

การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของของไหลที่ไม่ละลายเข้าหากันด้วยการใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในไมโครแชนแนลรูปแบบโค้ง

Increasing surface area to volume of immiscible fluids by centrifugal force inside curved micro channel

ศิวพล นิตยสุทธิ*, สุทธิชัย อัสสะบารุงรัตน์** และ สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์***

*ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

**ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

***ติดต่อ: Email: Sompong.pu@chula.ac.th โทรศัพท์: 02-218-6637 โทรสาร: 02-252-2889

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขของของไหล 2 ชนิดที่ไม่ละลายเข้าหากัน ภายในอุปกรณ์ไมโครแชนแนลโดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT VERSION 15.0 เพื่อวิเคราะห์แนวทางการเพิ่มค่าสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหล 2 ชนิดที่ไหลคู่ขนานกันต่อปริมาตรโดยรวมของของไหล (Surface Area to Volume Ratio, SVR) โดยใช้หลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง รูปแบบท่อที่ศึกษาได้แก่รูปแบบโค้งที่มีรัศมีคงที่ และรูปแบบโค้งที่มีรัศมีไม่คงที่ เปรียบเทียบกับรูปแบบท่อตรง โดยกำหนดให้สภาพการไหลภายในอุปกรณ์นั้นยังคงสภาพการแยกชั้นและไหลคู่ขนานกันอย่างต่อเนื่องจนถึงทางออกของอุปกรณ์ไมโครแชนแนล

จากการศึกษาพบว่าอุปกรณ์ไมโครแชนแนลในช่องทางแบบโค้งที่อัตราการไหล $0.01 - 0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$ จะเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในช่องทางไหลส่งผลให้ค่า SVR สูงกว่าแบบตรงประมาณ 10-20 % โดยขึ้นกับค่าอัตราการไหลและรัศมีความโค้งที่แตกต่างกัน การเปรียบเทียบไมโครแชนแนล 2 รูปแบบ พบว่าแบบโค้งที่มีรัศมีไม่คงที่ (Spiral) จะให้ค่า SVR ที่สูงกว่าแบบโค้งที่มีรัศมีคงที่ (Helix) 5-10 % ที่อัตราการไหลที่เท่ากัน โดยค่า SVR ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ไมโครแชนแนลที่มีรูปแบบโค้งนั้นมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนมวลสารและพลังงานตลอดจนการเกิดปฏิกิริยาที่ดีกว่า เมื่อเทียบกับแบบตรง

คำหลัก: ไมโครแชนแนล, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

Abstract

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; i.e. helix (Fig. 1) and spiral (Fig. 2) were considered and compared with the conventional straight micro channel.

The simulation results, demonstrated that the curved micro channels at flow rates of $0.01 - 0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$ offer higher SVR than the linear micro channels about 10-20%, 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 linear micro channel.

Keywords: Micro channel, CFD, Centrifugal force

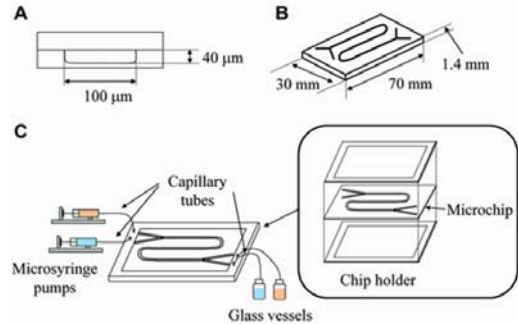
1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมมีขนาดเล็กลง เนื่องมาจากการพัฒนาของเทคโนโลยีการขึ้นรูปส่งผลให้อุปกรณ์ประเภทไมโครแชนแนลนั้นได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องเพราะให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงขึ้น การควบคุมการเกิดปฏิกิริยาที่ทำได้แม่นยำขึ้น และต้นทุนที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์มีราคาที่ถูกลง โดยสาเหตุที่ทำให้อุปกรณ์ขนาดเล็กในงานแลกเปลี่ยนความร้อนและการสกัดสาร สามารถให้ค่าประสิทธิภาพที่ดีกว่าอุปกรณ์ขนาดใหญ่เนื่องจากอุปกรณ์ขนาดเล็กนั้นมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรที่สูงกว่าอุปกรณ์ขนาดใหญ่ ดังแสดงในตัวอย่างของการเปรียบเทียบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Shell and tube และ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไมโครแชนแนลในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนในอุปกรณ์แต่ละประเภท [1]

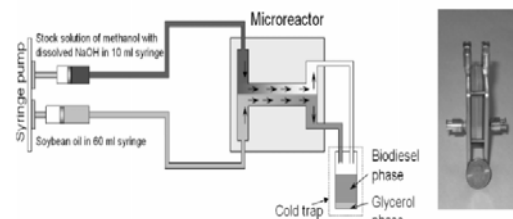
พารามิเตอร์	ประเภทอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน Shell and tube heat exchanger	Micro channel heat exchanger
พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร 1/m	50-100	>1,500
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน $W/(m^2 \cdot K)$ (ของเหลว)	~5,000	>7,000
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน $W/(m^2 \cdot K)$ (ก๊าซ)	20-100	400-2,000
Approach temperatur	~20 °C	<10 °C
รูปแบบการไหล	Turbulent	Laminar

นอกจากอุปกรณ์ประเภทแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วการใช้งานของอุปกรณ์ประเภทไมโครแชนแนลยังพบในการทดสอบเรื่องการสกัด Plutonium(IV) [2] โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 1 ซึ่งสามารถให้ค่าประสิทธิภาพการสกัดที่ 80 % และ ใช้เวลาในการทำงาน 5 วินาที โดยเป็นค่าที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดที่สูงกว่า และ เวลาในการทำงานของอุปกรณ์น้อยกว่าอุปกรณ์ขนาดใหญ่



รูปที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสกัด Plutonium(IV) [2]

ส่วนด้านพลังงานก็ยังมีกรทดลองใช้ไมโครรีแอกเตอร์ในการผลิตไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรม [3] โดยได้ทำการทดลองอุปกรณ์ที่มีขนาดกว้าง : ยาว : สูง เท่ากับ 50.8 cm : 40.64 cm : 20.32 cm ซึ่งสามารถที่ผลิตไบโอดีเซล ออกมาได้ 12 mV/min หรือ 17.28 V/day โดยเมื่อเทียบอัตราส่วนกำลังการผลิตต่อขนาดปริมาตรของอุปกรณ์ที่เท่ากันพบว่าอุปกรณ์ประเภทไมโครรีแอกเตอร์ให้ค่าที่สูงกว่า ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองผลิตไบโอดีเซล [3]

ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาเรื่องวิธีเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรโดยการใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในไมโครแชนแนลรูปแบบโค้งประเภทต่างๆ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ขนาดไมโคร

2. ทฤษฎี และแบบจำลอง 3 มิติ

2.1 ทฤษฎี

ในส่วนของทฤษฎีนี้จะกล่าวถึงวิธีการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้หลักการของกฎอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ (Conservation laws of physics) ซึ่งสามารถสรุปออกมาเป็นสมการควบคุมพื้นฐานตามกฎการอนุรักษ์ทั้ง 3 ข้อ คือ 1. การอนุรักษ์มวล 2. การอนุรักษ์โมเมนตัม 3. การอนุรักษ์พลังงาน โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเป็นการไหลแบบราบเรียบใน 3 มิติโดยของไหลมีความหนาแน่นคงที่ตลอดการไหลและไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady state)

สมการตามกฎการอนุรักษ์มวล

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

เมื่อ u คือความเร็วของของไหลในแนวแกน

สมการตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g \quad (2)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่น, μ คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด และ p คือค่าความดันสถิต

สมการตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน

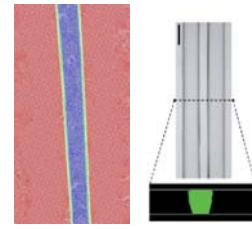
$$\rho c_p \nabla \cdot (Tu) = k \nabla^2 T - p \nabla u + q^* \quad (3)$$

เมื่อ q^* คืออัตราการกำเนิดพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (W/m^3), k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m \cdot K$) และ T คืออุณหภูมิของของไหล (K)

2.2 การตรวจสอบความถูกต้อง และ แบบจำลอง 3 มิติ

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมในงานวิจัยขั้นนี้ได้ทำการตรวจสอบรูปแบบลักษณะการไหลกับผลการทดลองของ Huh et al. [4] โดยเป็นการทดลองภายในอุปกรณ์ที่มีช่องทางการไหลขนาดเล็กของของไหล 2 ชนิดคือ อากาศ กับ น้ำ ที่มีค่าอัตราการไหลที่แตกต่างกันโดยแบ่งผลการสอบเทียบออกเป็น 2 ลักษณะคือ

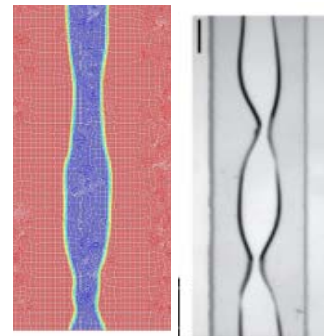
1. Stable stratified flow ทำการสอบเทียบที่ความเร็วของอากาศที่ 20 m/s , ความเร็วของน้ำที่ 0.4 m/s รูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปแบบ Flow Pattern จากการคำนวณ (รูปซ้าย) เทียบกับการทดลอง (รูปขวา)

โดยลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจะเป็นรูปแบบ Stable stratified flow ที่มีความกว้างช่องทางการไหลของน้ำเท่ากับ $75 \mu m$ ตลอดความยาวของไมโครแชนแนลจนถึงทางออกซึ่งคล้ายกับความกว้างช่องทางการไหลของผลการทดลอง

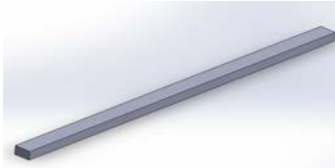
2. Wavy stratified flow ทำการสอบเทียบที่ความเร็วของอากาศที่ 7 m/s, ความเร็วของน้ำที่ 0.4 m/s



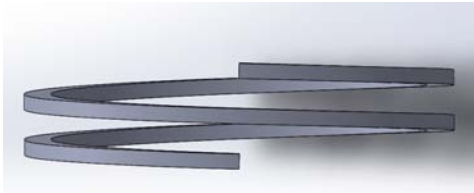
รูปที่ 4 รูปแบบ Flow Pattern จากการคำนวณ (รูปซ้าย) เทียบกับการทดลอง (รูปขวา)

โดยลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจะเป็นรูปแบบ Wavy stratified flow ที่มีความยาวของ Wave แต่ละลูกอยู่ที่ $200-600 \mu m$ ซึ่งความยาว Wave ที่ได้จากการคำนวณมีความใกล้เคียงกับความยาว Wave ของผลการทดลอง

แบบจำลองที่ใช้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์บนสนามการไหลในงานวิจัยขั้นนี้แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะได้แก่ 1. แบบตรง 2. แบบโค้งที่มีรัศมีคงที่ 3. แบบโค้งที่มีรัศมีไม่คงที่ โดยทั้งหมดมีขนาด กว้าง : สูง : ยาว เท่ากับ $200 \mu m : 100 \mu m : 2.2 \text{ cm}$ ตามรูปที่ 5-8



รูปที่ 5 ไมโครแชนแนลแบบตรง (Straight)



รูปที่ 6 ไมโครแชนแนลแบบโค้งที่มีรัศมีคงที่ (Helix)



รูปที่ 7 ไมโครแชนแนลแบบโค้งที่มีรัศมีไม่คงที่ (Spiral)



รูปที่ 8 พื้นที่หน้าตัดไมโครแชนแนลขนาด กว้าง 0.2 mm สูง 0.1 mm

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

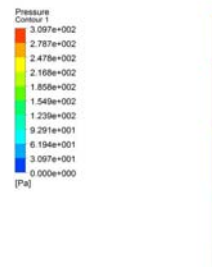
งานวิจัยชิ้นนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT VERSION 15.0 ในการคำนวณรูปแบบการไหลระหว่างของไหล 2 ชนิด คือ Toluene กับ น้ำ การไหลเป็นแบบราบเรียบที่สภาวะคงตัวโดยใช้ขั้นตอนเชิงตัวเลข Hybrid scheme และ ใช้วิธี SIMPLE [5] เป็นการแก้สมการเพื่อหาผลเฉลย โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆดังนี้ ค่าอัตราการไหล 0.01 - 0.1 mm³/s ค่าแรงตึงผิวที่ 0.037 N/m อุณหภูมิ 273.15 K ค่ามุมสัมผัสระหว่างของไหลอยู่ที่ 37 องศา โดยมีทางออกเปิดสู่บรรยากาศ จำนวนกริดที่ใช้คำนวณ 350,000 กริด และทำการกำหนดค่าขอบเขตที่บริเวณทางเข้าของ ไมโครแชนแนล

โดยให้การไหลของของไหลที่เป็น Toluene เป็นการไหลที่วงนอก และ น้ำ เป็นการไหลที่วงใน โดยที่อ้างอิงจากงานวิจัยของ Kositanont et al. [6] ซึ่งได้ทำการคำนวณแล้วพบว่าที่อัตราการไหลที่เท่ากันการกำหนดเงื่อนไขที่กล่าวข้างต้นจะให้การไหลที่เสถียรกว่าเมื่อมีความโค้งของท่อ

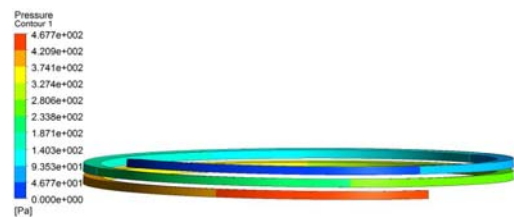
4. ผลการคำนวณ

4.1 ผลการคำนวณค่าความดันตกคร่อมของไมโครแชนแนลโดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

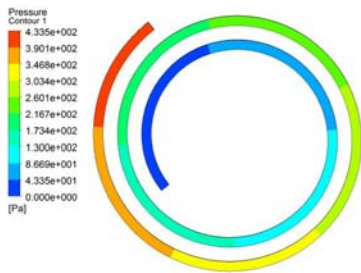
หลังจากสร้างแบบจำลองของไมโครแชนแนลทั้ง 3 ลักษณะจึงได้ใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อหาค่าความดันตกคร่อมที่อัตราการไหลต่างๆกัน ซึ่งสามารถแสดงผลได้ตามรูปที่ 9-11



รูปที่ 9 ค่าความดันตกคร่อมที่ตำแหน่งต่างๆ ในไมโครแชนแนลรูปแบบ Straight ที่อัตราการไหล 0.1 mm³/s

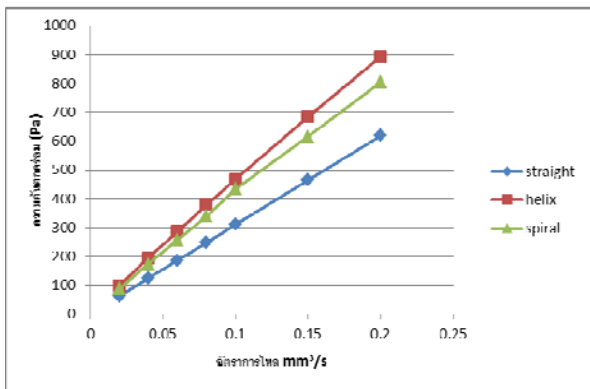


รูปที่ 10 ค่าความดันตกคร่อมที่ตำแหน่งต่างๆ ในไมโครแชนแนลรูปแบบ Helix ที่อัตราการไหล 0.1 mm³/s



รูปที่ 11 ค่าความดันตกคร่อมที่ตำแหน่งต่างๆ ในไมโคร
แชนแนลรูปแบบ Spiral ที่อัตราการไหล 0.1
mm³/s

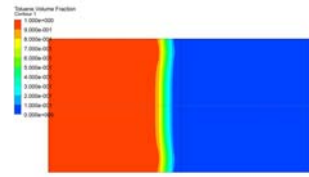
จากรูปที่ 9-11 แสดงให้เห็นว่าค่าความดันตก
คร่อมที่เกิดขึ้นในสถานะที่อัตราการไหลที่เท่ากันนั้น
รูปแบบโค้งทั้งสองรูปแบบนั้นให้ค่าความดันตกคร่อมที่มี
ค่าใกล้เคียงกันโดยรูปแบบ Helix ให้ค่าสูงที่สุดและ
รูปแบบ Straight ให้ค่าน้อยที่สุดโดยมีความสัมพันธ์กับ
อัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามรูปที่ 12



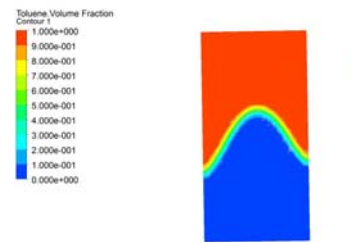
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความดัน
ตกคร่อม

4.2 ผลการคำนวณค่าพื้นที่ผิวสัมผัสของของไหล 2 ชนิดต่อปริมาตรรวมของของไหล

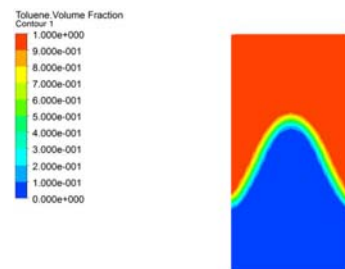
จากผลการคำนวณที่ได้ สามารถแสดงแผนภาพ
พื้นที่หน้าตัดที่แสดงถึงเส้นแบ่งสถานะระหว่างของไหลทั้ง
สองชนิดทั้ง 3 รูปแบบของไมโครแชนแนลได้ตามรูปที่
13-15 โดยเมื่อเทียบลักษณะเส้นแบ่งเฟสจะพบว่า
รูปแบบตรงจะมีลักษณะที่เป็นเส้นตรง ส่วนรูปแบบ Helix
และ Spiral จะมีลักษณะโค้งโดย Helix ที่จุดสูงสุดจะมีการ
โค้งเยื้องไปทางการวางตัวตามแนวของไมโคร
แชนแนลซึ่งมีความสัมพันธ์กับระยะพิทช์ส่วน Spiral จะมี
การโค้งที่อยู่ในแนวกึ่งกลางของช่องทางการไหล



รูปที่ 13 สภาวะการแยกชั้นระหว่าง Toluene กับ น้ำ ที่
อัตราการไหล 0.1 mm³/s ของไมโครแชนแนล
รูปแบบ Straight

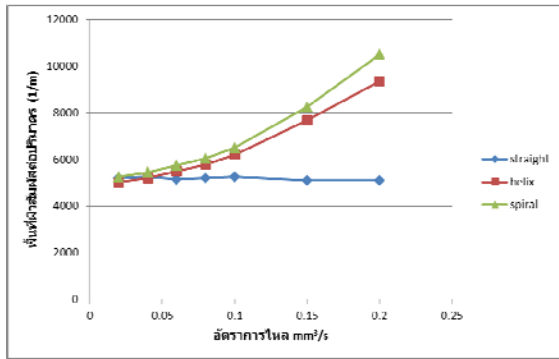


รูปที่ 14 สภาวะการแยกชั้นระหว่าง Toluene กับ น้ำ ที่
อัตราการไหล 0.1 mm³/s ของไมโครแชนแนลรูปแบบ
Helix



รูปที่ 15 สภาวะการแยกชั้นระหว่าง Toluene กับ น้ำ ที่
อัตราการไหล 0.1 mm³/s ของไมโครแชนแนลรูปแบบ
Spiral

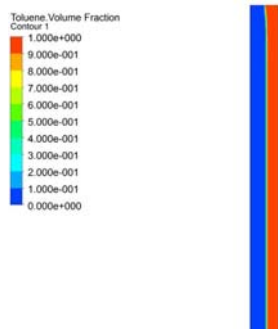
โดยที่อัตราการไหลที่แตกต่างกันสามารถ
คำนวณออกมาเป็นความสัมพันธ์ได้ตามรูปที่ 16 ที่แสดง
ถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล กับพื้นที่ผิวสัมผัส
ต่อปริมาตร ในช่วงอัตราการไหล 0.1-2 mm³/s จะเห็น
ได้ว่าไมโครแชนแนลที่เป็นรูปแบบโค้งนั้นให้ค่าพื้นที่
ผิวสัมผัสต่อปริมาตรที่สูงขึ้นเมื่อมีอัตราการไหลที่สูงขึ้นแต่
ไมโครแชนแนลรูปแบบตรงนั้นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงค่าคงที่
ซึ่งไม่ขึ้นกับอัตราการไหล



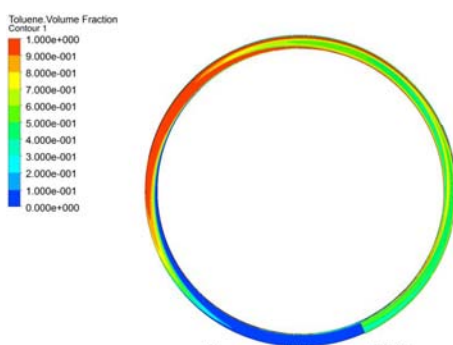
รูปที่ 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร

4.3 ผลการคำนวณการคงสถานะแยกชั้นภายในไมโครแชนแนล

การคงสถานะแยกชั้นของของไหลเมื่อเทียบกับทั้ง 3 รูปแบบพบว่ารูปแบบตรงจะให้การคงสถานะการไหลที่เสถียรในอัตราการไหลที่สูงกว่า 0.3 mm³/s จนถึงทางออกของไมโครแชนแนลได้ ตามรูปที่ 17 ได้ ในขณะที่รูปแบบโค้งทั้ง 2 รูปแบบนี้จะเกิดการผสมกันตามรูปที่ 18 ซึ่งไม่สามารถคงสถานะการแยกกระหว่างของไหลทั้ง 2 ชนิดได้จนถึงทางออกของไมโครแชนแนลได้



รูปที่ 17 การไหลภายในไมโครแชนแนลรูปแบบ Straight ที่ 0.3 mm³/s



รูปที่ 18 การไหลภายในไมโครแชนแนลรูปแบบ Helix ที่ 0.3 mm³/s

5. สรุปผลการทดลอง

การออกแบบไมโครแชนแนลให้มีรูปแบบโค้งโดยใช้หลักการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางสามารถเพิ่มค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลต่อปริมาตรได้ถึง 10-20 % โดยขึ้นกับอัตราการไหล แต่ที่อัตราการไหลที่สูงกว่า 0.3 mm³/s จะเกิดการแยกชั้นที่ไม่เสถียรและเกิดการผสมกันระหว่างของไหลสองชนิดภายในไมโครแชนแนลที่มีลักษณะโค้ง แต่ในไมโครแชนแนลรูปแบบตรงที่อัตราการไหลที่สูงกว่า 0.3 mm³/s นั้นจะยังคงสถานะการแยกชั้นไว้ได้โดยไม่เกิดการผสมกันระหว่างของไหลทั้งสองชนิด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ท่านเพิ่มศักดิ์ภาพส่วนงานในด้านการวิจัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภชที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยชิ้นนี้

รายการอ้างอิง

- [1] Pohar, A., Plazl, I., Process intensification through microreactor application. *Chemical & Biochemical Engineering Quarterly* 23 (2009): 537-544.
- [2] Yamamoto, M., Taguchi, S., Sato, S. and Surugaya, N. Evaluation of plutonium(IV) extraction rate between nitric acid and tri-n-butylphosphate solution using a glass chip micro channel. *Separation of Science* 38 (2014): 1807-1812.
- [3] Šalić, A. and Zelić, B. MICROREACTORS - PORTABLE FACTORIES FOR BIODIESEL FUEL PRODUCTION. *GOMABN* 50, 2 (2014): 85-110.
- [4] Huh, D., Kuo, C-H., Grotberg, J.B. and Takayama, S. Gas-liquid two-phase flow patterns in rectangular polymeric micro channels: effect of surface wetting properties. *New Journal of Physics* 11 (2009).



- [5] Patankar, S.V., and Spalding, D.B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimension parabolic flows. International Journal of Numerical Method in Engineering 4 (1972): 1987.
- [6] Kositanont, C., Putivisutisak, S., Tagawa, T., Yamada, H. and Assabumrungrat, S. Multiphase parallel flow stabilization in curved micro channel. Chemical Engineering Journal 253 (2014): 332-340.