้ำมีขนาดประมาณ  $75 \mu\text{m}$



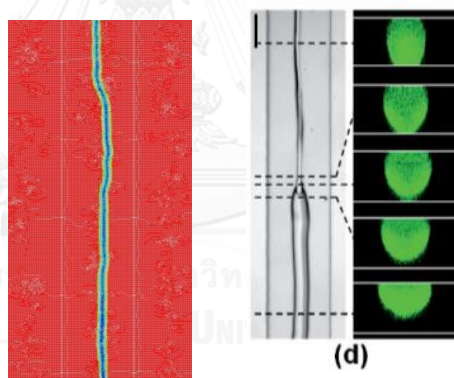
รูปที่ 4.7 รูปแบบการไหล Stable stratified flow ที่ได้จากการคำนวณ (รูปทางด้านซ้าย) เทียบกับการทดลอง (รูปทางด้านขวา) (Huh et al. (2009))

แบบที่ 2. Wavy stratified flow ทำการสอบเทียบที่สถานะความเร็วของอากาศที่ 7 m/s, ความเร็วของน้ำที่ 0.4 m/s ได้ผลการคำนวณตามรูปที่ 4.8 ซึ่งคล้ายกับผลการทดลองที่มีความยาวของ Wave ที่  $200\text{-}600 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.8 รูปแบบ Flow Pattern Wavy stratified flow ที่ได้จากการคำนวณ (รูปทางด้านซ้าย) เทียบกับการทดลอง (รูปทางด้านขวา) (Huh et al. (2009))

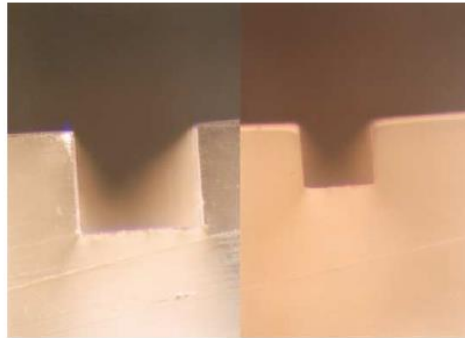
แบบที่ 3. Detached stratified flow ทำการสอบเทียบที่สถานะความเร็วของอากาศที่ 30 m/s, ความเร็วของน้ำที่ 0.2 m/s ได้ผลการคำนวณตามรูปที่ 4.9 ซึ่งคล้ายกับผลการทดลอง



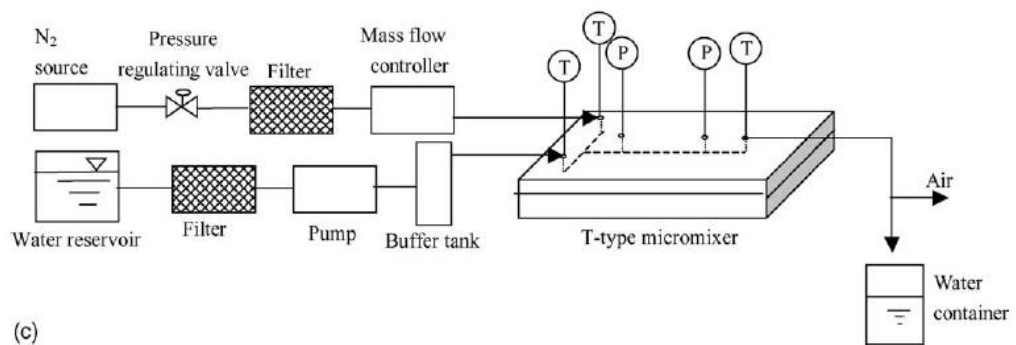
รูปที่ 4.9 รูปแบบ Flow Pattern Detached stratified flow ที่ได้จากการคำนวณ(รูปทางด้านซ้าย) เทียบกับการทดลอง (รูปทางด้านขวา) (Huh et al. (2009))

#### 4.2 การสอบเทียบในเชิงปริมาณกับผลการทดลอง

ส่วนที่สองจะทำการสอบเทียบกับผลการทดลองของ Yue et al. (2004) ที่เป็นไมโคร แชนแนลแบบ 2 เฟส ไหลเข้ามาทำมุมกัน  $90^\circ$  (T-inlet Microchannel) โดยของไหลทั้ง 2 ชนิดคือ ก๊าซไนโตรเจนกับน้ำ โดยมีช่องทางการไหลเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter) เท่ากับ  $528 \mu\text{m}$  ตามรูปที่ 4.10 และแผนภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองตามรูปที่ 4.11

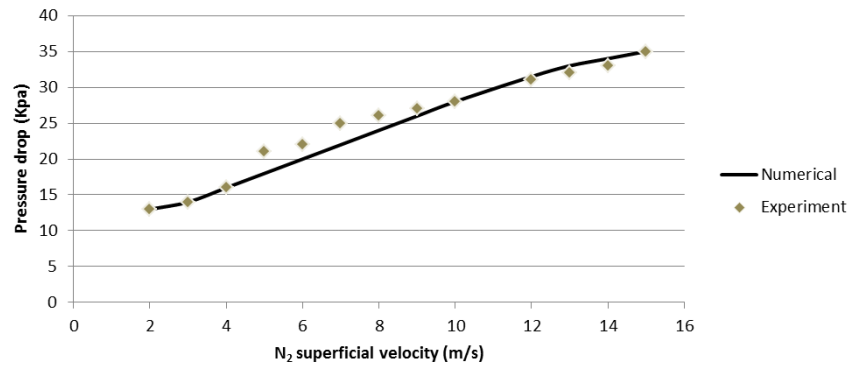


รูปที่ 4.10 ขนาดของช่องทางการไหลที่ใช้ในการทดลองของ Yue et al. (2004)

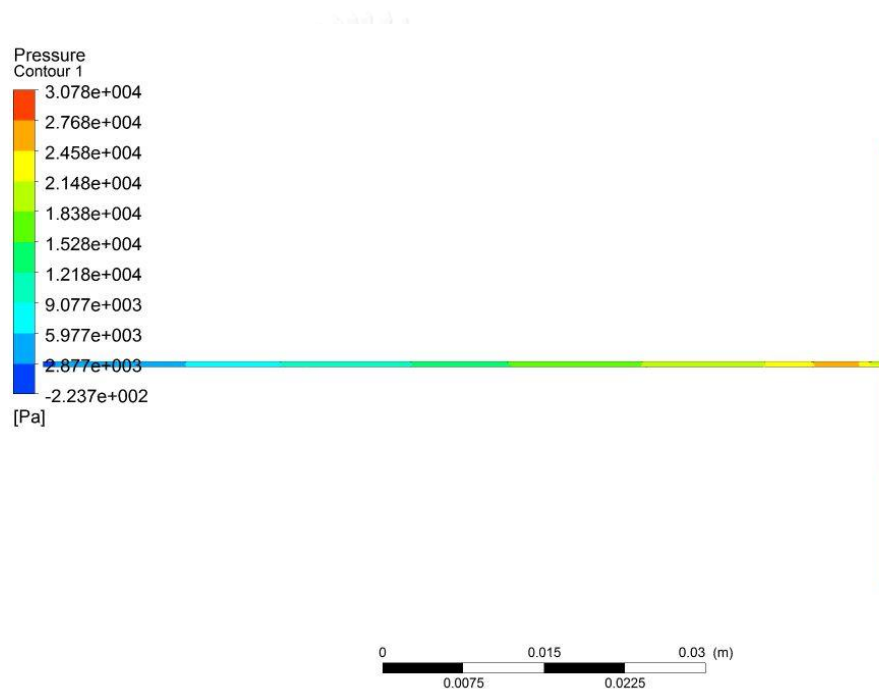


รูปที่ 4.11 ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองของ Yue et al. (2004)

โดยการสอบเทียบผลการทดลองจะทำการสอบเทียบกับค่าความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ไมโครแชนแนลโดยน้ำจะมีความเร็วขาเข้าอุปกรณ์คงที่ที่ความเร็ว 0.91 m/s แต่ความเร็วขาเข้าของก๊าซไนโตรเจนจะมีค่าอยู่ในช่วง 2-15 m/s โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมีค่าที่ใกล้เคียงและสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ค่าความดันตกคร่อมจากการคำนวณเทียบกับผลการทดลองของ Yue et al. (2004)



รูปที่ 4.13 ลักษณะการกระจายตัวของความดันภายในไมโครเซนแนล  
 ที่ทำการสอบเทียบกับผลการทดลอง

สรุปผลการสอบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

จากผลการสอบเทียบที่ได้ในหัวข้อที่ 4.1 ที่เป็นการสอบเทียบในเชิงคุณภาพและหัวข้อที่ 4.2 ที่เป็นการสอบเทียบในเชิงปริมาณ สามารถสรุปได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับผลการทดลองมีความใกล้เคียงและสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันโดยมีความถูกต้องอยู่ในระดับที่น่าพอใจ ดังนั้นการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่กล่าวไว้ข้างต้นสามารถที่จะนำมาคำนวณการไหลแบบ Multiphase Flow ภายในไมโครเซนแนลที่ต้องการพิจารณาได้

## บทที่ 5

### การทำนายการไหลแบบราบเรียบผ่านช่องทางการไหลที่มีลักษณะโค้งและแบบตรง

หลังจากได้ทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องและแม่นยำแล้ว ในบทนี้จะอธิบายลักษณะความสำคัญของปัญหาและขั้นตอนการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT VERSION 15.0 ในการพิจารณาแบบจำลองไมโครเซนแนลในรูปแบบ 3 มิติ โดยสามารถสรุปแบ่งออกเป็นขั้นตอนทั้งหมด 7 ขั้นตอน

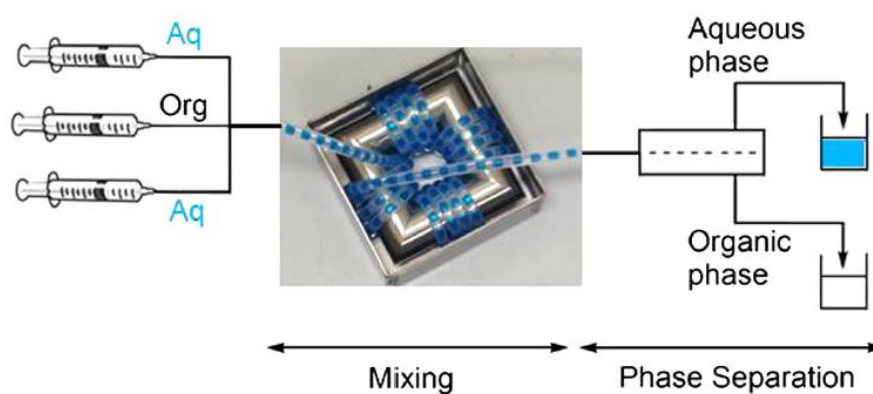
1. ลักษณะและความสำคัญของปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์
2. การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS WORKBENCH
3. การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและวิธีการคำนวณที่พิจารณา
4. การแบ่งขนาดกริดของแบบจำลองและการทดสอบหาขนาดกริดที่เหมาะสมสำหรับปัญหา
5. การวิเคราะห์ผลของค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากไมโครเซนแนลรูปแบบโค้ง
6. การวิเคราะห์ผลของความเร็วและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางต่อค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลต่อปริมาตร
7. การเพิ่มจำนวนวงรอบของไมโครเซนแนลรูปแบบโค้ง

#### 5.1 ลักษณะและความสำคัญของปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์

ลักษณะและความสำคัญของปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยชิ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการต่างๆในหลายอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการใช้วิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (Liquid-Liquid Extraction) โดยของไหลทั้งสองชนิดที่ใช้จะเป็นของไหลที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic Solvent) กับของไหลที่เป็นตัวทำละลายที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบหลัก (Aqueous Solvent) เช่น อุตสาหกรรมพลังงานที่มีการใช้วิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลวในกระบวนการ Nuclear Reprocessing หรือกระบวนการสกัดซ้ำจากแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว,

อุตสาหกรรมอาหารและยา ที่ใช้ในการสกัดสารจากพืชเพื่อให้ได้สารอาหารที่ต้องการหรือยาที่ใช้ในการรักษาผู้ป่วย เป็นต้น

โดยลักษณะการไหลของของไหลทั้ง 2 ชนิด ภายในอุปกรณ์ไมโครแชนแนลด้วยวิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลวนั้นส่วนใหญ่จะเป็นการไหลแบบ Slug Flow แต่การไหลแบบ Slug Flow นั้นจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการถัดไปคือ กระบวนการแยกของไหลที่ไม่ละลายเข้าหากันออกจากกัน (Phase Separation Process) เพื่อนำสารที่สกัดไปใช้งานทำให้สูญเสียเวลาและต้นทุนในการผลิตของอุตสาหกรรมตามรูปที่ 5.1 ซึ่งแสดงตำแหน่งอุปกรณ์แยกของไหลที่ไม่ละลายเข้าหากัน



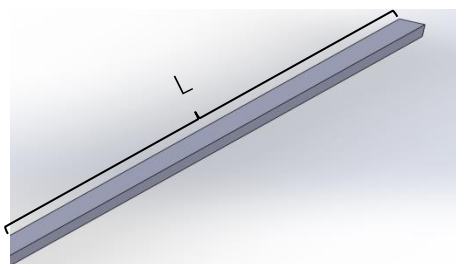
รูปที่ 5.1 การไหลแบบ Slug flow ที่ต้องการอุปกรณ์ที่แยกของไหลทั้งสองชนิดออกจากกัน (Iris et al. (2016))

จากปัญหาที่กล่าวข้างต้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงเน้นการวิเคราะห์ไปที่รูปแบบการไหลแบบแยกชั้นกันอย่างชัดเจนแบบขนานกันตลอดจนถึงทางออกของไมโครแชนแนลหรือ Stratified Flow และการใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลทั้งสองชนิดให้มีค่ามากยิ่งขึ้นที่อัตราการไหล  $0.01-0.2 \text{ mm}^3/\text{s}$  โดยเป็นช่วงการไหลที่ให้ผลเสถียรและเป็นการไหลแบบราบเรียบในไมโครแชนแนล

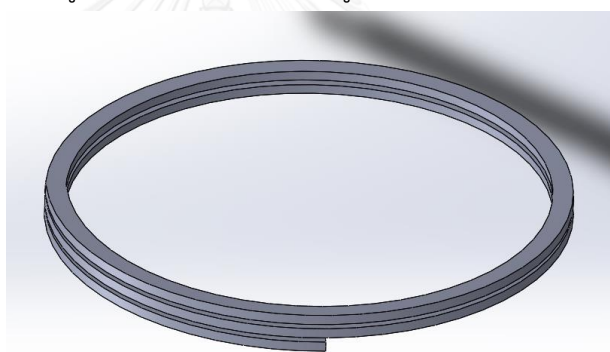
โดยผลการคำนวณที่ได้จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนมวลให้กับไมโครแชนแนลและลดภาระในกระบวนการแยกของไหลที่ไม่ละลายเข้าหากันออกจากกัน

## 5.2 การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS WORKBENCH

ในงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการสร้างแบบจำลองในรูปแบบ 3 มิติจำนวน 3 รูปแบบที่ใช้ในการคำนวณประกอบไปด้วย ไมโครเซนแนลรูปแบบตรง (Straight), ไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งที่มีรัศมีคงที่ (Helix) และไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งที่มีรัศมีไม่คงที่ (Spiral) ตามรูปที่ 5.2-5.5 และมีขนาดของพื้นที่หน้าตัดตามตารางที่ 5.1 โดยทำการสร้างรูปทั้งหมดในโปรแกรม ANSYS WORKBENCH



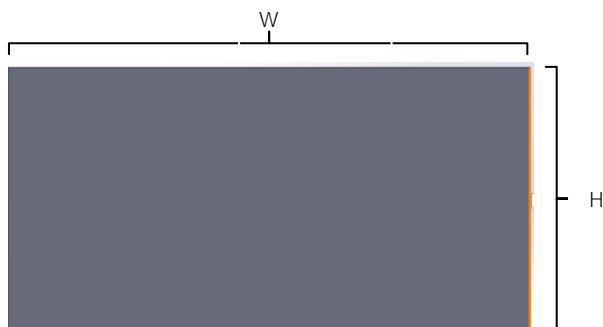
รูปที่ 5.2 ไมโครเซนแนลรูปแบบตรง



รูปที่ 5.3 ไมโครเซนแนลแนลที่มีรูปร่างโค้งรัศมีคงที่



รูปที่ 5.4 ไมโครเซนแนลแนลที่มีรูปร่างโค้งไม่รัศมีคงที่



รูปที่ 5.5 ขนาดของพื้นที่หน้าตัดไมโครแชนแนล

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรที่ใช้กำหนดลักษณะของไมโครแชนแนล

รูปแบบ	พื้นที่หน้าตัด ช่องทางการไหล	กว้าง (W)	สูง(H)	ยาว(L)
Straight	0.02 mm <sup>2</sup>	0.2 mm	0.1 mm	2.2 cm
Helix	0.02 mm <sup>2</sup>	0.2 mm	0.1 mm	2.2 cm
Spiral	0.02 mm <sup>2</sup>	0.2 mm	0.1 mm	2.2 cm

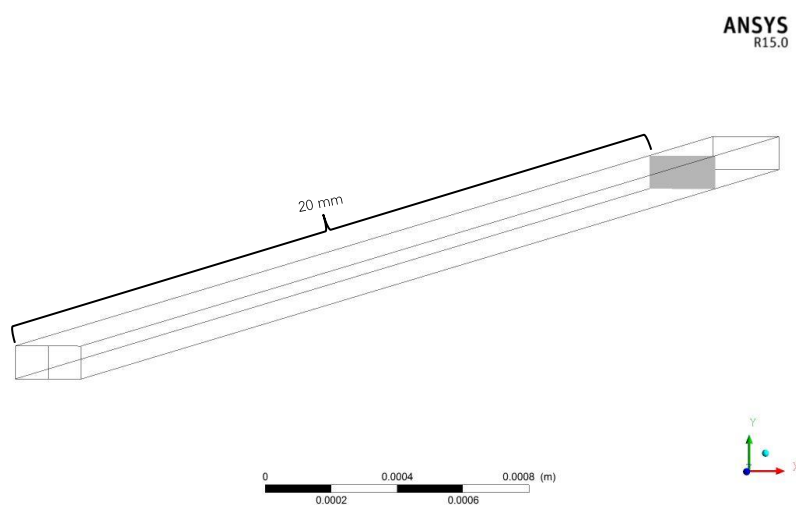
### 5.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบและวิธีการคำนวณที่พิจารณา

การกำหนดเงื่อนไขขอบของแบบจำลองไมโครแชนแนลที่พิจารณาทั้ง 3 รูปแบบจะทำการกำหนดที่เหมือนกัน โดยกำหนดให้อัตราการไหลทั้ง 3 รูปแบบมีอัตราการไหลที่คงที่ในช่วง 0.01-0.2 mm<sup>3</sup>/s โดยของไหล Toluene และน้ำถูกกำหนดให้เป็นการไหลแบบของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid flow) โดยใช้ Pressure base segregated solver ในโปรแกรมสำเร็จรูปเป็นตัวคำนวณ, กำหนดการไหลที่พิจารณาเป็นที่สภาวะคงตัวไม่ขึ้นกับเวลา (Steady state)แบบ Multiphase flow โดยใช้วิธีการคำนวณแบบ Volume of Fluid สำหรับของไหลที่ไม่ละลายเข้าหากัน, กำหนดค่าแรงตึงผิวระหว่างเฟสที่ 0.0371 N/m ตามการทดลองของ Dessimoz et al. (2008), ค่ามุมผิวสัมผัสระหว่าง Toluene กับน้ำมีค่าเท่ากับ 37° ตามการทดลองของ Aota et al. (2009), และการไหลที่พื้นผิวสัมผัสกับผนังมีค่าความเร็วเป็นศูนย์ (no slip condition)

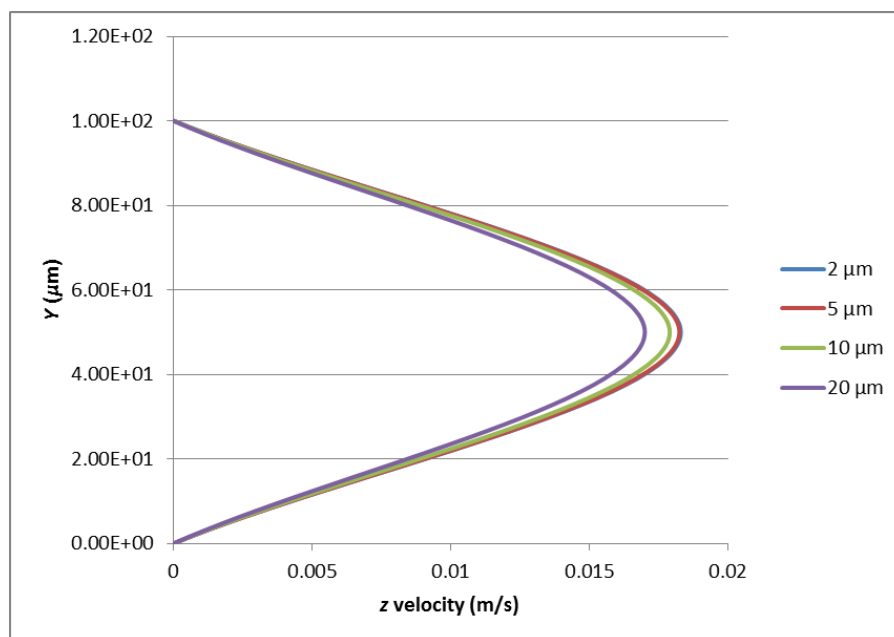


#### 5.4 การแบ่งขนาดกริดของแบบจำลองและการทดสอบหาขนาดกริดที่เหมาะสมสำหรับปัญหา

เนื่องจากปัญหานี้เป็นปัญหาที่ค่อนข้างมีความซับซ้อนในการไหลทั้งในส่วนของรูปร่างอุปกรณ์และของไหลทั้ง 2 ชนิดที่ไม่ละลายเข้าหากันจึงทำการทดสอบเพื่อหาขนาดกริดที่เหมาะสมที่จะใช้ในการคำนวณเพราะถ้าใช้กริดที่มีขนาดละเอียดมากเกินไปจะทำให้สูญเสียเวลาในการคำนวณที่มากเกินไปจนจำเป็นแต่ถ้าใช้กริดที่มีความละเอียดน้อยเกินไปก็จะทำให้ได้ค่าคำตอบสุดท้ายที่ไม่ใกล้เคียงกับความจริง การทดสอบหาความเป็นอิสระต่อจำนวนกริด (Grid independence test) จึงมีความจำเป็นต่องานวิจัยอย่างมากโดยในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบ Velocity profile ที่ระยะ 20 mm ห่างจากทางเข้าที่สภาวะการไหล  $0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$  ตามรูปที่ 5.6 โดยแบ่งขนาดของกริดออกเป็น 4 ขนาดคือ  $2 \mu\text{m}$ ,  $5 \mu\text{m}$ ,  $20 \mu\text{m}$ ,  $30 \mu\text{m}$  ทดสอบในไมโครแชนแนลรูปแบบตรง



รูปที่ 5.6 ตำแหน่งระนาบที่ทำการพิจารณาการหาขนาดกริดอิสระ



รูปที่ 5.7 Velocity profile ที่ทำการทดสอบที่ขนาดกริดที่แตกต่างกันบนระนาบที่ทำการพิจารณา

ตารางที่ 5.2 ค่าการทดสอบความเร็วสูงสุดที่ขนาดกริดแตกต่างกัน

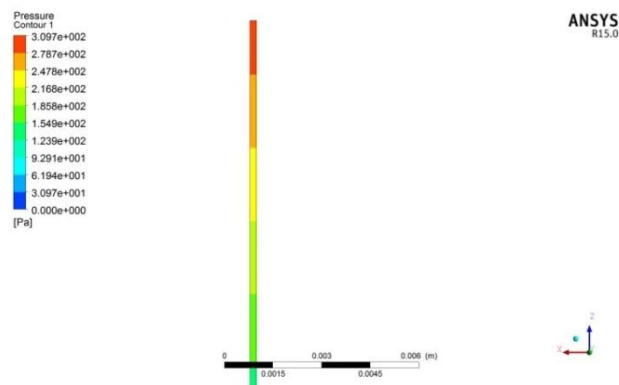
Grid Size	20 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$
Maximum Velocity (z velocity m/s)	0.0168	0.0172	0.0179	0.0179

จากนั้นพิจารณาโดยเปรียบเทียบค่าความเร็วสูงสุดกับขนาดของกริดที่แตกต่างกัน เพื่อหาขนาดกริดที่เหมาะสมสำหรับการศึกษา หากพิจารณาจากรูปที่ 5.7 และตารางที่ 5.2 จะเห็นว่ากริดขนาด 5  $\mu\text{m}$  ให้ผลลัพธ์การคำนวณที่มีค่าเท่ากับกับขนาดกริด 2  $\mu\text{m}$  โดยมีค่าความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.0179 m/s แต่ขนาดกริด 2  $\mu\text{m}$  ใช้เวลาในการคำนวณและสิ้นเปลืองทรัพยากรมากกว่าดังนั้นจึงเลือกขนาดกริดที่ใช้ในการคำนวณที่ 5  $\mu\text{m}$

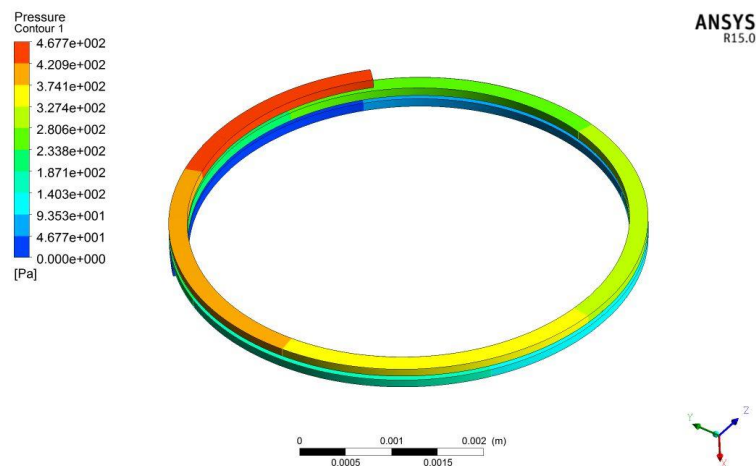
### 5.5 การวิเคราะห์ผลของค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากไมโครเซนแนลรูปแบบโค้ง

สำหรับค่าความดันตกคร่อมตลอดความยาวของไมโครเซนแนลทั้ง 3 รูปแบบจะมีลักษณะการกระจายตัวของความดันตามรูปที่ 5.8-5.10 และเมื่อเทียบกับอัตราการไหลที่แตกต่างกันจะพบว่า

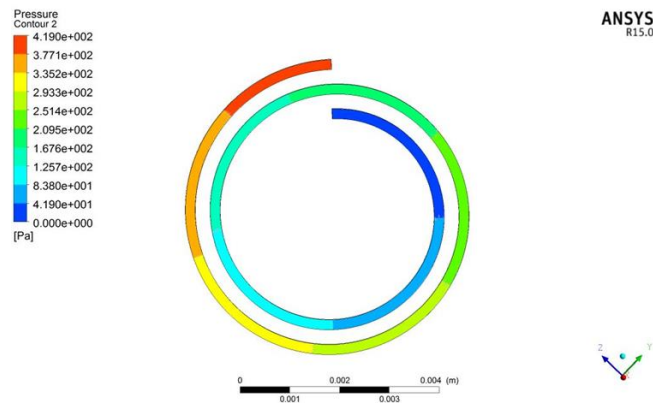
ค่าความดันตกคร่อมของไมโครแชนแนลในรูปแบบรัศมีคองที่ (Helix) ให้ค่าความดันตกคร่อมสูงที่สุด ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแบบโค้งที่รัศมีไม่คองที่ (Spiral) ส่วนแบบตรง (Straight) นั้นให้ค่าความดันตกคร่อมที่น้อยที่สุดตามตารางที่ 5.3 โดยไมโครแชนแนลทั้ง 3 รูปแบบมีค่าความดันตกคร่อมสัมพันธ์กับอัตราการไหลในลักษณะเชิงเส้นตรงแสดงให้เห็นว่าการไหลภายในนั้นมีพฤติกรรมการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ตามรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.8 ความดันตกคร่อมภายในไมโครแชนแนลรูปแบบตรง ที่อัตราการไหล  $0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$



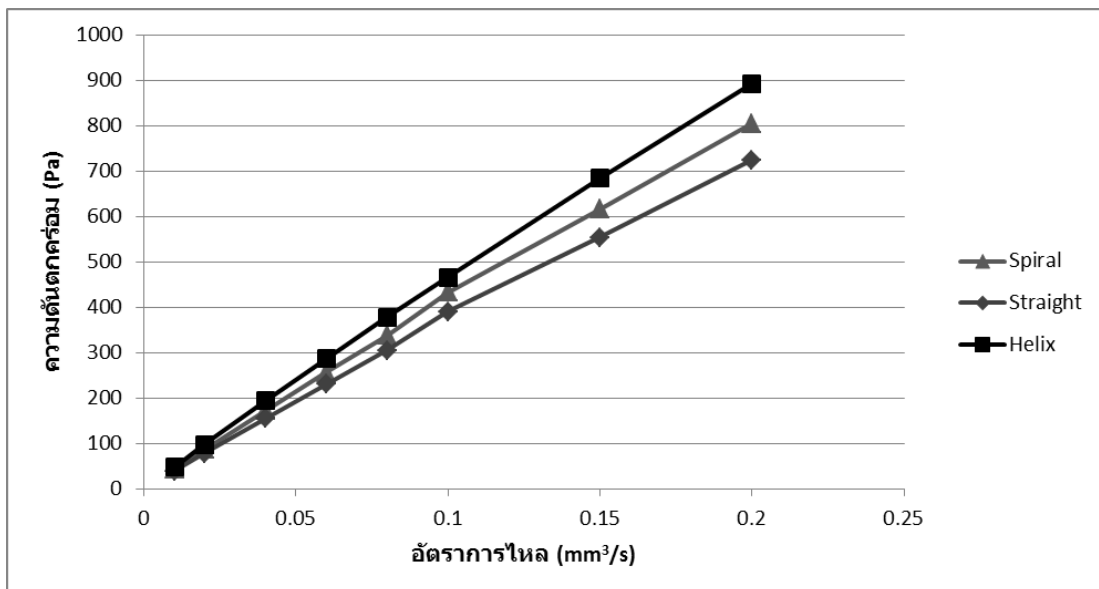
รูปที่ 5.9 ความดันตกคร่อมภายในไมโครแชนแนลรูปแบบรัศมีคองที่ ที่อัตราการไหล  $0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$



รูปที่ 5.10 ความดันตกคร่อมภายในไมโครเซนแนลรูปแบบปริซึมไม่คงที่ ที่อัตราการไหล  $0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$

ตารางที่ 5.3 ค่าความดันตกคร่อม (Pa) ที่อัตราการไหล  $0.01\text{-}0.2 \text{ mm}^3/\text{s}$

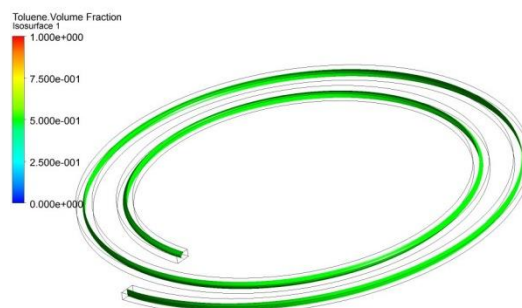
Flow Rate ( $\text{mm}^3/\text{s}$ )	Pressure drop (Pa)		
	Straight	Helix	Spiral
0.01	38.7	48	43
0.02	78.32	97.84	87.02
0.04	154.8	193.4	172
0.06	230.5	286.9	256.2
0.08	304.47	378.2	338.3
0.10	389.7	466	433
0.15	553.6	684	615.2
0.20	724.4	893	804.9



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับอัตราการไหลของไมโครเซนแนลทั้ง 3 รูปแบบ

## 5.6 ผลของความเร็วและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางต่อค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลต่อปริมาตร

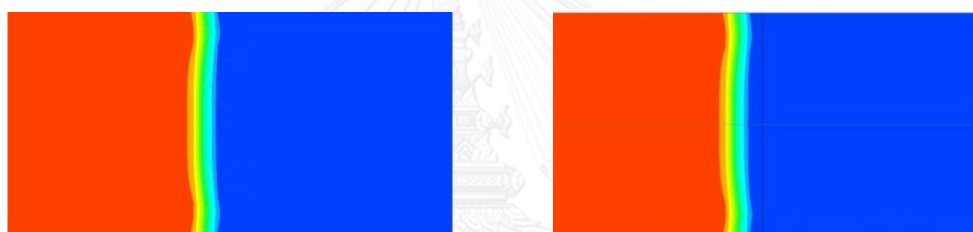
ในการศึกษาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลต่อปริมาตรจะเปรียบเทียบระหว่าง แบบที่ไม่มีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในไมโครเซนแนลรูปแบบตรงเทียบกับไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งที่มีผลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเข้ามาเกี่ยวข้องและส่งผลกระทบต่อค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลต่อปริมาตรนั้น จะมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วของๆไหลและรัศมีของรูปทรงไมโครเซนแนล โดยการพิจารณาหาพื้นที่ผิวสัมผัสนั้นเราจะพิจารณาพื้นที่บนระนาบที่มีค่า Toluene Volume of Fraction เท่ากับ 0.5ภายในไมโครเซนแนลแต่ละรูปแบบ ตามรูปที่ 5.12 ที่แสดงตำแหน่งพิจารณา



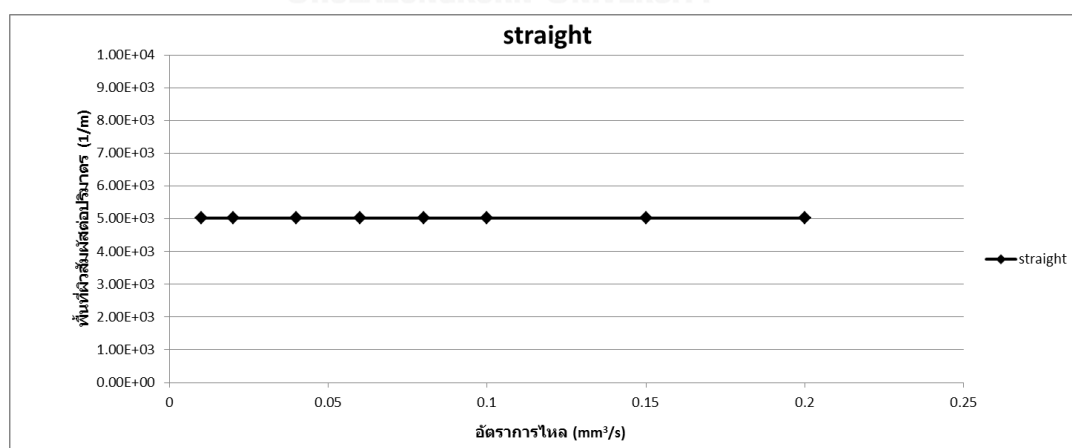
รูปที่ 5.12 ตำแหน่งที่พิจารณาพื้นที่ผิวสัมผัสของๆไหลบนค่า Toluene Volume of Fraction เท่ากับ 0.5

## 1. ไมโครเซนแนลรูปแบบตรง (Straight)

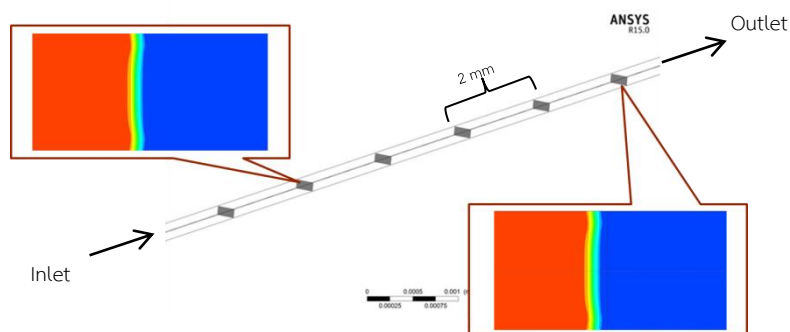
จากการศึกษาที่ค่าอัตราการไหลในช่วง  $0.01-0.2 \text{ mm}^3/\text{s}$  พบว่าไมโครเซนแนลรูปแบบตรงนั้นจะให้พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรที่น้อยที่สุดจากทั้งหมด 3 รูปแบบ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพื้นที่ผิวสัมผัส โดยเมื่อพิจารณาเส้นพื้นผิวสัมผัสบนพื้นผิวหน้าตัดจะได้เป็นรูปร่างโค้งเพียงเล็กน้อยตรงตามรูปที่ 5.13 แต่อัตราการไหลที่สูงขึ้นจะมีผลต่อตำแหน่งของพื้นผิวสัมผัสที่จะขยับไปทางเฟสของ Toluene มากขึ้นโดยยังคงรูปร่างและความยาวของเส้นแบ่งผิวสัมผัสเหมือนเดิมตามรูปที่ 5.14 ที่แสดงค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการไหลที่เกิดขึ้นภายในไมโครเซนแนลรูปแบบตรง (Straight) และรูปที่ 5.15 ที่แสดงให้เห็นว่าความยาวตามการวางตัวของไมโครเซนแนลรูปแบบตรง ไม่ส่งผลต่อรูปร่างและการเพิ่มขึ้นของค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร



รูปที่ 5.13 ลักษณะพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลทั้งสองชนิดที่อัตราการไหล  $0.01 \text{ mm}^3/\text{s}$  กับ  $0.2 \text{ mm}^3/\text{s}$  ตามลำดับ (สีแดง คือ Toluene, สีน้ำเงิน คือ น้ำ)



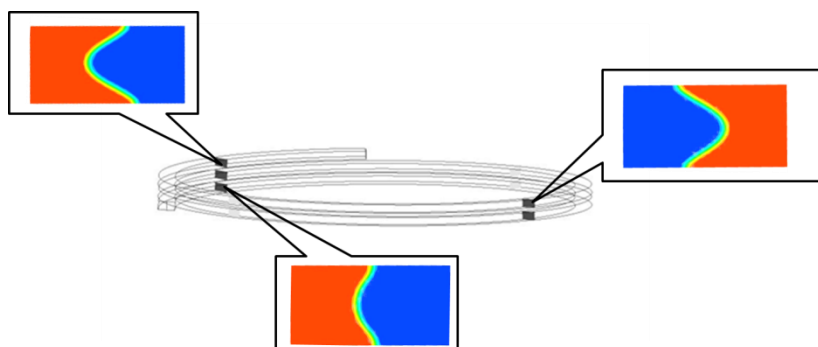
รูปที่ 5.14 ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของไมโครเซนแนลรูปแบบตรง



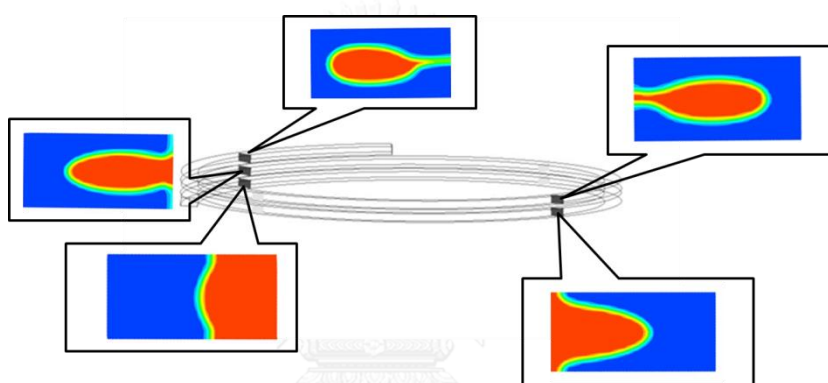
รูปที่ 5.15 รูปร่างของพื้นผิวสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆในไมโครแชนแนลรูปแบบตรง

## 2.1 ไมโครแชนแนลแบบโค้งที่มีรัศมีคงที่ (Helix)

เพื่อพิจารณาการไหลที่เกิดขึ้นภายในไมโครแชนแนลให้มีความเสถียรมากที่สุด ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงเริ่มจากการพิจารณาถึงตำแหน่งการไหลของของไหลทั้ง 2 ชนิดคือ Toluene กับ น้ำ โดยพิจารณาเปรียบเทียบแบ่งเป็น 2 กรณีคือ 1.กำหนดให้ Toluene มีตำแหน่งการไหลอยู่วงนอกและน้ำมีตำแหน่งการไหลอยู่วงในตามรูปที่ 5.16 2.กำหนดให้น้ำมีตำแหน่งการไหลอยู่วงนอกและ Toluene ตำแหน่งการไหลอยู่วงในตามรูปที่ 5.17 โดยผลการคำนวณพบว่ากรณีที่ 1 ให้ผลการไหลที่เสถียรกว่ากรณีที่ 2 ตั้งแต่ที่อัตราการไหล  $0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$  เป็นต้นไป โดยการไหลในกรณีที่ 2 จะเกิดการไหลในลักษณะที่เป็น Annular ที่บริเวณปลายใกล้กับทางออกของไมโครแชนแนลซึ่งไม่สามารถคงสถานะแบ่งชั้นและตำแหน่งการไหลเอาไว้ได้จึงสามารถสรุปได้ว่าการไหลในรูปแบบโค้งที่มีรัศมีคงที่ (Helix) จะให้ผลการคงสถานะแยกชั้นไว้ได้ดี ในกรณีที่มิตำแหน่งการไหลตามกรณีที่ 1 ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงเลือกพิจารณาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลในสภาวะการไหลตามรูปแบบกรณีที่ 1 เพียงอย่างเดียว



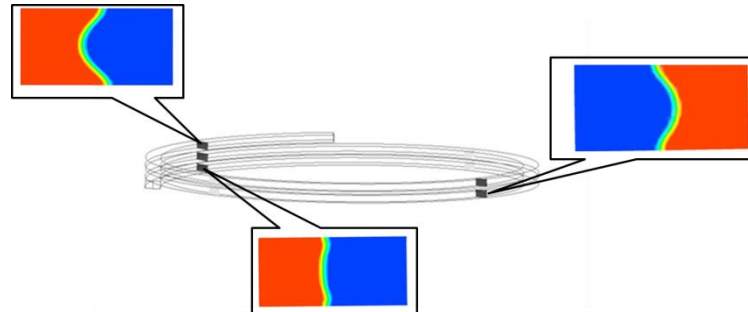
รูปที่ 5.16 การไหลที่กำหนดให้ Toluene มีตำแหน่งการไหลอยู่วงนอกและน้ำมีตำแหน่งการไหลอยู่วงในที่อัตราการไหล  $0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$



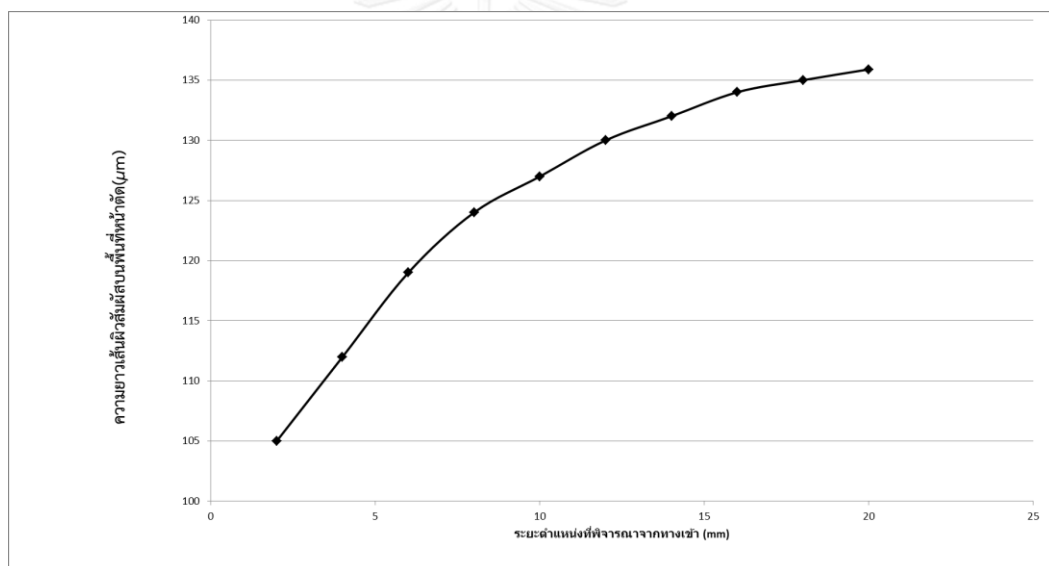
รูปที่ 5.17 การไหลที่กำหนดให้น้ำมีตำแหน่งการไหลอยู่วงนอกและ Toluene มีตำแหน่งการไหลอยู่วงในที่อัตราการไหล  $0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$

โดยเมื่อพิจารณาตามกรณีที่กล่าวไว้ข้างต้นจะพบว่าไมโครแชนแนลแบบโค้งที่มีรัศมีโค้งที่ (Helix) จะให้พื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลและตามแนวความยาวของไมโครแชนแนล โดยลักษณะการโค้งของเส้นแบ่งพื้นผิวสัมผัสนั้นที่จุดโค้งสูงสุดจะมีลักษณะโค้งที่เยื้องออกจากเส้นกึ่งกลางของไมโครแชนแนลอันเนื่องมาจากการวางตัวของรูปร่างไมโครแชนแนลในแนวแกนทำให้เกิดแรงเหวี่ยง 2 แนวคือ 1. แนวรัศมีที่เกิดจากการโค้งของไมโครแชนแนล 2. แนวของระยะพิตช์ที่เกิดจากการยกตัวของการโค้งในแต่ละรอบตามรูปที่ 5.18 และเมื่อพิจารณาความยาวเส้นแบ่งผิวสัมผัสที่เกิดกับระยะทางตามแนวความยาวการวางตัวของไมโครแชนแนลจะพบว่ามีค่าความสัมพันธ์เพิ่มขึ้นตามรูปที่ 5.19 โดยพื้นที่ที่จะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆหนึ่งของแต่ละความเร็วจากนั้นจะเข้าใกล้ค่าคงที่ค่าหนึ่งของแต่ละความเร็ว



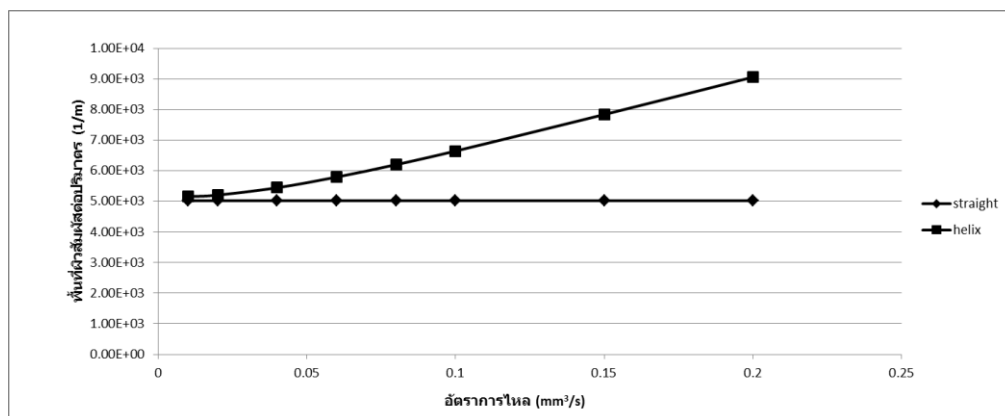


รูปที่ 5.18 รูปร่างพื้นที่หน้าตัดแต่ละตำแหน่งที่เกิดขึ้นภายในไมโครแชนแนลรูปแบบรัศมีคงที่ (Helix) ที่อัตราการไหล  $0.08 \text{ mm}^3/\text{s}$



รูปที่ 5.19 ความยาวของเส้นแบ่งเฟสที่เปลี่ยนแปลงตามความยาวของไมโครแชนแนลที่อัตราการไหล  $0.08 \text{ mm}^3/\text{s}$

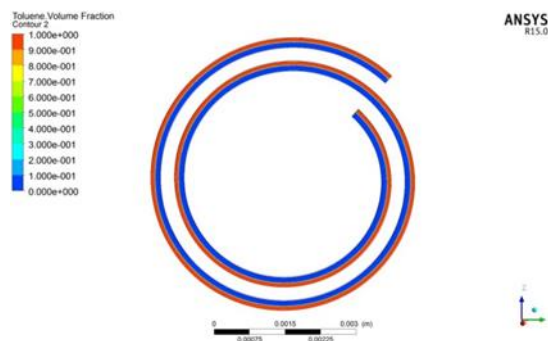
เมื่อพิจารณาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรที่เกิดขึ้นในไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งรัศมีคงที่ (Helix) เทียบกับไมโครเซนแนลรูปแบบตรงพบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 10-90 % โดยขึ้นกับอัตราการไหลที่เกิดขึ้นภายในไมโครเซนแนลตั้งแต่ช่วง  $0.01-0.2 \text{ mm}^3/\text{s}$  ตามรูปที่ 5.20



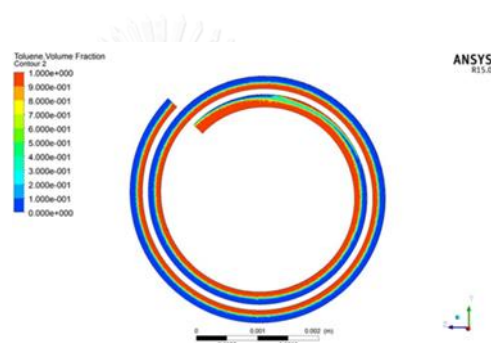
รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ของค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรกับอัตราการไหลของไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งรัศมีคงที่

## 2.2 แบบโค้งรัศมีไม่คงที่ (spiral)

เพื่อพิจารณาหาการไหลที่เกิดขึ้นภายในไมโครเซนแนลแบบโค้งรัศมีไม่คงที่ (Spiral) ให้มีความเสถียรมากที่สุดจึงเริ่มจากการพิจารณาถึงตำแหน่งการไหลของของไหลทั้ง 2 ชนิดโดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีเหมือนกับที่ระบุไว้ในหัวข้อ 2.1 ซึ่งเป็นการพิจารณาดำเนินการที่เหมาะสม โดยผลการคำนวณที่ได้มีความสอดคล้องไปในทางเดียวกันคือ การไหลที่กำหนดให้ Toluene มีตำแหน่งการไหลอยู่วงนอกและน้ำมีตำแหน่งการไหลอยู่วงในให้ผลการไหลที่แบ่งแยกเฟสได้ดีกว่าตามรูปที่ 5.21 และ 5.22 ที่แสดงว่าเมื่อนำ Toluene มาอยู่ไหลที่ตำแหน่งวงในจะเกิดการสลับตำแหน่งเฟสที่บริเวณใกล้กับทางออกจากเดิมที่น้ำไหลอยู่บริเวณวงนอกจะเปลี่ยนบริเวณมาไหลบริเวณวงใน



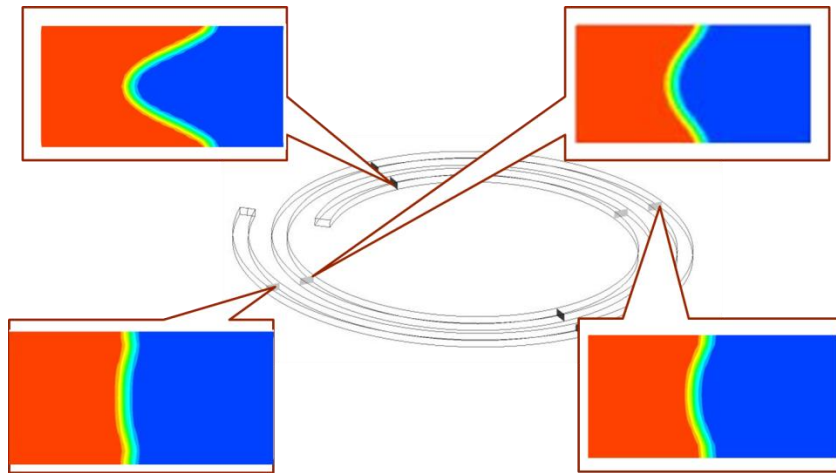
รูปที่ 5.21 การไหลที่กำหนดให้ Toluene มีตำแหน่งการไหลอยู่วงนอกและน้ำมีตำแหน่งการไหลอยู่วงในที่อัตราการไหล  $0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$



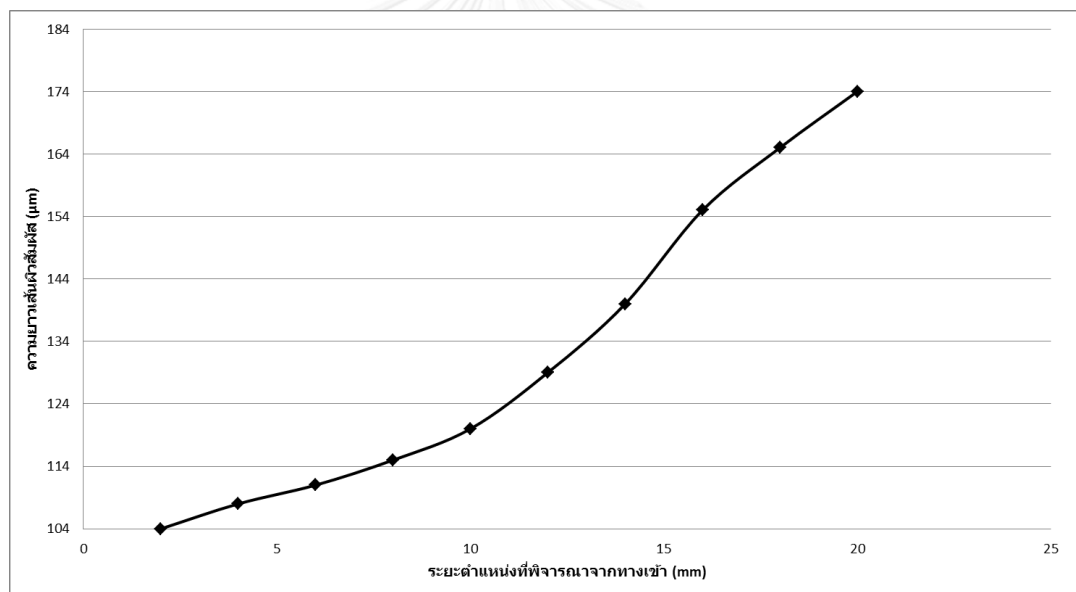
รูปที่ 5.22 การไหลที่กำหนดให้ Toluene มีตำแหน่งการไหลอยู่วงในและน้ำมีตำแหน่งการไหลอยู่วงนอกที่อัตราการไหล  $0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยเมื่อพิจารณาตามเงื่อนไขที่กล่าวไว้ข้างต้นจะพบว่าแบบโค้งที่มีรัศมีไม่คงที่ (spiral) จะให้พื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้น โดยลักษณะการโค้งของเส้นแบ่งพื้นผิวสัมผัสระหว่างของไหลนั้นที่จุดโค้งสูงสุดจะอยู่ที่จุดกึ่งกลางของไมโครเซนแนลและมีลักษณะที่สมมาตรระหว่างด้านบนกับด้านล่างตามรูปที่ 5.23 เนื่องจากไม่มีแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของระยะพิตซ์จึงทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในแนวเดียว และเมื่อพิจารณาความยาวเส้นผิวสัมผัสที่เกิดกับระยะทางตามแนวความยาวการวางตัวของไมโครเซนแนลจะพบว่ามีค่าความสัมพันธ์เพิ่มขึ้นตามรูปที่ 5.24 โดยพื้นที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรกและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อพิจารณาในช่วงที่รัศมีแคบลง

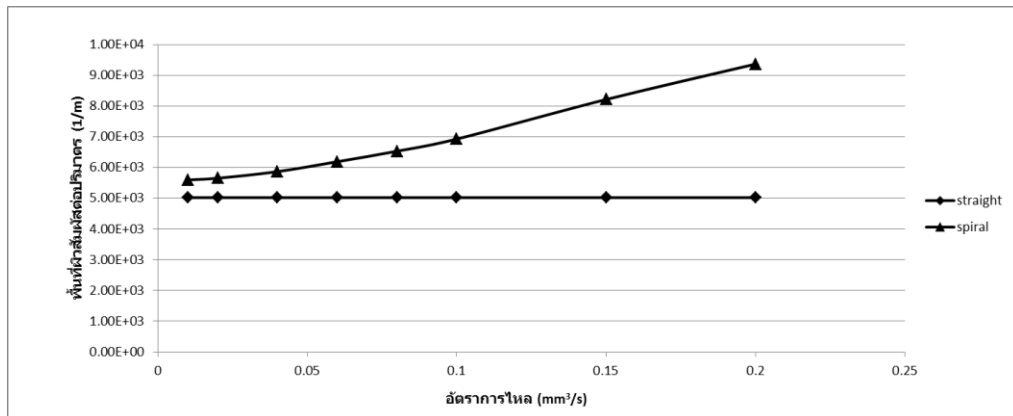


รูปที่ 5.23 รูปร่างพื้นที่หน้าตัดแต่ละตำแหน่งที่เกิดขึ้นภายในไมโครแชนแนลรูปแบบเบรคมีไม่คงที่ (Spiral) ที่อัตราการไหล  $0.08 \text{ mm}^3/\text{s}$



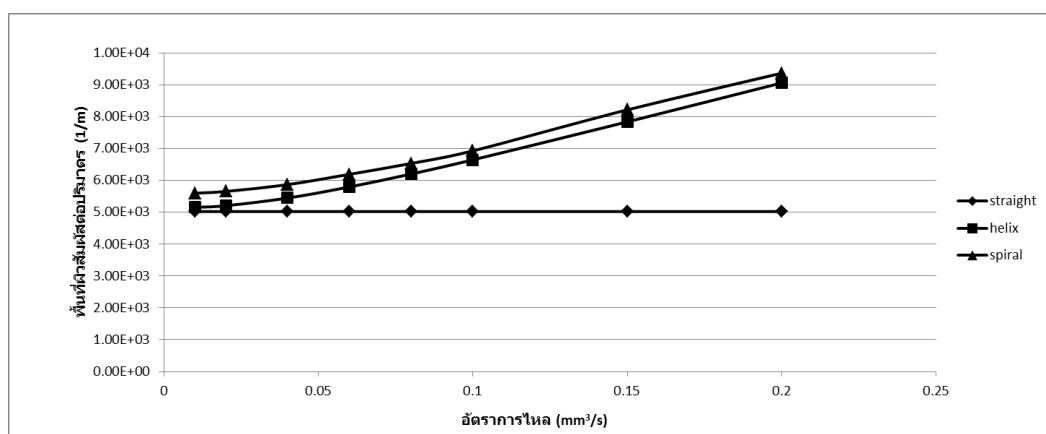
รูปที่ 5.24 ความยาวของเส้นใยสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงตามความยาวของไมโครแชนแนลที่อัตราการไหล  $0.08 \text{ mm}^3/\text{s}$

เมื่อพิจารณาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรที่เกิดขึ้นในไมโครแชนแนลรูปแบบโค้งที่รัศมีไม่คงที่ (Spiral) เทียบกับไมโครแชนแนลรูปแบบตรงพบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 10-95 % โดยขึ้นกับอัตราการไหลที่เกิดขึ้นภายในไมโครแชนแนลตั้งแต่ช่วง  $0.01-0.2 \text{ mm}^3/\text{s}$  ตามรูปที่ 5.25



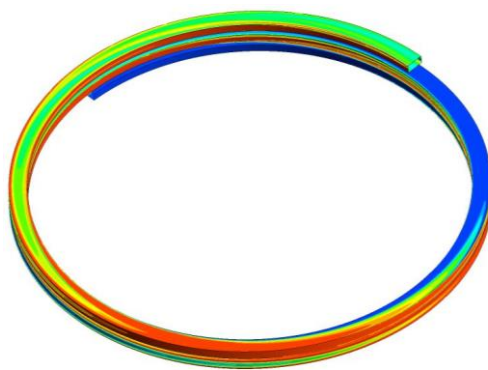
รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ของค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรกับอัตราการไหลของไมโครเซนแนล  
รูปแบบโค้งที่รัศมีไม่คงที่

จากการศึกษาพบว่าอุปกรณ์ไมโครเซนแนลในช่องทางแบบโค้งที่อัตราการไหล 0.01 – 0.2 mm<sup>3</sup>/s จะเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในช่องทางการไหลส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรในรูปแบบโค้งสูงกว่าแบบตรงประมาณ 10-95 % โดยขึ้นกับค่าอัตราการไหลและรัศมีความโค้งที่แตกต่างกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งทั้ง 2 รูปแบบ พบว่าแบบโค้งที่มีรัศมีไม่คงที่จะให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรที่สูงกว่าแบบโค้งที่มีรัศมีคงที่ 5-10 % ที่อัตราการไหลที่เท่ากันตามรูปที่ 5.26 โดยค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ไมโครเซนแนลที่มีรูปแบบโค้งนั้นมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนมวลสารและพลังงานตลอดจนการเกิดปฏิกิริยาที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับแบบตรง

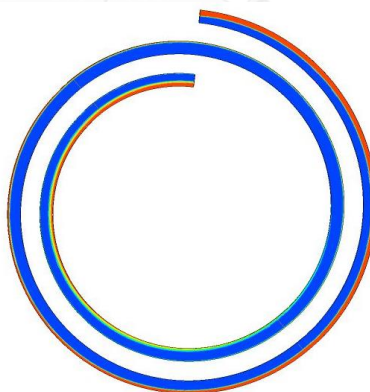


รูปที่ 5.26 อัตราการไหลและพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของไมโครเซนแนลทั้ง 3 รูปแบบ

โดยที่อัตราการไหลที่มากกว่า  $0.2 \text{ mm}^3/\text{s}$  ในไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งทั้ง 2 รูปแบบจะไม่สามารถคงสภาวะการแยกชั้นอย่างสมบูรณ์ไว้ได้ดังที่แสดงในรูปที่ 5.27 แสดงการไหลภายในไมโครเซนแนลที่รัศมีคงที่ที่อัตราการไหล  $0.3 \text{ mm}^3/\text{s}$  ของไหลภายในทั้งสองชนิดเริ่มที่จะแทรกเข้าหากัน และรูปที่ 5.28 แสดงการไหลภายในไมโครเซนแนลที่รัศมีไม่คงที่ที่อัตราการไหล  $0.3 \text{ mm}^3/\text{s}$  ของไหลจะเกิดการสลับตำแหน่ง หรือ Cross Phase position ระหว่างวงในกับวงนอก



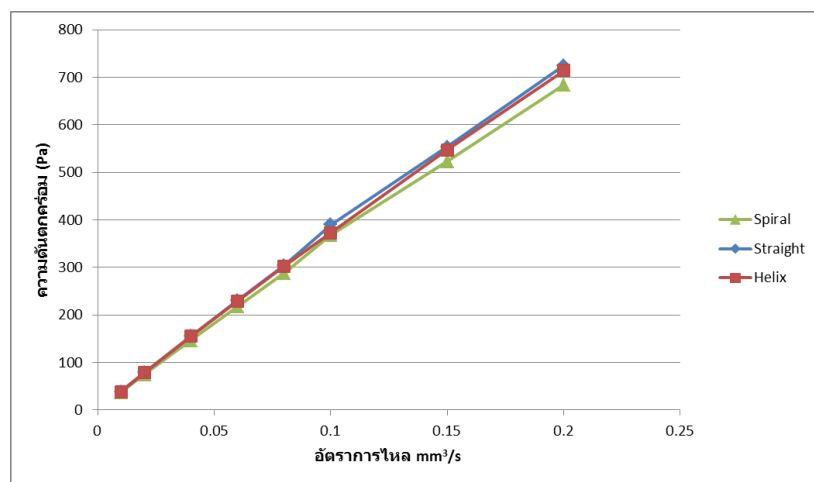
รูปที่ 5.27 การไหลภายในไมโครเซนแนลที่รัศมีคงที่ที่อัตราการไหล  $0.3 \text{ mm}^3/\text{s}$



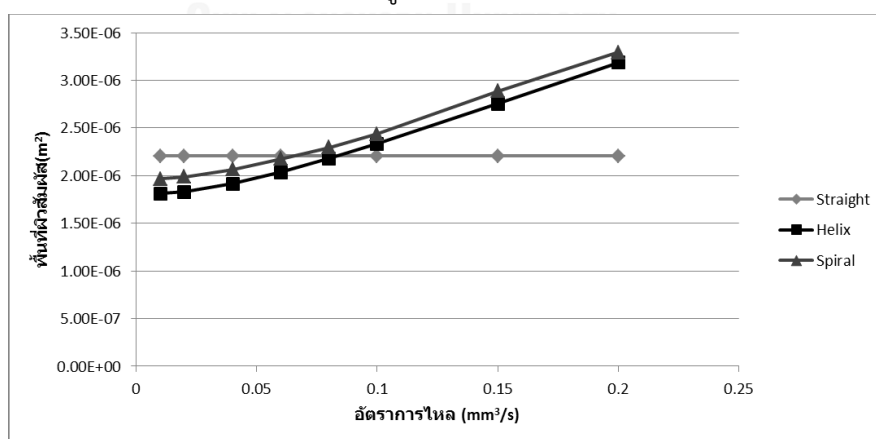
รูปที่ 5.28 แสดงการไหลภายในไมโครเซนแนลที่รัศมีไม่คงที่ที่อัตราการไหล  $0.3 \text{ mm}^3/\text{s}$

จากที่กล่าวมาจะพบว่าค่าความดันตกคร่อมในรูปแบบโค้งทั้ง 2 รูปแบบจะให้ค่าที่สูงกว่ารูปแบบตรงแต่จะให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรที่สูงกว่าด้วยดังนั้นเพื่อพิจารณาสมรรถนะเทียบกันระหว่างไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งกับรูปแบบตรงในงานวิจัยชิ้นนี้จึงเลือกที่จะลดขนาดของไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งทั้งสองรูปแบบให้มีขนาดที่สั้นและเล็กลง เพื่อให้ค่าความดันตกคร่อมในรูปแบบ

โค้งมีค่าที่ใกล้เคียงกับรูปแบบตรง เพื่อพิจารณาหาจุดที่ให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานระหว่างไมโครเซนแนลทั้ง 2 ชนิด โดยพบว่าเมื่อลดความยาวของไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งทั้ง 2 รูปแบบจนถึงจุดที่ให้ค่าความดันตกคร่อมมีค่าใกล้เคียงกับแบบตรงตามรูปที่ 5.29 จะพบว่าพื้นที่ผิวสัมผัสรวมในไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งสามารถให้ค่าสูงกว่าที่ตั้งแต่อัตราการไหล  $0.08 \text{ mm}^3/\text{s}$  จึงสามารถที่จะสรุปได้ว่าไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งนั้นจะให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่าแบบตรงและให้ขนาดที่เล็กกว่า ที่อัตราการไหลตั้งแต่  $0.08 \text{ mm}^3/\text{s}$  โดยรูปแบบโค้งรัศมีไม่คงที่จะให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสมากที่สุดตามรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.29 ค่าความดันตกคร่อมของไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งที่ลดความยาวเทียบกับไมโครเซนแนลรูปแบบตรง



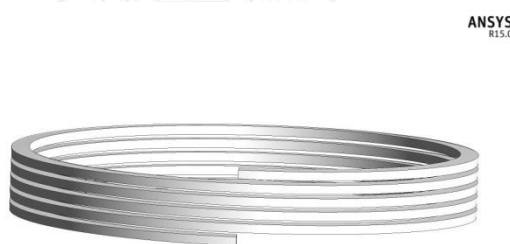
รูปที่ 5.30 ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสของไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งทั้ง 2 รูปแบบและรูปแบบตรง

### 5.7 การเพิ่มจำนวนวงรอบของไมโครเซนแนลรูปโค้งและอัตราการไหลที่ไม่เท่ากัน

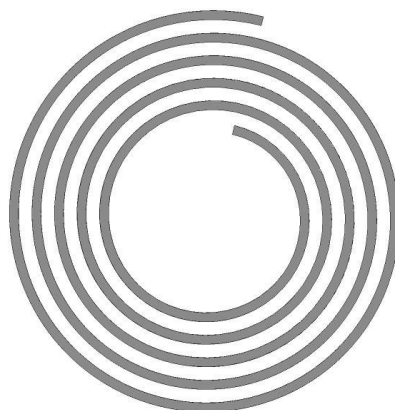
ในการศึกษาผลของการคงสถานะแยกชั้นที่อัตราการไหลและรูปร่างของไมโครเซนแนลที่แตกต่างกันพบว่าที่ค่าอัตราการไหลในช่วง  $0.01-0.2 \text{ mm}^3/\text{s}$  ในไมโครเซนแนลทั้ง 3 รูปแบบจะสามารถคงสถานะการแยกชั้นได้อย่างชัดเจนดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.6 โดยในหัวข้อที่ 5.7 นี้จะกล่าวเพิ่มเติมอีก 2 กรณีคือ 1.การเพิ่มจำนวนรอบของไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งทั้ง 2 รูปแบบ 2. สภาวะการไหลที่อัตราการไหลของของไหลไม่เท่ากัน

#### 1.การเพิ่มจำนวนรอบของไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งทั้ง 2 รูปแบบ

จากรูปแบบไมโครเซนแนลที่ทดสอบในหัวข้อที่แล้วจะใช้ไมโครเซนแนลที่มีรอบการโค้ง 2 รอบแต่ในการทดสอบหัวข้อนี้จะใช้การทดสอบไมโครเซนแนลที่มีจำนวนรอบการโค้งที่ 5 รอบ เพื่อศึกษาถึงลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นภายในไมโครเซนแนลโดยมีลักษณะตามรูปที่ 5.30 เป็นไมโครเซนแนลแบบโค้งที่มีรัศมีคงที่ (Helix) และ 5.31 เป็นไมโครเซนแนลแบบโค้งที่มีรัศมีไม่คงที่ (Spiral)



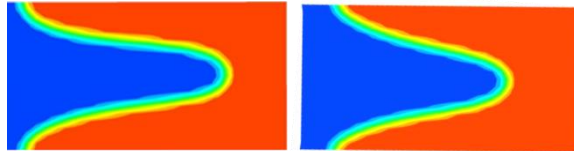
รูปที่ 5.31 ไมโครเซนแนลแบบโค้งที่มีรัศมีคงที่ (Helix) ที่มีรอบการโค้งที่ 5 รอบ



รูปที่ 5.32 ไมโครเซนแนลแบบโค้งที่มีรัศมีไม่คงที่ (Spiral) ที่มีรอบการโค้งที่ 5 รอบ

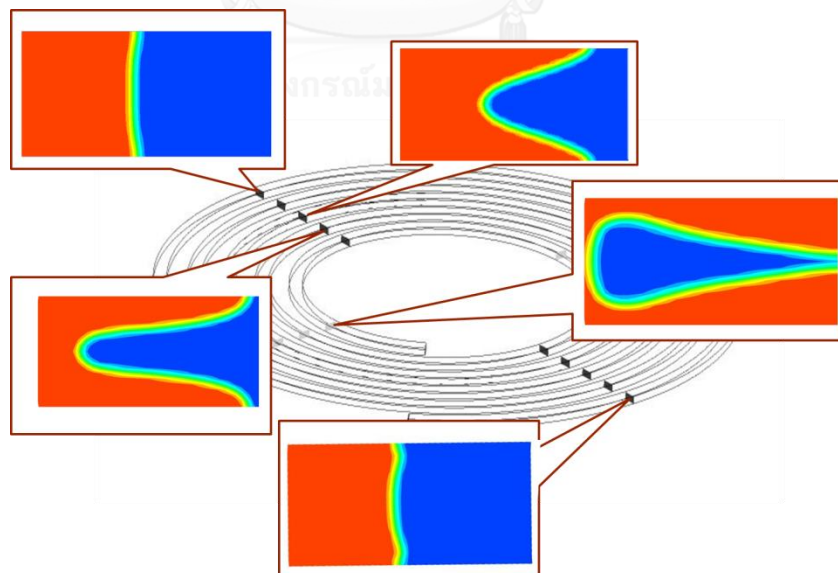


โดยเมื่อพิจารณาการโค้งที่เกิดขึ้นที่อัตราการไหล  $0.2 \text{ mm}^3/\text{s}$  จะพบว่าในไมโครเซนแนลแบบโค้งที่มีรัศมีคงที่ (Helix) จะให้เส้นผิวสัมผัสที่บริเวณทางออกมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากกับแบบที่มีการโค้ง 2 รอบตามรูปที่ 5.31 แต่จะมีค่าความดันตกคร่อมที่สูงกว่าถึง 2.5 เท่า



รูปที่ 5.33 เส้นผิวสัมผัสที่บริเวณทางออกของไมโครเซนแนลแบบรัศมีคงที่ โดยมีรอบการโค้งที่ 5 รอบ (รูปซ้าย) กับ 3 รอบ (รูปขวา)

ส่วนไมโครเซนแนลในรูปแบบการโค้งที่รัศมีไม่คงที่พบว่าที่อัตราการไหล  $0.2 \text{ mm}^3/\text{s}$  จะไม่สามารถคงสภาวะการแยกชั้นเอาไว้ได้เนื่องจากรัศมีภายในที่เล็กลงกว่าเดิมโดยของไหลจะเกิดการสลับตำแหน่งหรือ Cross Phase Position ระหว่างวงในกับวงนอกที่บริเวณใกล้กับทางออกของไมโครเซนแนล



รูปที่ 5.34 เส้นผิวสัมผัสที่บริเวณทางออกของไมโครเซนแนลแบบรัศมีไม่คงที่โดยมีการโค้งที่ 5 รอบ

จากที่กล่าวมาจะพบว่าค่าความดันตกคร่อมในรูปแบบโค้งทั้ง 2 รูปแบบจะให้ค่าที่สูงกว่ารูปแบบตรงแต่จะให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูงกว่าดังนั้นเพื่อพิจารณาสมรรถนะเทียบกันระหว่างไมโครแซนแนลรูปแบบโค้งกับรูปแบบตรงในงานวิจัยชิ้นนี้จึงเลือกแสดงค่าสมรรถนะพื้นที่ผิวสัมผัสต่อความดันตกคร่อม โดยตัวสมการจะกำหนดให้ค่าสมรรถนะไมโครแซนแนลรูปแบบตรงมีค่าเท่ากับ 1 ในแต่ละอัตราการไหลตามสมการ 5.1 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะกับอัตราการไหลตามรูปที่ 5.35 โดยสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบที่ให้ค่าสมรรถนะสูงสุด คือ ไมโครแซนแนลรูปแบบรัศมีไม่คงที่ (Spiral) ตามด้วยไมโครแซนแนลรูปแบบโค้งรัศมีคงที่ (Helix) และไมโครแซนแนลแบบตรง (Straight) ตั้งแต่ที่อัตราการไหลสูงกว่า  $0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$  แต่ที่อัตราการไหลที่ต่ำกว่า  $0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$  ไมโครแซนแนลรูปแบบตรงจะให้ค่าสมรรถนะที่สูงกว่าแบบโค้ง

$$\text{ค่าสมรรถนะพื้นที่ผิวสัมผัสต่อความดันตกคร่อม} = \frac{SVR_{curved} / SVR_{straight}}{\Delta P_{curved} / \Delta P_{straight}} \quad (5.1)$$

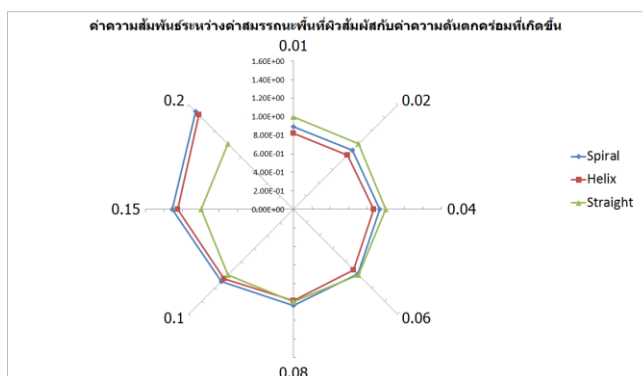
เมื่อกำหนดให้

$SVR_{curved}$  คือ ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของไมโครแซนแนลรูปแบบโค้ง

$SVR_{straight}$  คือ ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของไมโครแซนแนลรูปแบบตรง

$\Delta P_{curved}$  คือ ค่าความดันตกคร่อมของไมโครแซนแนลรูปแบบโค้ง

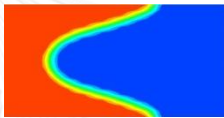
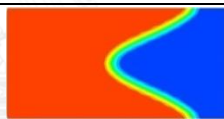
$\Delta P_{straight}$  คือ ค่าความดันตกคร่อมของไมโครแซนแนลรูปแบบตรง



รูปที่ 5.35 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะพื้นที่ผิวสัมผัสกับค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นที่แต่ละอัตราการไหล

นอกจากที่กล่าวมาแล้วเราจะพิจารณาสภาวะการไหลในไมโครแชนแนลรูปแบบโค้งแบบรัศมีไม่คงที่เนื่องจากมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรสูงที่สุด โดยพิจารณาให้น้ำและ Toluene มีอัตราการไหลที่อัตราส่วน 1:2 และ 2:1 ตามลำดับ เพื่อพิจารณาการคงสภาวะแยกชั้นในกรณีที่อัตราการไหลไม่เท่ากันโดยผลการคำนวณได้ตามตารางที่ 5.4 จะสามารถสรุปได้ว่าที่อัตราการไหลของ Toluene ที่มีค่าสูงกว่าจะส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสการไหลที่น้อยลงมากกว่าอีกรูปแบบ

ตารางที่ 5.4 พื้นที่หน้าตัดสภาวะการไหลที่อัตราการไหลของน้ำและ Toluene ที่มีค่าไม่เท่ากัน

Flow rate mm <sup>3</sup> /s	Cross section Outlet
Toluene 0.1 mm <sup>3</sup> /s Water 0.2 mm <sup>3</sup> /s	
Toluene 0.2 mm <sup>3</sup> /s Water 0.1 mm <sup>3</sup> /s	

### สรุปผลการวิเคราะห์

จากผลการคำนวณสามารถที่จะสรุปได้ว่าการใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นในไมโครแชนแนลรูปแบบโค้งนั้นส่งผลต่อรูปร่างและค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นภายในไมโครแชนแนล โดยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางนั้นส่งผลให้มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มมากขึ้นแต่ก็มีค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นตามด้วยเช่นกัน จึงเลือกเปรียบเทียบการคำนวณในไมโครแชนแนลรูปแบบโค้งที่มีขนาดที่สั้นลงเพื่อให้มีค่าความดันตกคร่อมที่ใกล้เคียงกันพบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลที่เกิดขึ้นมีค่าที่สูงกว่าแบบตรงที่อัตราการไหล 0.08 mm<sup>3</sup>/s จึงสามารถที่สรุปได้ว่าไมโครแชนแนลรูปแบบโค้งนั้นให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูงกว่าแบบตรง ส่วนการเพิ่มจำนวนรอบของไมโครแชนแนลนั้นจะให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของไมโครแชนแนลจนเข้าใกล้ค่าคงที่ค่าหนึ่งของแต่ละอัตราการไหลในไมโครแชนแนลรูปแบบโค้งรัศมีคงที่ (Helix) แต่ถ้าเป็นในไมโครแชนแนลรูปแบบโค้งรัศมีไม่คงที่ (Spiral) การเพิ่มจำนวนรอบจะส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าจำนวนมีรอบที่มากเกินไปจะเกิดการสลับตำแหน่งของการไหล

## บทที่ 6

### บทสรุป และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบการไหลภายในไมโครแชนแนลและผลกระทบของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่มีผลต่อการแยกชั้นและพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลทั้งสองชนิดคือ Toluene และน้ำที่อัตราการไหลตั้งแต่  $0.01-0.2 \text{ mm}^3/\text{s}$  เป็นการไหลแบบราบเรียบที่มีการไหลในสภาวะคงตัวและเป็นชนิดที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid flow) โดยปัญหาการไหลที่พิจารณาเป็นการไหลแบบ 3 มิติ ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการคำนวณเทียบกับผลการทดลองที่ได้ในบทที่ 4 พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมีความสอดคล้องและความแม่นยำใกล้เคียงกับผลการทดลอง จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้โปรแกรมเพื่อคำนวณการไหลภายในไมโครแชนแนลสามารถทำได้ในระดับความถูกต้องที่ยอมรับได้

โดยลักษณะการไหลที่จะพิจารณาในงานวิจัยชิ้นนี้จะสนใจลักษณะการไหลที่สามารถยังคงสภาวะการแยกชั้นอย่างชัดเจนตลอดความยาวของไมโครแชนแนลจนถึงทางออกของอุปกรณ์เพื่อเป็นการลดภาระของขั้นตอนการแยกของไหลออกจากกัน (Phase separation process) ในกระบวนการถัดไป

โดยงานวิจัยชิ้นนี้นอกจากการพิจารณาลักษณะการไหลที่แยกชั้นกันจนถึงทางออกของอุปกรณ์แล้วยังพิจารณาในเรื่องวิธีการเพิ่มค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรด้วยการใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อเพิ่มค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรภายในไมโครแชนแนลที่อัตราการไหลและรูปร่างที่แตกต่างกัน

#### 6.1 บทสรุปของไมโครแชนแนลรูปแบบตรงและรูปแบบโค้ง

##### 6.1.1 เปรียบเทียบไมโครแชนแนลรูปแบบตรงและรูปแบบโค้งที่มีความยาวเท่ากัน

สามารถสรุปได้ว่าการออกแบบไมโครแชนแนลให้มีรูปแบบโค้งโดยใช้หลักการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางสามารถเพิ่มค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลต่อปริมาตรได้ถึง 10-95 % โดยขึ้นกับอัตราการไหลแต่จะมีค่าความดันตกคร่อมที่สูงกว่าแบบตรงประมาณ 50% ที่อัตราการไหลที่เท่ากันภายในไมโครแชนแนลที่มีความยาวเท่ากัน ในขณะที่อัตราการไหลที่สูงกว่า  $0.3 \text{ mm}^3/\text{s}$  จะเกิดการแยกชั้นที่ไม่เสถียรและเกิดการผสมกันระหว่างของไหลสองชนิดภายในไมโครแชนแนลที่มีลักษณะโค้ง โดยเฉพาะในรูปแบบรัศมีไม่คงที่ที่อัตราการไหล  $0.3 \text{ mm}^3/\text{s}$  จะเกิดการสลับตำแหน่งระหว่างเฟส

ในกับวงนอก แต่ในไมโครเซนแนลรูปแบบตรงที่อัตราการไหลที่สูงกว่า  $0.3 \text{ mm}^3/\text{s}$  นั้นจะยังคงสภาวะการแยกชั้นไว้ได้โดยไม่เกิดการผสมกันระหว่างของไหลทั้งสองชนิด

6.1.2 เปรียบเทียบไมโครเซนแนลรูปแบบตรงและรูปแบบโค้งที่มีค่าความดันตกคร่อมเท่ากัน

การลดความยาวของไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งเพื่อให้มีค่าความดันตกคร่อมที่เท่ากับหรือใกล้เคียงกับไมโครเซนแนลรูปแบบตรงนั้นพบว่าที่อัตราการไหลที่ต่ำกว่า  $0.08 \text{ mm}^3/\text{s}$  ไมโครเซนแนลรูปแบบตรงจะมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูงกว่าแต่เมื่อพิจารณาอัตราการไหลที่สูงกว่า  $0.08 \text{ mm}^3/\text{s}$  จะพบว่าไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งที่รัศมีไม่คงที่ให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูงที่สุดตามด้วยไมโครเซนแนลแบบรัศมีคงที่และไมโครเซนแนลรูปแบบตรง

6.1.3 การเพิ่มจำนวนรอบของไมโครเซนแนลรูปแบบโค้ง

การเพิ่มจำนวนรอบจะส่งผลต่อค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรที่สูงขึ้นมากกว่าจำนวนรอบที่น้อยอย่างชัดเจนก็ต่อเมื่อเป็นการเพิ่มรอบในลักษณะให้แรงเหวี่ยงและพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลสามารถเข้าสู่สภาวะที่สมดุลก่อนที่จะออกจากอุปกรณ์ไมโครเซนแนลรูปแบบโค้ง แต่ถ้าเป็นไมโครเซนแนลรูปแบบโค้งรัศมีไม่คงที่ การเพิ่มจำนวนรอบที่มากเกินไปจะส่งผลให้วงในมีรัศมีที่แคบจนของไหลไม่สามารถรักษาสถานะแบ่งเฟสไว้ได้จนถึงบริเวณทางออก

## 6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. ควรทำการจำลองของไหลในลักษณะที่มีการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในไมโครเซนแนลที่มีลักษณะโค้งหรือแบบตรงเพื่อช่วยในการคงสภาวะแยกชั้น
2. ควรเปลี่ยนสารที่ใช้ในการคำนวณเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง ค่าความหนืด แรงตึงผิว ค่ามุมสัมผัส
3. ควรลองการปรับเปลี่ยนพื้นที่หรือรูปร่างพื้นที่หน้าตัดเพื่อให้มีการคงสภาวะการแยกชั้นได้ดียิ่งขึ้น

## รายการอ้างอิง

Al-Yaari, M., Soleimani, A., Abu-Sharkh, B., Al-Mubaiyedh, U. and Al-sarkhi, A. (2009). "Effect of drag reducing polymers on oil–water flow in a horizontal pipe." International Journal of Multiphase Flow 35: 516-524.

Angeli, P. and Hewitt, G.F. (1999). "Liquid–Liquid Two-Phase Flow Patterns in a Serpentine Microchannel." Industrial & Engineering Chemistry Research 51: 1117-1140.

Aota, A., Hibara, A. and Kitamori, T. (2007). "Pressure Balance at the Liquid-Liquid Interface of Micro Countercurrent Flows in Microchips " American Chemical Society 79: 3919-3924.

Aota, A., Mawatari, K., Takahashi, S., Matsumoto, T., Kanda, K., Anraku, R., Hibara, A., Tokeshi, M. and Kitamori, T. (2009). "Phase separation of gas–liquid and liquid–liquid microflows in microchips." Microchimica Acta 164(3-4): 249-255.

Barreto, E.X., Oliveira, J.L.G. and Passos, J.C. (2015). "Frictional pressure drop and void fraction analysis in air–water two-phase flow in a microchannel." International Journal of Multiphase Flow 72: 1-10.

Dessimoz, A., Cavin, L., Renken, A. and Kiwi-Minsker, L. (2008). "Liquid–liquid two-phase flow patterns and mass transfer characteristics in rectangular glass microreactors." Chemical Engineering Science 63(16): 4035-4044.

Huh, D., Kuo, C.H., Grotberg, J.B. and Takayama, S. (2009). "Gas–liquid two-phase flow patterns in rectangular polymeric microchannels: effect of surface wetting properties." New Journal of Physics 11.

Iris, V. G., Kutup, K. S., Jasper, A., Qi, W., Timothy, N., Krishna, N., Norbert, K. and H.Volker (2016). "Utilization of milli-scale coiled flow inverter in combination with phase separator for continuous flow liquid–liquid extraction processes." Chemical Engineering Journal 283: 855-868.

Kositanont, C., Putivisutisak, S., Tagawa, T., Yamada, H. and Assabumrungrat, S. (2014). "Multiphase parallel flow stabilization in curved microchannel." Chemical Engineering Journal 253: 332-340.

Kositanont, C., Tagawa, T., Yamada, H., Putivisutisak, S. and Assabumrungrat, S. (2013). "Effect of surface modification on parallel flow in microchannel with guideline structure." Chemical Engineering Journal 215-216: 404-410.

Kriel, F.H., Holzner, G., Grant, R.A., Woollam, S., Ralston, J. and Priest, C. (2015). "Microfluidic solvent extraction, stripping, and phase disengagement for high-value platinum chloride solutions." Chemical Engineering Science 138: 827-833.

Kurt, S.K., Gürsel, I.V., Hessel, V., Nigamc, K.D.P. and Kockmanna, N. (2015). "Liquid–liquid extraction system with microstructured coiled flow inverter and other capillary setups for single-stage extraction applications." Chemical Engineering Journal 284: 764-777.

Miyazaki, M., Yamaguchi, Y., Honda, T. and Maeda, H. (2011). "Stable Horizontal Interface Formation and Separation of a Water/Oil Flow by Microfluidic Reactor Analyzed by Direct Observation and Numerical Simulation." The Open Chemical Engineering Journal 5: 13-17.

Patankar, S. V. (1980). "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow." Hemisphere Publishing Corporation.

Šalić, A. and Zelić, B. (2014). "MICROREACTORS - PORTABLE FACTORIES FOR BIODIESEL FUEL PRODUCTION." GOMABN 50: 85-110.

Yamamoto, M., Taguchi, S., Sato, S. and Surugaya, N. (2014). "Evaluation of plutonium(IV) extraction rate between nitric acid and tri-n-butylphosphate solution using a glass chipmicrochannel." Separation of science 38: 1807-1812.

Yue, J., Guangwen, C. and Quan, Y. (2004). "Pressure drops of single and two-phase flows through T-type microchannel mixers." Chemical Engineering Journal 102(1): 11-24.







ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศิวพล นิตยสุทธิ เกิดเมื่อวันที่ 5 สิงหาคม พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาระดับ  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท  
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557  
ประวัติการทำงาน ได้รับการบรรจุเข้าเป็นพนักงานรัฐวิสาหกิจ ในตำแหน่งวิศวกรระดับ 4 เมื่อปี  
2553 ที่หน่วยงานรัฐวิสาหกิจ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จนถึงปัจจุบันดำรงตำแหน่ง  
วิศวกรระดับ 6

