

การจำลองแบบเชิงตัวเลขของการผสมของของไหลในไมโครมิกเซอร์



นายศุภสิทธิ์ ประเสริฐลาภ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NUMERICAL SIMULATION OF FLUID MIXING IN MICRO-MIXERS

Mr. Supasit Prasertlarp



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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองแบบเชิงตัวเลขของการผสมของของไหลในไมโครมิกเซอร์
โดย	นายศุภสิทธิ์ ประเสริฐธาดา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา)

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

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

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ชญาณุตม์ โฆษิตานนท์)

ศุภสิทธิ์ ประเสริฐธรรมาภ : การจำลองแบบเชิงตัวเลขของการผสมของของไหลในไมโครมิกเซอร์ (NUMERICAL SIMULATION OF FLUID MIXING IN MICRO-MIXERS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์, 79 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการจำลองแบบเชิงตัวเลขในสามมิติสำหรับศึกษาการไหลและพฤติกรรมผสมกันระหว่างน้ำและเอทานอลที่ไหลผ่านไมโครมิกเซอร์รูปแบบตัว T (T-shaped micro-mixer) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการผสม (mixing efficiency) และความดันตกที่เกิดขึ้น เมื่อความเร็วบริเวณทางเข้าและรูปร่างของไมโครมิกเซอร์มีการเปลี่ยนแปลง โดยในส่วนใหญ่จะศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ 0.1 ถึง 300 และ aspect ratio ในช่วง 0.2 ถึง 1 นอกจากนี้จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไมโครมิกเซอร์ที่มีรูปร่างแตกต่างกัน 4 รูปแบบ และเปรียบเทียบผลจากการเพิ่มขนาดของไมโครมิกเซอร์ ในการศึกษาจะสมมติการไหลแบบไม่อัดตัวในสภาวะคงตัว, เป็นการไหลแบบราบเรียบและไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี จากการศึกษาพบว่าสามารถแบ่งช่วงการไหลได้เป็น 3 ช่วง คือ stratified flow เกิดขึ้นที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่ำกว่า 10 ลักษณะการไหลเกิดการแยกชั้นระหว่างของไหลทั้งสองชนิด ซึ่งยังไม่เกิดการผสมกัน ช่วงที่สองคือ vortex flow เกิดที่เลขเรย์โนลด์ส์ระหว่าง 10 ถึง 150 มีลักษณะการไหลคือ ของไหลเกิดการหมุนวนในตัวเองทำให้การผสมดีขึ้น และในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์มากกว่า 150 การไหลเป็นแบบ engulfment flow คือของไหลทั้งสองมีการหมุนวนเข้าด้วยกัน ยิ่งเลขเรย์โนลด์ส์มากขึ้นการหมุนวนก็ยิ่งรุนแรงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผสมมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าหากเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นค่าความดันตกก็จะมากขึ้นเช่นกัน สำหรับ aspect ratio ที่มีความเหมาะสมสำหรับการศึกษานี้มีค่าเท่ากับ 0.7 และไมโครมิกเซอร์แบบ triple T-shaped micro-mixer สามารถทำประสิทธิภาพการผสมได้มากที่สุดถึง 94% อีกทั้งยังพบว่า การขยายขนาดไมโครมิกเซอร์ทำให้ประสิทธิภาพการผสมลดลง

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5570408821 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MICRO-MIXERS / ETHANOL-WATER MIXTURE / CFD SIMULATION

SUPASIT PRASERTLARP: NUMERICAL SIMULATION OF FLUID MIXING IN MICRO-MIXERS. ADVISOR: ASST. PROF. SOMPONG PUTIVISUTISAK, Ph.D., 79 pp.

A 3-D numerical simulation is performed to study the flow dynamics and mixing characteristics between ethanol and water within T-shaped micro-mixers. The present work focuses on the effects of the inlet velocity and the geometry of the micro-mixer. Reynolds number is varied from 0.1 to 300 and the aspect ratio is varied in the range between 0.2 and 1. In addition, this work compares the efficiencies of the micro-mixers with four different shapes and the effect of scaling up. The flow of interest is incompressible, laminar and without chemical reaction. It is seen that the stratified flow character is presented at Reynolds number less than 10. For Reynolds number between 10 and 150 the flow is in the vortex regime, leading to the mixing efficiency is increased. At Reynolds number more than 150 the flow is in the engulfment regime, vortices are generated and increase the contact area of the components, rapid mixing is achieved. Furthermore, when increasing Reynolds number, the pressure drop significantly increases. For this study, the suitable aspect ratio is 0.7 and the maximum mixing efficiency is 94% from triple T-shaped micro-mixer. It is also that found the up-scale micro-mixer causes the mixing efficiency to decrease.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและคำแนะนำอย่างดียิ่งของ ผศ.ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ความรู้ อีกทั้งยังช่วยอบรมสั่งสอน ให้กำลังใจและช่วยผลักดันให้ผู้วิจัยสามารถทำงานวิจัยได้สำเร็จตามเป้าหมายด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา ประธานกรรมการ รศ.ดร.บุญชัย เลิศนุวัฒน์ และ ดร.ชฎานุตม์ โฆษิตานนท์ กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยนี้ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเพื่อนๆและน้องๆประจำห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์การคำนวณและห้องปฏิบัติการวิจัยนาโนเทคโนโลยี ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาและความสนุกสนานในช่วงตลอดเวลาที่ทำงานวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือในทุกๆด้านมาโดยตลอด จนผู้วิจัยสามารถทำวิจัยสำเร็จได้อย่างตั้งใจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	5
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.5 วิธีการดำเนินงาน	6
1.6 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 การศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 รูปร่างของไมโครมิกเซอร์	8
2.2 ลักษณะการไหลภายในไมโครมิกเซอร์.....	12
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	14
3.1 สมการควบคุมพื้นฐาน (Basic governing equations)	14
3.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method)	15
3.3 SIMPLE algorithm	20
3.4 Volume of fluid method (VOF).....	25

3.5	ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	26
บทที่ 4	การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	28
4.1	การเปรียบเทียบกับผลการคำนวณเชิงตัวเลข	28
4.2	การเปรียบเทียบกับผลการทดลอง	32
4.3	สรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม	38
บทที่ 5	ผลลัพธ์จากการคำนวณและการวิเคราะห์	39
5.1	Grid independence	39
5.2	ผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลบริเวณทางเข้าของไมโครมิกเซอร์	40
5.3	ผลจากการเปลี่ยนแปลง mixing channel aspect ratio ของไมโครมิกเซอร์	49
5.4	ผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไมโครมิกเซอร์	55
5.5	การเปรียบเทียบผลของการ Scale up	70
บทที่ 6	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	73
6.1	บทสรุป	73
6.2	ข้อเสนอแนะในวิทยานิพนธ์และสำหรับงานวิจัยในอนาคต	74
	รายการอ้างอิง	75
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	79

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1. 1 คุณสมบัติของเอทานอลและน้ำที่ใช้ในการคำนวณ (ที่อุณหภูมิ 25°C).....	4
ตารางที่ 5. 1 ขนาดของไมโครมิกเซอร์ที่ aspect ratio ค่าต่างๆ.....	49
ตารางที่ 5. 2 ขนาดของไมโครมิกเซอร์ที่ aspect ratio ค่าต่างๆ (พื้นที่หน้าตัด mixing channel = 0.18 mm ²).....	53



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1. 1 การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการเกี่ยวกับวิทยาการไมโครฟลูอิดิกส์ ตั้งแต่ปี 2000-2012....	1
รูปที่ 1. 2 Micro-reactors	2
รูปที่ 1. 3 กระบวนการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....	3
รูปที่ 2. 1 ไมโครมิกเซอร์แบบ passive mixing และ active mixing รูปแบบต่างๆ (Hessel et al. [5]).....	9
รูปที่ 2. 2 ไมโครมิกเซอร์ T-shaped และ Y-shaped	9
รูปที่ 3. 1 การแบ่งโดเมนของของไหลออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยๆ	15
รูปที่ 3. 2 การวางตัวของปริมาตรควบคุมในสามมิติ.....	18
รูปที่ 3. 3 ขั้นตอนของ SIMPLE algorithm.....	24
รูปที่ 4. 1 T-shaped micro-mixer ที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำ.....	28
รูปที่ 4. 2 กริดที่ใช้ในการคำนวณสำหรับปัญหาการไหล.....	29
รูปที่ 4. 3 Path lines บริเวณทางเข้า mixing channel ที่ $Re = 12$	30
รูปที่ 4. 4 Path lines บริเวณทางเข้า mixing channel ที่ $Re = 80$	30
รูปที่ 4. 5 Path lines บริเวณทางเข้า mixing channel ที่ $Re = 240$	30
รูปที่ 4. 6 การเปรียบเทียบ mixing efficiency ที่ Reynolds number ต่างๆ.....	31
รูปที่ 4. 7 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง (Mouheb et al. [8]).....	32
รูปที่ 4. 8 ตำแหน่งที่ใช้พิจารณาพฤติกรรมการไหล.....	33
รูปที่ 4. 9 พฤติกรรมการไหลที่ Reynolds number = 25.....	34
รูปที่ 4. 10 พฤติกรรมการไหลที่ Reynolds number = 100	35
รูปที่ 4. 11 พฤติกรรมการไหลที่ Reynolds number = 150	36
รูปที่ 4. 12 พฤติกรรมการไหลที่ Reynolds number = 200	37

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5. 1 Velocity profile บริเวณทางออกของ mixing channel ที่ $Re = 300$ 40

รูปที่ 5. 2 ไมโครมิกเซอร์รูปแบบตัว T (T-shaped micro-mixer) 41

รูปที่ 5. 3 Velocity profile ตลอดความยาวของ mixing channel..... 42

รูปที่ 5. 4 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์
ที่ Reynolds number 0.1 - 300 43

รูปที่ 5. 5 Mixing efficiency ที่ Reynolds number 0.1 – 300..... 44

รูปที่ 5. 6 ตำแหน่งที่ใช้พิจารณาการแบ่งช่วงการไหล..... 45

รูปที่ 5. 7 Path lines ของการไหลที่ Reynolds number ต่างๆ..... 46

รูปที่ 5. 8 การเกิด secondary flow (Wong et al. [17]) 47

รูปที่ 5. 9 การเปรียบเทียบความดันเฉลี่ยตลอดความยาวของ mixing channel
ที่ Reynolds number ต่างๆ 48

รูปที่ 5. 10 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์
ที่ aspect ratio ต่างๆ ที่ $Re = 250$ 50

รูปที่ 5. 11 Mixing efficiency ที่ aspect ratio ต่างๆ ที่ $Re = 250$ 51

รูปที่ 5. 12 Path lines ของการไหลที่ aspect ratio ต่างๆ ที่ $Re = 250$ 52

รูปที่ 5. 13 Mixing efficiency ที่ aspect ratio 0.5 – 0.9 ที่ $Re = 250$
(พื้นที่หน้าตัด mixing channel = 0.18 mm^2) 54

รูปที่ 5. 14 การเปรียบเทียบความดันเฉลี่ยตลอดความยาวของ mixing channel ที่ $Re = 250$
และที่ AR = 0.7 และ 0.8 54

รูปที่ 5. 15 ไมโครมิกเซอร์ model A..... 56

รูปที่ 5. 16 ไมโครมิกเซอร์ model B..... 56

รูปที่ 5. 17 ไมโครมิกเซอร์ model C..... 57

รูปที่ 5. 18 ไมโครมิกเซอร์ model D 57

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5. 19 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์ model
 A ที่ Reynolds number 250 - 2000..... 58

รูปที่ 5. 20 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์ model
 B ที่ Reynolds number 250 - 2000..... 59

รูปที่ 5. 21 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์ model
 C ที่ Reynolds number 250 - 2000..... 60

รูปที่ 5. 22 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์ model
 D ที่ Reynolds number 250 - 2000..... 61

รูปที่ 5. 23 Mixing efficiency ของไมโครมิกเซอร์ทั้ง 4 รูปแบบ ที่ Reynolds number ต่างๆ..... 62

รูปที่ 5. 24 ความดันเฉลี่ยตลอดความยาวของไมโครมิกเซอร์ทั้ง 4 รูปแบบ ที่ Re = 500 63

รูปที่ 5. 25 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์ model
 A ที่อัตราการไหล 108.3 - 886.4 mm³/s..... 64

รูปที่ 5. 26 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์ model
 B ที่อัตราการไหล 108.3 - 886.4 mm³/s..... 65

รูปที่ 5. 27 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์ model
 C ที่อัตราการไหล 108.3 - 886.4 mm³/s..... 66

รูปที่ 5. 28 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์ model
 D ที่อัตราการไหล 108.3 - 886.4 mm³/s 67

รูปที่ 5. 29 Mixing efficiency ของไมโครมิกเซอร์ทั้ง 4 รูปแบบ ที่อัตราการไหลต่างๆ 68

รูปที่ 5. 30 ความดันเฉลี่ยตลอดความยาวของไมโครมิกเซอร์ทั้ง 4 รูปแบบ
 ที่อัตราการไหล = 216.5 mm³/s..... 69

รูปที่ 5. 31 Mixing efficiency ของไมโครมิกเซอร์ model D ที่อัตราการไหลต่างๆ 70

รูปที่ 5. 32 การเปรียบเทียบ mixing efficiency กรณีที่ scale up model..... 71

รูปที่ 5. 33 การเปรียบเทียบความดันเฉลี่ยกรณีที่ scale up model ที่ Re = 500..... 71

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัดของปริมาตรควบคุม
AR	aspect ratio
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่
d_H	hydraulic diameter
f	แรงกระทำภายนอก
g	แรงโน้มถ่วง
H	ความสูงของ mixing channel
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
p	ความดัน
q	ฟลักซ์ความร้อน
Re	เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์
S	Source term
T	อุณหภูมิ
u	ความเร็วตามแนวแกน x
V	ปริมาตรควบคุม
v	ความเร็วตามแนวแกน y
W	ความกว้างของ mixing channel
w	ความเร็วตามแนวแกน z
x	ระยะในแนวแกน x
y	ระยะในแนวแกน y
z	ระยะในแนวแกน z

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

α	mixing efficiency
γ	volume fraction
τ	ความเค้นเฉือน
μ	ความหนืดสัมบูรณ์
ν	ความหนืดจลศาสตร์
ρ	ความหนาแน่น

ตัวห้อย (Subscripts)

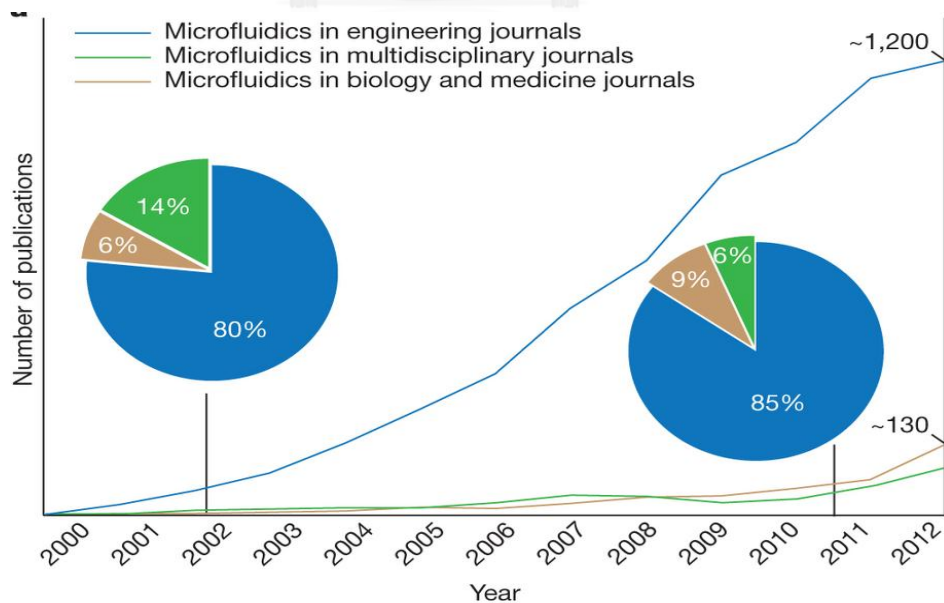
P	จุดที่สนใจบนปริมาตรควบคุม
E	จุดที่อยู่ข้างเคียงจุด P ทางทิศ east
W	จุดที่อยู่ข้างเคียงจุด P ทางทิศ west
N	จุดที่อยู่ข้างเคียงจุด P ทางทิศ north
S	จุดที่อยู่ข้างเคียงจุด P ทางทิศ south
F	จุดที่อยู่ข้างเคียงจุด P ทางทิศ front
B	จุดที่อยู่ข้างเคียงจุด P ทางทิศ back
e	Control volume face ระหว่างจุด P และ E
w	Control volume face ระหว่างจุด P และ W
n	Control volume face ระหว่างจุด P และ N
s	Control volume face ระหว่างจุด P และ S
f	Control volume face ระหว่างจุด P และ F
b	Control volume face ระหว่างจุด P และ B
nb	จุดต่อที่อยู่ข้างเคียง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

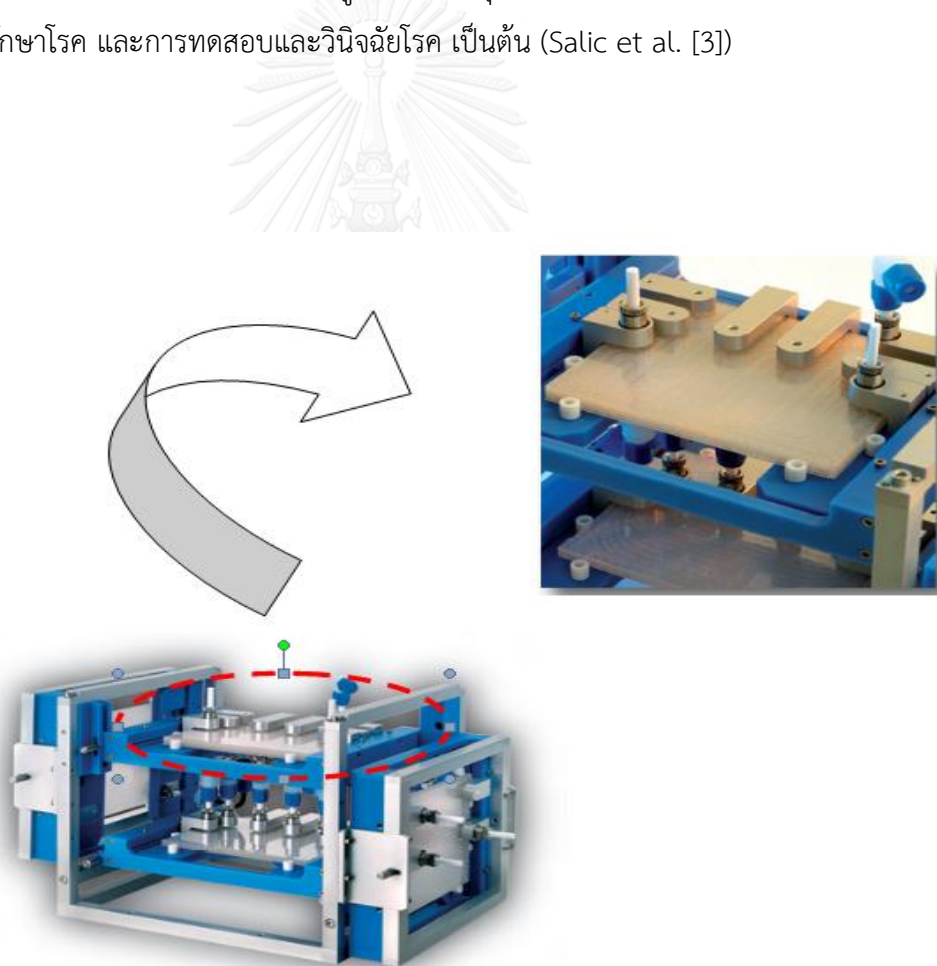
วิทยาการไมโครฟลูอิดิกส์ (microfluidics) เริ่มได้รับความสนใจขึ้นมาเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2530 และปัจจุบันกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากรูปที่ 1.1 ที่แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของการเผยแพร่ผลงานวิจัยเกี่ยวกับวิทยาการไมโครฟลูอิดิกส์ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา (Sackmann et al. [1]) ในความน่าสนใจของไมโครฟลูอิดิกส์อยู่ที่ประโยชน์ต่อหลากหลายวงการ เช่น เคมี ชีววิทยา แพทย์ศาสตร์ เภสัชศาสตร์ สารสนเทศศาสตร์ เกษตรศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ โดยส่วนใหญ่ระบบไมโครฟลูอิดิกส์ที่สร้างขึ้นนั้นมักได้ประโยชน์ และข้อดีหลายประการจากสมบัติทางฟิสิกส์ของระบบระดับไมครอน เช่น สอดคล้องกับพัฒนาการของโลกที่มุ่งสู่อุปกรณ์ต่างๆ ที่มีขนาดเล็กลง (miniaturization), สามารถพัฒนาให้เป็นอุปกรณ์แบบพกพาที่มีราคาไม่แพงทั้งแบบใช้แล้วทิ้งและนำสามารถกลับมาใช้ใหม่ได้, หากเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ทางเคมี จะใช้ปริมาณสารที่เกี่ยวข้องในระดับต่ำมาก จึงลดความเสี่ยงในกรณีที่ต้องใช้สารเคมีราคาแพง, กระบวนการการเกิดปฏิกิริยาของสารในระบบใช้เวลาน้อยกว่า เนื่องจากสารในระบบมีปริมาณน้อย, หากเกิดปฏิกิริยาที่เกิดสารพิษในระบบก็สามารถจัดการและควบคุมได้ง่าย เนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดเล็ก และเนื่องจากขนาดที่เล็กมาก จึงทำให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน



รูปที่ 1. 1 การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการเกี่ยวกับวิทยาการไมโครฟลูอิดิกส์ ตั้งแต่ปี 2000-2012

(Sackmann et al. [1])

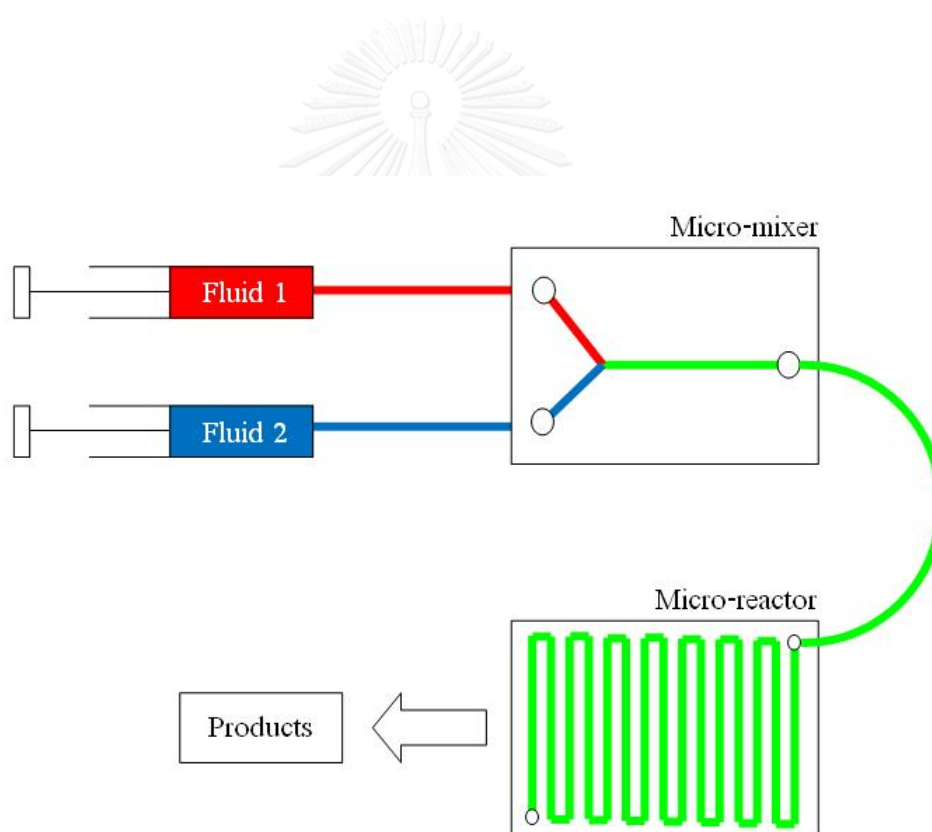
ด้วยประโยชน์และข้อดีที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ระบบไมโครฟลูอิดิกส์จึงได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (micro-reactors) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยมีกระบวนการทำงานโดยเริ่มจากของไหลสองชนิดไหลผ่านไมโครมิกเซอร์ จากนั้นจึงเกิดการผสมกันของสารทั้งสองชนิด และหลังจากผสมกันแล้วของผสมก็จะไหลผ่านมายังเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กและเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ภายในนั้น หลังจากนั้นก็จะได้เป็นสารผลิตภัณฑ์ (products) ออกมา ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งได้มีผู้นำเอาเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กมาใช้งานจริงคือ Salic and Zelic [2] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก พบว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กหลายๆ อันมาต่อเพื่อใช้งานร่วมกัน (numbering up) สามารถให้กำลังการผลิตมากพอเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเดิม อีกทั้งในอนาคตหากต้องการเพิ่มกำลังการผลิตให้มากขึ้นก็สามารถปรับปรุงได้โดยง่าย นอกจากนี้ micro-reactor ยังถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางการแพทย์เช่น การวิจัยและทดสอบยารักษาโรค และการทดสอบและวินิจฉัยโรค เป็นต้น (Salic et al. [3])



รูปที่ 1. 2 Micro-reactors

(ที่มา : <http://www.corning.com>)

อุปกรณ์ที่สำคัญชิ้นหนึ่งในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก นั้นคือไมโครมิกเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่ในการผสมสารทั้งสองชนิดให้เข้ากันให้ได้มากที่สุด เพื่อการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กจะได้มีความสมบูรณ์ และได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในไมโครมิกเซอร์ผ่านตัวแปรที่สามารถวัดค่าได้ เช่น ความดัน อัตราการไหล เส้นกระแสการไหล (stream line) สนามของเวกเตอร์ความเร็ว (velocity field) จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการประเมินและวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการผสมกันของของไหล (mixing efficiency) และค่าความดันที่ลดลง (pressure drop) หลังจากทีของไหลไหลผ่านไมโครมิกเซอร์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบไมโครมิกเซอร์ให้มีประสิทธิภาพต่อไป



รูปที่ 1. 3 กระบวนการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

ไมโครมิกเซอร์ที่มีการใช้งานในปัจจุบันมีมากมายหลายประเภท เช่น ไมโครมิกเซอร์รูปตัว T หรือ Y, multi-laminating, split and recombine, jet colliding และ recirculation flow-mixers เป็นต้น ไมโครมิกเซอร์เหล่านี้เป็นไมโครมิกเซอร์ที่ปล่อยให้การไหลไหลไปตามธรรมชาติของรูปร่างไมโครมิกเซอร์ (passive mixing) แต่ก็มีไมโครมิกเซอร์อีกประเภทหนึ่งซึ่งเป็นประเภทที่ใช้ปัจจัยจากภายนอกเข้ามาควบคุมการไหล (active mixing) เช่น การใช้สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก, acoustic fluid shaking, ultrasound, electrowetting-based droplet shaking และ microstirrers เป็นต้น (Nguyen and Wu [4])

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อ mixing efficiency และความดันลดที่เกิดขึ้น โดยของไหลที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เอทานอลและน้ำ ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1 ของผลสมระหว่างเอทานอลและน้ำสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เป็นต้น นอกจากนี้ในวงการแพทย์มีการนำเอาของผลสมระหว่างเอทานอลและน้ำไปใช้ในการปรับเทียบ (calibration) อุปกรณ์อัลตราซาวด์ (ultrasound imaging) เนื่องจากของผลสมระหว่างเอทานอลและน้ำมีความหนาแน่นที่เหมาะสมซึ่งเป็นตัวกำหนดความเร็วในการส่งผ่านเสียงของอุปกรณ์ จึงสามารถทำการปรับเทียบอุปกรณ์เพื่อให้ได้ผลที่มีประสิทธิภาพในการใช้งานจริงได้

รูปแบบของไมโครมิกเซอร์ที่ใช้ในการศึกษานี้จะใช้ไมโครมิกเซอร์รูปแบบตัว T เป็นรูปแบบหลักในการศึกษาเนื่องจากมีรูปร่างไม่ซับซ้อนจึงเหมาะสมกับการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อ mixing efficiency และความดันลด นอกจากนี้จะทำการเปรียบเทียบไมโครมิกเซอร์รูปแบบต่างๆว่าไมโครมิกเซอร์รูปแบบใดมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการศึกษา

ตารางที่ 1. 1 คุณสมบัติของเอทานอลและน้ำที่ใช้ในการคำนวณ (ที่อุณหภูมิ 25°C)

สาร	ความหนาแน่น, ρ kg/ m ³	ความจุความร้อนจำเพาะ, C_p kJ/kg.K	ความหนืด, μ kg/m.s
เอทานอล	790	2.84	0.0012
น้ำ	998.2	4.18	0.001003

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผสมกันของของเหลวสองชนิดและค่าความดันที่ลดลงที่ไหลผ่านไมโครมิกเซอร์ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข
- 2) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการผสมกันของของเหลวสองชนิดและความดันลด โดยการเปลี่ยนพารามิเตอร์จากแบบจำลองเชิงตัวเลข

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาการผสมกันระหว่างน้ำและเอทานอลผ่านไมโครมิกเซอร์ โดยไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี และพิจารณาการไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบในสามมิติ
- 2) ศึกษาอิทธิพลของความเร็วในช่วงที่ไหลเข้าของของเหลวทั้งสองชนิดที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการผสมและค่าความดันที่ลดลงในสามมิติ
- 3) ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของโดเมนการไหลที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการผสมและค่าความดันที่ลดลงในสามมิติ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการผสมกันของของเหลวสองชนิด เพื่อใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการผสมกันให้ดีขึ้น
- 2) ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อความดันที่ลดลงระหว่างทางเข้าและทางออกของโดเมน เพื่อใช้ข้อมูลที่ได้ในการออกแบบระบบในไมโครรีแอกเตอร์ให้สามารถทำงานได้อย่างเหมาะสม
- 3) ผลการศึกษาสามารถนำไปใช้ออกแบบไมโครมิกเซอร์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ให้ดีขึ้นได้

1.5 วิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาข้อมูลและหลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กและไม่โครมิกเซอร์
- 2) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการไหลในไมโครมิกเซอร์
- 3) ศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรม ANSYS GAMBIT และ ANSYS FLUENT และ TECPLOT
- 4) ทดลองใช้โปรแกรม ANSYS GAMBIT และ ANSYS FLUENT ในการคำนวณผล
- 5) ตรวจสอบความถูกต้องของการใช้งานโปรแกรมกับผลการวิจัยหรือผลการทดลองของผู้ที่เคยศึกษาในอดีต
- 6) วิเคราะห์ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผสม (mixing efficiency) และค่าความดันที่ลดลง (pressure drop)
- 7) สรุปผลการดำเนินงาน
- 8) จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์และเสนอผลงานวิจัย

1.6 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 6 บท ซึ่งประกอบไปด้วย

บทที่ 1 บทนำ

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ขอบเขต ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ วิธีการดำเนินงาน และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะทำการศึกษางานวิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันที่มีความเกี่ยวข้องและมีประโยชน์ในการศึกษาและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 3 ทฤษฎี

กล่าวถึงรายละเอียดของสมการควบคุมพื้นฐาน (Basic governing equation) ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method) และการดิสครีไทซ์ (Discretization) เพื่อให้ได้มาซึ่งสมการพีชคณิต รวมถึงการใช้ SIMPLE algorithm ในการแก้สมการ ทฤษฎี Volume fraction และระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 4 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

ในส่วนนี้จะแสดงผลการตรวจสอบความถูกต้องของการใช้งานโปรแกรมก่อนที่จะนำโปรแกรมไปใช้ในการศึกษานี้ เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าสามารถใช้งานโปรแกรมได้อย่างถูกต้อง โดยจะเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่เคยมีผู้ศึกษามาแล้วในอดีต ซึ่งประกอบไปด้วย

- 1) เปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลข
- 2) เปรียบเทียบผลการทดลอง
- 3) สรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

บทที่ 5 การทำนายการไหลในไมโครมิกเซอร์

ส่วนนี้จะแสดงผลการทำนายการไหลทั้งหมดที่จะทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

- 1) Grid independence
- 2) ผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลบริเวณทางเข้าของไมโครมิกเซอร์
- 3) ผลจากการเปลี่ยนแปลง mixing channel aspect ratio ของไมโครมิกเซอร์
- 4) ผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไมโครมิกเซอร์
- 5) เปรียบเทียบผลของการ scale up

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงบทสรุปทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ รวมถึงข้อเสนอแนะในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่สามารถทำต่อเนื่องและอาจจะดำเนินการต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

การศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไมโครฟลูอิดิกส์ (Microfluidics) เป็นวิทยาการใหม่ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของการศึกษาและประยุกต์ใช้งานระบบการจัดการของไหล (fluid) เช่น ของเหลว หรือก๊าซ ที่มีปริมาณน้อยมาก ที่ไหลผ่านร่องหรือท่อที่มีความกว้างภายในอุปกรณ์ ในขนาดไมครอน ซึ่งเป็นท่อที่เล็กมากใช้สำหรับเป็นโครงข่ายลำเลียงการไหลของอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์ (microfluidic device) หรือเรียกอีกชื่อว่า Lab-on-a-chip (LOC) ซึ่งถูกสร้างขึ้นด้วย micro-fabrication techniques ซึ่งในปัจจุบันถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมมากมาย เช่น เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (micro-reactor) ที่ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยา, อุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เป็นต้น

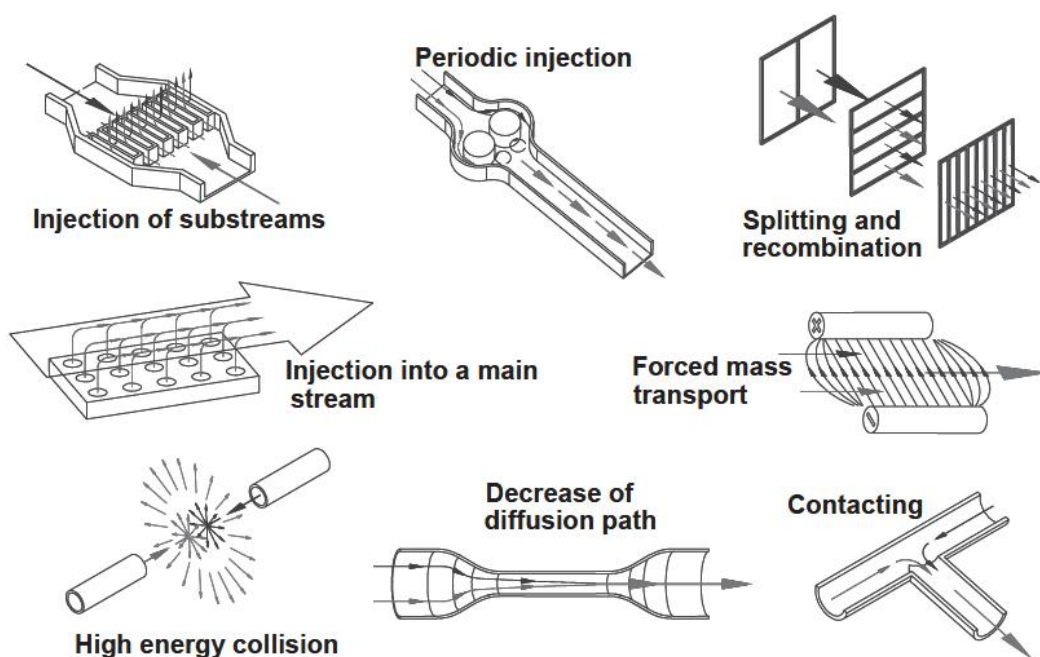
ไมโครมิกเซอร์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญชิ้นหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ทำหน้าที่ผสมสารทำงานเข้าด้วยกัน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ แต่ในปัจจุบันไมโครมิกเซอร์สามารถจำแนกประเภทออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ passive mixing และ active mixing (Hessel et al. [5]) ความแตกต่างระหว่างไมโครมิกเซอร์สองประเภทนี้คือ passive mixing คือการปล่อยให้ของไหลไหลไปตามธรรมชาติ การผสมจะมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับรูปร่างของไมโครมิกเซอร์ ส่วนไมโครมิกเซอร์แบบ active mixing จะอาศัยปัจจัยภายนอกเข้ามาควบคุมระหว่างการไหล เช่น การให้ของไหลไหลผ่านสนามไฟฟ้า หรือคลื่นเสียง ทำให้การไหลมีประสิทธิภาพมากขึ้น ตัวอย่างของไมโครมิกเซอร์แบบ passive mixing และ active mixing แสดงในรูปที่ 2.1

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาลงถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการผสมกันของของไหลสองชนิดผ่าน passive micro-mixer ซึ่งในอดีตมีผู้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับประเด็นนี้มากพอสมควร ในส่วนนี้จะศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาโดยแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกัน ประกอบด้วย

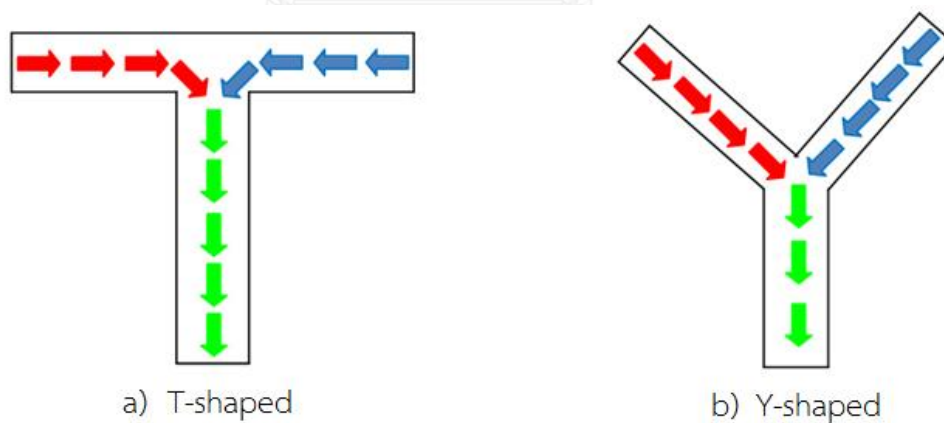
- 1) รูปร่างของไมโครมิกเซอร์
- 2) ลักษณะการไหลภายในไมโครมิกเซอร์

2.1 รูปร่างของไมโครมิกเซอร์

รูปร่างของไมโครมิกเซอร์ (micro-mixers) โดยทั่วไปจะมีลักษณะคือ มีช่องทางเข้าสองทางและทางออกหนึ่งทาง รูปแบบอย่างง่ายที่ใช้ในการศึกษาและใช้งานส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นรูปตัว T หรือ ตัว Y ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 2. 1 ไมโครมิกเซอร์แบบ passive mixing และ active mixing รูปแบบต่างๆ
(Hessel et al. [5])



รูปที่ 2. 2 ไมโครมิกเซอร์ T-shaped และ Y-shaped

Soleymani et al. [6] ศึกษาเกี่ยวกับผลของการปรับเปลี่ยนมุมระหว่างทางเข้าทั้งสองด้านว่ามีผลอย่างไรต่อประสิทธิภาพในการผสมกันของน้ำที่ไหลผ่านไมโครมิกเซอร์รูปตัว T พบว่ามีประสิทธิภาพในการผสมกันอยู่ที่ประมาณ 60 - 90% และมีค่าความดันตกอยู่ที่ประมาณ 400 - 460 Pa ส่วน Hsieh et al. [7] ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการผสมกันของของไหลผ่านไมโครมิกเซอร์รูปตัว Y พบว่ามีประสิทธิภาพในการผสมกันอยู่ที่ประมาณ 20 - 40% และมีค่าความดันตกประมาณ 275 - 370 Pa นั้นแสดงให้เห็นว่า หากต้องการใช้งานไมโครมิกเซอร์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการประสิทธิภาพในการผสมกันในเกณฑ์ที่ดีควรเลือกใช้ไมโครมิกเซอร์รูปตัว T แต่ถ้าหากมีข้อกำหนดเกี่ยวกับค่าความดันที่ตกลงหลังจากการผสมกันของของไหลก็ควรเลือกใช้ไมโครมิกเซอร์รูปตัว Y

Mouheb et al. [8] ทำการศึกษาและเปรียบเทียบการไหลของของไหลผ่าน T-shaped และ cross shaped micro-mixer โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและทดลอง พบว่าค่าความดันลดที่เกิดจาก T-shaped micro-mixer มีค่ามากกว่า ค่าความดันลดที่เกิดจาก cross shaped micro-mixer เนื่องจากลักษณะของของไหลที่ผ่าน cross shaped ขณะที่ไหลออกสามารถไหลออกได้สองทางซึ่งแตกต่างกับ T-shaped ที่สามารถไหลออกได้เพียงทางเดียว

Mansur et al. [9] ทำการศึกษาและเปรียบเทียบการไหลผ่าน T-shaped micro-mixer และ double T-shaped micro-mixer โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการศึกษา และศึกษาในช่วงการไหลแบบราบเรียบ แล้วเปรียบเทียบ mixing efficiency ของไมโครมิกเซอร์ทั้งสองแบบ พบว่า double T-shaped micro-mixer ให้ค่า mixing efficiency ดีกว่า T-shaped micro-mixer ในทุกๆช่วงของการทดสอบ โดย double T-shaped micro-mixer สามารถให้ mixing efficiency ได้มากที่สุดถึง 97%

Ansari et al. [10] ศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบของไมโครมิกเซอร์ที่มีประสิทธิภาพในการผสมของไหล โดยการเปรียบเทียบ mixing efficiency ของ T-shaped micro-mixer และ vortex T-shaped micro-mixer โดย vortex T-shaped micro-mixer มีลักษณะพื้นฐานคล้ายกับ T-shaped micro-mixer แต่แตกต่างกันที่การวางตัวของท่อทางเข้าทั้งสองข้างจะวางตัวเยื้องกันในแนวตั้ง ซึ่งการวางตัวในลักษณะนี้จะเป็นการส่งเสริมให้เกิดการไหลแบบหมุนวนเกิดขึ้นได้แม้ว่า Reynolds number มีค่าน้อย ซึ่งเป็นผลให้ mixing efficiency มีค่ามากขึ้น และจากการเปรียบเทียบพบว่า vortex T-shaped micro-mixer ให้ค่า mixing efficiency มากกว่าในทุกๆ ช่วงทดสอบ โดยค่า Reynolds number ที่ใช้ในการทดสอบมีค่า 10 ถึง 70 โดยสามารถให้ค่า mixing efficiency ได้มากถึง 50%

Jin et al. [11] ทำการศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของการไหลระหว่างน้ำและกลีเซอรอล (glycerol) ผ่าน swirl micro-mixer ซึ่งมีลักษณะของ mixing channel เป็นวงกลม ซึ่งแตกต่างกับ mixing channel รูปแบบอื่น ๆ ที่มีลักษณะเป็นท่อยาวออกไป และผลที่ได้จากการคำนวณพบว่า ของไหลที่ไหลผ่าน swirl micro-mixer จะเริ่มผสมเข้าด้วยกันต้องใช้ Reynolds number มากถึง 500 และการผสมจะเริ่มคงที่เมื่อ Reynolds number เท่ากับ 1300 และสามารถให้ mixing efficiency ได้ประมาณ 70%

Andreussi et al. [12] ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการศึกษาพฤติกรรมของการไหลของของไหลผ่านไมโครมิกเซอร์รูปตัว T โดยการเปลี่ยนแปลง aspect ratio ของช่องทางไหลเข้าไมโครมิกเซอร์ โดยค่า aspect ratio ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0.75, 1 และ 2 ซึ่งพบว่าพฤติกรรมของการไหลของ aspect ratio เท่ากับ 0.75 และ 1 ที่ Reynolds number ประมาณ 140 มีความคล้ายกันคือ มีลักษณะการไหลเป็นแบบ vortex flow แต่ที่ aspect ratio เท่ากับ 2 ค่า Reynolds number ต้องมีค่ามากถึง 420 จึงจะทำให้การไหลเป็นแบบ vortex flow ที่เป็นแบบนี้เนื่องจาก aspect ratio เท่ากับ 2 ช่องทางไหลจะมีลักษณะกว้างซึ่งมีพื้นที่มากกว่า ทำให้เกิดแรงเสียดทานที่ผนังมากกว่ากรณีอื่น

ประเด็นต่อมาที่มีความน่าสนใจเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการผสมกันของของไหลคือ สภาวะของของไหลบริเวณทางเข้าทั้งสองด้านมีผลต่อประสิทธิภาพในการผสมกันของของไหล โดยผู้ที่ทำการศึกษาวิจัยคือ Galletti et al. [13] พบว่าการไหลแบบ fully developed ในช่วงของการไหลเข้า มีผลอย่างมากต่อกระบวนการในการผสมกันของของไหล ซึ่งเป็นข้อควรพิจารณาที่สำคัญในการออกแบบไมโครมิกเซอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหากมีข้อจำกัดในการกำหนดความยาวของท่อในช่วงขาเข้า

Virk et al. [14] ศึกษาเกี่ยวกับใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์การผสมกันของน้ำในไมโครมิกเซอร์รูปตัว T โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพิจารณาที่ค่า Reynolds number ต่ำกว่า 25 พบว่าหากมีการเพิ่มค่า Reynolds number มากขึ้น ความยาวของท่อในช่วงที่เกิดการผสมก็ ต้องมีความยาวมากขึ้นตามไปด้วยเพื่อให้ประสิทธิภาพในการผสมมีความใกล้เคียงกัน

2.2 ลักษณะการไหลภายในไมโครมิกเซอร์

Hetsroni et al. [15] และ Lorenzini et al. [16] ทำการศึกษาถึงลักษณะการไหลของของไหลผ่าน close channel พบว่าการไหลแบบราบเรียบจะเกิดขึ้นที่ Reynolds number มีค่าต่ำกว่า 2300 และ transition zone เกิดขึ้นที่ Reynolds number ในช่วง 2300 – 2600 และ เกิดการไหลแบบปั่นป่วนถ้าหาก Reynolds number มีค่ามากกว่า 2600 เป็นต้นไป

อีกหนึ่งประเด็นที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการผสมกันของของไหลคือการกำหนดความเร็วบริเวณทางเข้าทั้งสองด้านซึ่งจะส่งผลต่อค่า Reynolds number ได้มีผู้ทำการศึกษาในประเด็นนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยในช่วงของค่า Reynolds number ต่างๆดังนี้

Wong et al. [17] ทำการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการผสมกันของของเหลวโดยนำเอาของเหลวที่ผสมสีฟ้าและสีแดงให้ไหลผ่านไมโครมิกเซอร์รูปตัว T โดยกำหนดค่า Reynolds number อยู่ในช่วง 400-500 จะทำให้ของเหลวทั้งสองผสมเข้ากันเป็นอย่างดี จากนั้นได้ทำการจำลองแบบเชิงตัวเลข เพื่อยืนยันข้อสังเกตนี้ โดยผลสรุปที่ได้คือ การผสมกันจะดีและรวดเร็วโดยกำหนดให้ช่องการไหลมี hydraulic diameter เท่ากับ $67 \mu\text{m}$ และค่าความดันบริเวณทางเข้าทั้งสองมีค่า 5.5 bar

Bothe et al. [18] ศึกษาพฤติกรรมการผสมกันของของไหลผ่าน T-shaped micro-mixer โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข พบว่าการผสมกันของของไหลสามารถแบ่งช่วงการผสมได้ 3 ช่วง คือ stratified flow เกิดขึ้นที่ค่า Reynolds number ต่ำ, vortex flow เกิดที่ค่า Reynolds number กลาง และ engulfment flow เกิดขึ้นที่ Reynolds number สูง ในการแบ่งช่วงจะพิจารณาจากลักษณะการไหลบริเวณทางเข้าที่ของไหลไหลมาปะทะกัน ซึ่งในช่วง engulfment flow เกิดการผสมกันดีที่สุด

Orsi et al. [19] ทำการศึกษาการผสมกันของน้ำและเอทานอลเปรียบเทียบกับกรณีของน้ำผสมกับน้ำในสถานะของเหลวโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าน้ำและเอทานอลสามารถผสมเข้ากันได้ง่ายกว่ากรณีของน้ำผสมกับน้ำ และจะผสมกันได้ดีที่ค่า Reynolds number มากกว่า 230

นอกจากนี้ยังมีผู้ศึกษาวิจัยในประเด็นอื่นๆเช่น Le et al. [20] ศึกษาการผสมกันของก๊าซสองชนิดคือไนโตรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ในไมโครมิกเซอร์รูปตัว T โดยใช้การจำลองแบบเชิงตัวเลขด้วยวิธี DSMC (direct simulation Monte Carlo) พบว่าเมื่อค่า Knudsen number มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการผสมกันมีค่าลดลงเนื่องจากโมเลกุลมีการแพร่กระจายออกไปมากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มความดันขาเข้าให้มากขึ้นจำเป็นต้องเพิ่มความยาวของท่อให้มากขึ้นเนื่องจาก convection effect มีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับ diffusion effect และผลสรุปอีกข้อหนึ่งคือการ

เพิ่มอุณหภูมิของการผสมหรืออุณหภูมิของผนังท่อสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมได้ และ Yue et al. [21] ศึกษาเกี่ยวกับความดันที่ตกลงของการผสมกันของไนโตรเจนและน้ำในไมโครมิกเซอร์รูปตัว T โดยพิจารณาทั้งการไหลแบบเฟสเดียวและสองเฟส และทำการทดลองโดยกำหนด hydraulic diameter เท่ากับ 528 และ 333 μm ตามลำดับ พบว่าของผสมแบบเฟสเดียวมีความดันสูงในบริเวณที่ของเหลวทั้งสองชนิดมาปะทะกันจากนั้นความดันก็จะลดต่ำลงเรื่อยๆตามความยาวของท่อ ซึ่งให้ผลไปในทางเดียวกันกับทฤษฎี สำหรับของผสมสองเฟสนั้นผลจากการทดลองยังขาดความแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณตามทฤษฎี



บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 สมการควบคุมพื้นฐาน (Basic governing equations)

รูปแบบทั่วไปของสมการควบคุมพื้นฐานสำหรับแบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ สำหรับสมมติฐานของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาการไหลเป็นแบบราบเรียบและไม่อัดตัวภายใต้สภาวะคงตัวในสามมิติ รวมถึงคุณสมบัติต่างๆของของไหลเป็นค่าคงที่ ซึ่งประกอบด้วย สมการความต่อเนื่อง สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งสามารถแสดงในพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinates) ได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (3.1)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

X – momentum equation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wu) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (3.2)$$

Y – momentum equation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wv) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \quad (3.3)$$

Z – momentum equation

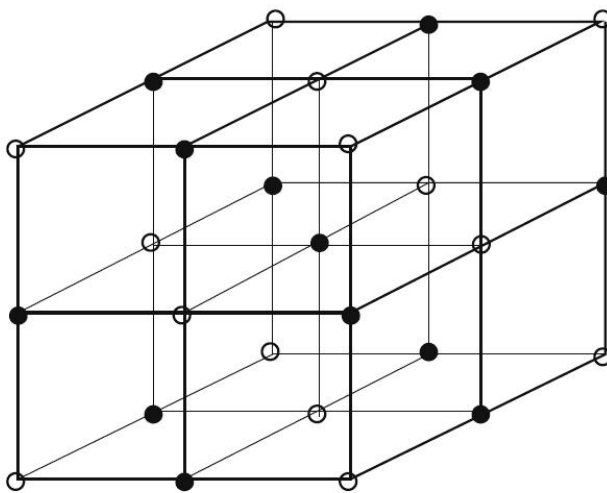
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho ww) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (3.4)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u c_p T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v c_p T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w c_p T) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q \quad (3.5)$$

3.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มเป็นระเบียบวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันเพื่อวิเคราะห์สภาวะของการไหล และเป็นระเบียบวิธีซึ่งฝังตัวอยู่ในซอฟต์แวร์ที่จำหน่ายกันในระดับสากล สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาการไหลได้เป็นอย่างดี โดยหลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มคือการแบ่งของไหลในโดเมนออกเป็นปริมาตร (volume) หรือเซลล์ (cell) ตามที่แสดงในรูปที่ 3.1 แล้วสร้างสมการพีชคณิต (algebraic equation) ที่สอดคล้องสิ่งที่เกิดขึ้นในปริมาตรหรือเซลล์นั้นๆ



รูปที่ 3. 1 การแบ่งโดเมนของของไหลออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยๆ

วิธีการดิสกรีไทซ์สมการโดยจะทำการยกตัวอย่างวิธีการดิสกรีไทซ์สมการในสามมิติในพิกัด x - y - z เริ่มต้นจากพิจารณาสมการ (3.2) โดยกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมคือ เป็นการไหลแบบไม่ขึ้นกับเวลา และไม่มี body force มาเกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถลดรูปของสมการแล้วจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3.6)$$

ทำการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ (3.6) บนปริมาตร ΔV ของเซลล์ P ใดๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} \int_{\Delta V} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} dV + \int_{\Delta V} \rho v \frac{\partial u}{\partial y} dV + \int_{\Delta V} \rho w \frac{\partial u}{\partial z} dV = \\ - \int_{\Delta V} \frac{\partial p}{\partial x} dV + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) dV + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) dV + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) dV \end{aligned} \quad (3.7)$$

จากนั้นประยุกต์ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's theorem) ที่แต่ละพจน์ดังนี้

$$\int_{\Delta V} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} dV = \rho u_P A_e u_e - \rho u_P A_w u_w = F_e u_e - F_w u_w \quad (3.8ก)$$

$$\int_{\Delta V} \rho v \frac{\partial u}{\partial y} dV = \rho v_P A_n u_n - \rho v_P A_s u_s = F_n u_n - F_s u_s \quad (3.8ข)$$

$$\int_{\Delta V} \rho w \frac{\partial u}{\partial z} dV = \rho w_P A_f u_f - \rho w_P A_b u_b = F_f u_f - F_b u_b \quad (3.8ค)$$

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial p}{\partial x} dV = \frac{(p_E - p_W)}{2\Delta x} \Delta V \quad (3.8ง)$$

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) dV = \mu A_e \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_e - \mu A_w \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_w = D_e (u_E - u_P) - D_w (u_P - u_W) \quad (3.8จ)$$

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) dV = \mu A_n \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_n - \mu A_s \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_s = D_n (u_N - u_P) - D_s (u_P - u_S)$$

(3.8ฉ)

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) dV = \mu A_f \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_f - \mu A_b \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_b = D_f (u_F - u_P) - D_b (u_P - u_B) \quad (3.8ช)$$

ดังนั้นสมการ (3.7) จึงสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} (F_e u_e - F_w u_w) + (F_n u_n - F_s u_s) + (F_f u_f - F_b u_b) \\ = D_e (u_E - u_P) - D_w (u_P - u_W) + D_n (u_N - u_P) - D_s (u_P - u_S) \\ + D_f (u_F - u_P) - D_b (u_P - u_B) - \left(\frac{p_E - p_W}{2\Delta x} \right) \Delta V \end{aligned} \quad (3.9)$$

โดยที่

$$D_e = \frac{\mu A_e}{\Delta x}$$

$$D_w = \frac{\mu A_w}{\Delta x}$$

$$D_n = \frac{\mu A_n}{\Delta y}$$

$$D_s = \frac{\mu A_s}{\Delta y}$$

$$D_f = \frac{\mu A_f}{\Delta z}$$

$$D_b = \frac{\mu A_b}{\Delta z}$$

$$F_e = \rho u_p A_e$$

$$F_w = \rho u_p A_w$$

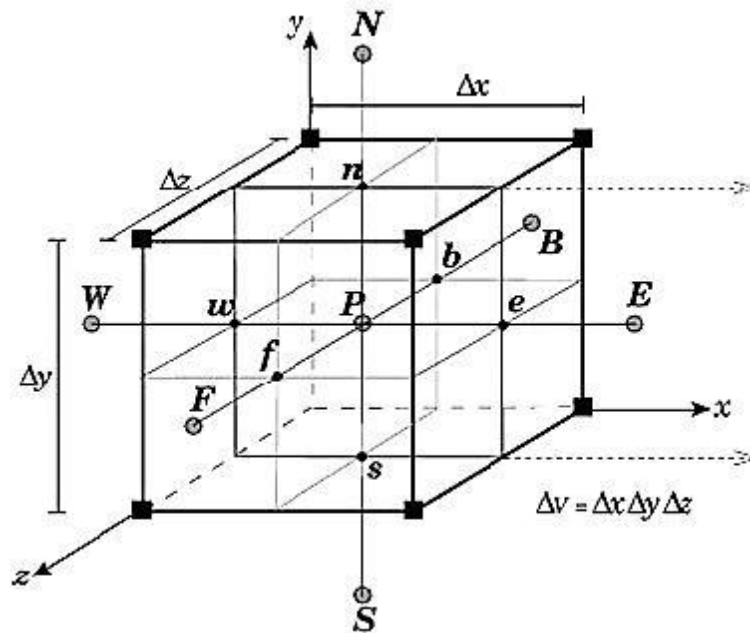
$$F_n = \rho v_p A_n$$

$$F_s = \rho v_p A_s$$

$$F_f = \rho w_p A_f$$

$$F_b = \rho w_p A_b$$

สมการ (3.9) นี้เป็นสมการไฟไนต์วอลุ่มแบบอย่าง (typical equation) สำหรับเซลล์ P ใดๆ ที่อยู่ในโดเมนการไหล ซึ่งการวางตัวของแต่ละจุดบนปริมาตรควบคุมสามารถดูได้จากรูปที่ 3.2



รูปที่ 3. 2 การวางตัวของปริมาตรควบคุมในสามมิติ

หากพิจารณาสมการ (3.9) จะเห็นว่าค่าความเร็วในพจน์ต่างๆทางด้านซ้ายมือของสมการล้วนเป็นค่าที่ขอบของเซลล์ ค่าความเร็วที่ขอบเหล่านี้จำเป็นต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบของความเร็วที่จุดกึ่งกลางเซลล์ ในการแปลงนี้สามารถทำได้โดยการใช้ numerical scheme แบบต่างๆ เช่น central differencing scheme, upwind differencing scheme, second order upwind differencing scheme, Power-law differencing scheme หรือ Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics (QUICK) เป็นต้น

จากสมการ (3.9) จะทำการใช้ numerical scheme อย่างง่าย แสดงให้เห็นถึงการได้มาซึ่งสมการเชิงพีชคณิตที่สามารถนำไปใช้งานต่อได้ โดยจะใช้ central differencing scheme เป็นตัวอย่าง ซึ่ง central differencing scheme จะใช้วิธีการเฉลี่ยค่าจากจุดข้างเคียงของจุดที่สนใจ โดยมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น ดังนี้

$$u_e = \frac{1}{2}(u_E + u_P) \quad (3.10ก)$$

$$u_w = \frac{1}{2}(u_P + u_W) \quad (3.10ข)$$

$$u_n = \frac{1}{2}(u_N + u_P) \quad (3.10ค)$$

$$u_s = \frac{1}{2}(u_p + u_s) \quad (3.10\text{ง})$$

$$u_f = \frac{1}{2}(u_F + u_p) \quad (3.10\text{จ})$$

$$u_b = \frac{1}{2}(u_p + u_B) \quad (3.10\text{ฉ})$$

แทนชุดสมการ (3.10) ลงในสมการ (3.9) แล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการพีชคณิตดังนี้

$$a_p u_p = a_E u_E + a_W u_W + a_N u_N + a_S u_S + a_F u_F + a_B u_B + S_u \Delta V \quad (3.11)$$

โดยที่

$$a_E = D_e - \frac{F_e}{2}$$

$$a_W = D_w + \frac{F_w}{2}$$

$$a_N = D_n - \frac{F_n}{2}$$

$$a_S = D_s + \frac{F_s}{2}$$

$$a_F = D_f - \frac{F_f}{2}$$

$$a_B = D_b + \frac{F_b}{2}$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_F + a_B + (F_e - F_w + F_n - F_s + F_f - F_b) - S_p \Delta V$$

สำหรับงานวิจัยนี้ numerical scheme ที่ใช้คือ QUICK เนื่องจากเป็น numerical scheme ที่มีความแม่นยำค่อนข้างสูง เพราะเป็น 2nd order scheme แต่ข้อเสียของ QUICK scheme คือ ต้องใช้ระยะเวลาและหน่วยความจำค่อนข้างมากในการคำนวณ แต่เนื่องจากโดเมนการไหลของงานวิจัยนี้มีรูปร่างไม่ซับซ้อนมากนัก QUICK scheme จึงเหมาะสมสำหรับการศึกษานี้

3.3 SIMPLE algorithm

Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations หรือ SIMPLE คือวิธีการทำซ้ำเพื่อแก้ระบบสมการวิธีหนึ่ง โดยลักษณะการแก้สมการจะแก้สมการเชิงพีชคณิตที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรที่ไม่ทราบค่าซึ่งในที่นี้คือ ความเร็ว และความดันไปพร้อมกัน (coupling) ซึ่งในรายละเอียดของ SIMPLE algorithm สามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จาก Patankar [22] และ Vesteeg and Malalasekera [23] ระเบียบวิธี SIMPLE เริ่มต้นจากการกำหนดค่าความดัน p^* และความเร็ว u^* , v^* และ w^* จากนั้นแทนค่าเหล่านี้ใน governing equation เพื่อให้ได้สมการสำหรับแก้ไขความดันและความเร็ว โดยคำตอบที่ได้จะถูกนำมาปรับค่าจนกระทั่งคำตอบลู่อเข้า

สมการดิครรีไทซ์ของสมการอนุรักษ์โมเมนตัมในปริมาตรควบคุมที่ผิวหน้า w , s และ b

ดังที่แสดงตำแหน่งในรูปที่ 3.2 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\text{แกน } x \quad a_w u_w = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + (p_w - p_p)A + S_u \Delta V \quad (3.12)$$

$$\text{แกน } y \quad a_s v_s = \sum_{nb} a_{nb} v_{nb} + (p_s - p_p)A + S_v \Delta V \quad (3.13)$$

$$\text{แกน } z \quad a_b w_b = \sum_{nb} a_{nb} w_{nb} + (p_b - p_p)A + S_w \Delta V \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} &= a_E u_E + a_w u_w + a_N u_N + a_S u_S + a_F u_F + a_B u_B - S_P \\ \sum_{nb} a_{nb} v_{nb} &= a_E v_E + a_w v_w + a_N v_N + a_S v_S + a_F v_F + a_B v_B - S_P \\ \sum_{nb} a_{nb} w_{nb} &= a_E w_E + a_w w_w + a_N w_N + a_S w_S + a_F w_F + a_B w_B - S_P \end{aligned}$$

เมื่อเดาค่าเริ่มต้น p^* , u^* , v^* และ w^* และแทนค่าลงในสมการ (3.12) – (3.14) สามารถเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$a_w u_w^* = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb}^* + (p_w^* - p_p^*)A_w + S_u \Delta V \quad (3.15)$$

$$a_s v_s^* = \sum_{nb} a_{nb} v_{nb}^* + (p_s^* - p_p^*)A_s + S_v \Delta V \quad (3.16)$$

$$a_b w_b^* = \sum_{nb} a_{nb} w_{nb}^* + (p_b^* - p_p^*)A_b + S_w \Delta V \quad (3.17)$$

โดยที่ $p = p^* + p'$ (3.18ก)

$$u = u^* + u' \quad (3.18ข)$$

$$v = v^* + v' \quad (3.18ค)$$

$$w = w^* + w' \quad (3.18ง)$$

เมื่อ p, u, v, w คือ ค่าที่ถูกต้อง

p^*, u^*, v^*, w^* คือ ค่าความดันและความเร็วที่คำนวณได้ในแต่ละชั้นตอน

p', u', v', w' คือ ค่าปรับแก้

นำชุดสมการ (3.18) แทนลงในสมการ (3.12) – (3.14) แล้วลบด้วยสมการ (3.15) – (3.17) ตามลำดับ จะได้

$$a_w u'_w = \sum_{nb} a_{nb} u'_{nb} + (p'_w - p'_p) A_w \quad (3.19)$$

$$a_s v'_s = \sum_{nb} a_{nb} v'_{nb} + (p'_s - p'_p) A_s \quad (3.20)$$

$$a_b w'_b = \sum_{nb} a_{nb} w'_{nb} + (p'_b - p'_p) A_b \quad (3.21)$$

และเพื่อลดความยุ่งยากในการหาค่าตอบของสมการ จะกำหนดให้ พจน์ $\sum_{nb} a_{nb} u'_{nb}$, $\sum_{nb} a_{nb} v'_{nb}$ และ $\sum_{nb} a_{nb} w'_{nb}$ มีค่าเป็นศูนย์ (Patankar [22]) และเมื่อการไหลมีความสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง จะได้สมการของค่าแก้ไขความเร็วของ u_w คือ

$$a_w u'_w = (p'_w - p'_p) A_w$$

หรือ $u'_w = d_w (p'_w - p'_p)$ (3.22)

เมื่อ $d_w = \frac{A_w}{a_w}$

จากนั้นแทนสมการ (3.22) ลงในสมการ (3.18ข) จะได้

$$u_w = u_w^* + d_w (p'_w - p'_p) \quad (3.23ก)$$

สำหรับ u_e, v_s, v_n, w_f และ w_b ก็พิจารณาในทำนองเดียวกัน จะได้

$$u_e = u_e^* + d_e(p'_E - p'_P) \quad \text{เมื่อ } d_e = \frac{A_e}{a_e} \quad (3.23ข)$$

$$v_s = v_s^* + d_s(p'_S - p'_P) \quad \text{เมื่อ } d_s = \frac{A_s}{a_s} \quad (3.23ค)$$

$$v_n = v_n^* + d_n(p'_N - p'_P) \quad \text{เมื่อ } d_n = \frac{A_n}{a_n} \quad (3.23ง)$$

$$w_f = w_f^* + d_f(p'_F - p'_P) \quad \text{เมื่อ } d_f = \frac{A_f}{a_f} \quad (3.23จ)$$

$$w_b = w_b^* + d_b(p'_B - p'_P) \quad \text{เมื่อ } d_b = \frac{A_b}{a_b} \quad (3.23ฉ)$$

จากสมการความต่อเนื่อง (สมการ (3.1)) ทำการอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุมได้เป็น

$$[(\rho u A)_e - (\rho u A)_w] + [(\rho v A)_n - (\rho v A)_s] + [(\rho w A)_f - (\rho w A)_b] = 0 \quad (3.24)$$

จากนั้นแทนชุดสมการ (3.23) ลงในสมการ (3.24) แล้วจัดรูปใหม่จะได้สมการของความดัน
แก้ไขดังนี้

$$a_P p'_P = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S + a_F p'_F + a_B p'_B + b \quad (3.25)$$

เมื่อ

$$a_E = \rho_e d_e A_e$$

$$a_W = \rho_w d_w A_w$$

$$a_N = \rho_n d_n A_n$$

$$a_S = \rho_s d_s A_s$$

$$a_F = \rho_f d_f A_f$$

$$a_B = \rho_b d_b A_b$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_F + a_B - S_P$$

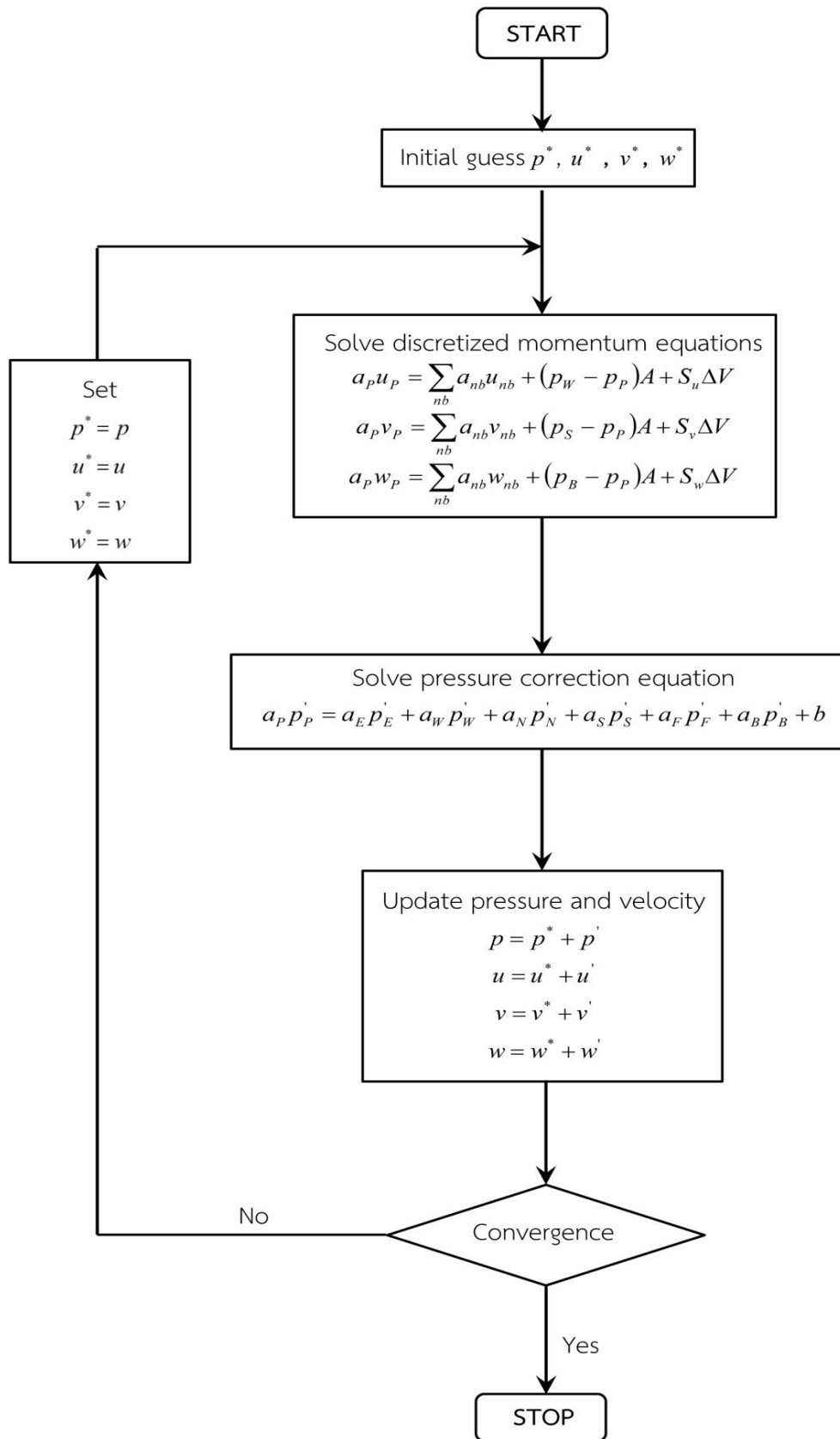
$$b = (\rho u^* A)_e - (\rho u^* A)_w + (\rho v^* A)_n - (\rho v^* A)_s + (\rho w^* A)_f - (\rho w^* A)_b$$

จากวิธีการทั้งหมดที่ได้กล่าวมา สามารถสรุปขั้นตอนของระเบียบวิธี SIMPLE ได้ดังนี้

- 1) เตาค่า p^* , u^* , v^* และ w^*
- 2) คำนวณค่า u^* , v^* และ w^* จากสมการ (3.15) – (3.17)
- 3) หาค่า p^* จากสมการ (3.25)
- 4) คำนวณค่า p จากสมการ (3.18) จากนั้นแทนค่า p ที่คำนวณได้มาเป็น p^* สำหรับคำนวณในรอบต่อไป
- 5) คำนวณค่า u , v และ w จากชุดสมการ (3.23) โดยใช้ค่า p' ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3) จากนั้นจึงกำหนดค่า u , v และ w ที่คำนวณได้ให้เป็น u^* , v^* และ w^* เป็นค่าเริ่มต้นของการคำนวณรอบใหม่
- 6) ดำเนินขั้นตอนที่ 2) ถึง 5) ซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าค่า p^* , u^* , v^* และ w^* ลู่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้องโดยตรวจสอบการลู่เข้าใกล้ศูนย์ของพจน์ b (mass source term) ในสมการ (3.25) ซึ่งแสดงว่าค่า p^* , u^* , v^* และ w^* ที่คำนวณได้มีความสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง

ขั้นตอนทั้งหมดสามารถแสดงเป็นแผนภาพการคำนวณได้ดังรูปที่ 3.3





รูปที่ 3.3 ขั้นตอนของ SIMPLE algorithm

3.4 Volume of fluid method (VOF)

Volume of fluid method ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Hirt and Nichols [24] เป็นวิธีการที่ใช้คำนวณในกรณีที่ต้องการทราบความเข้มข้นของของไหลที่ไหลผ่านปริมาตรควบคุมแต่ละเซลล์ โดยใช้วิธีการเฉลี่ยคุณสมบัติของของไหลแล้วรวมสมการการไหลของของไหลทั้งสองให้เป็นสมการเดียว และใช้ interface indicator function (γ) หรืออาจเป็นที่รู้จักในชื่ออื่นเช่น color function หรือ volume fraction เป็นตัวแปรสำหรับติดตามการเปลี่ยนแปลงที่ผิวสัมผัสของของไหล ซึ่งค่าต่างๆของ γ สามารถอธิบายได้ดังนี้

$\gamma = 1$ หมายความว่า ในปริมาตรควบคุมเต็มไปด้วยของไหล phase 1

$\gamma = 0$ หมายความว่า ในปริมาตรควบคุมเต็มไปด้วยของไหล phase 2

$0 < \gamma < 1$ หมายความว่า เกิดการผสมกันของของไหล phase 1 และ phase 2

และสมการที่ใช้ใน volume of fluid method สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังแสดงต่อไปนี้

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla(\rho_m u) = 0 \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial \rho_m u}{\partial t} + \nabla(\rho_m uu) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho_m g \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla(\gamma u) = 0 \quad (2.26)$$

$$\text{โดยที่} \quad \rho_m = \sum \gamma_k \rho_k \quad (2.27)$$

Subscript m หมายถึง คุณสมบัติของของผสม

Subscript k หมายถึง ของไหล phase k ใดๆ

3.5 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้โปรแกรมเชิงพาณิชย์ (commercial programs) ในการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขและแก้ปัญหาเพื่อวิเคราะห์ผลต่างๆ ซึ่งโปรแกรมที่นำมาใช้งาน ได้แก่ ANSYS GAMBIT และ ANSYS FLUENT 12.0 (ANSYS FLUENT 12.0, 2009, Fluent Inc. [25]) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้มาตรฐานและมีความน่าเชื่อถือเป็นอย่างมาก จึงได้มีการนำเอาโปรแกรมทั้งสองนี้ไปใช้ในงานที่มีความเกี่ยวข้องกับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computational fluid dynamics, CFD) เป็นที่แพร่หลาย

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงวิธีการใช้งานโปรแกรมและตั้งค่าต่างๆของโปรแกรม ANSYS GAMBIT และ ANSYS FLUENT 12.0 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.5.1 โปรแกรม ANSYS GAMBIT

สำหรับโปรแกรม ANSYS GAMBIT เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ โดยมีวิธีการใช้งานดังนี้

- 1) สร้างลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองพร้อมทั้งกำหนดขนาดตามที่ต้องการ
- 2) สร้างกริดภายในโดเมนการไหลโดยการสร้างกริดนั้นจะต้องกำหนดความละเอียดของกริดให้เหมาะสมกับแต่ละปัญหาเพราะถ้าหากสร้างกริดที่มีความละเอียดน้อยเกินไปก็จะได้ค่าจากการคำนวณที่มีความแม่นยำต่ำ หรือถ้าหากสร้างกริดที่มีความละเอียดมากเกินไปก็จะใช้เวลาในการคำนวณมากเกินไป
- 3) กำหนดลักษณะของเงื่อนไขขอบเขต เช่น velocity inlet, pressure inlet, outflow หรือ wall เป็นต้น
- 4) บันทึกไฟล์นามสกุล .msh เพื่อนำไปใช้งานในโปรแกรม ANSYS FLUENT ต่อไป

3.5.2 โปรแกรม ANSYS FLUENT 12.0

สำหรับโปรแกรม ANSYS FLUENT 12.0 เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการแก้ปัญหา โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งมีวิธีการใช้งานดังนี้

- 1) Import ไฟล์ นามสกุล .msh ที่ทำการสร้างแบบจำลองและสร้างกริดจากโปรแกรม ANSYS GAMBIT เอาไว้ และกำหนด scale ให้ตรงตามความต้องการ
- 2) กำหนดคุณสมบัติของของไหลที่ต้องการ เช่น ความหนาแน่น, ความหนืด และค่าความจุความร้อนจำเพาะ เป็นต้น
- 3) เลือกรูปแบบของแบบจำลอง (model) ที่ใช้ในการคำนวณ

- 4) กำหนดรายละเอียดของเงื่อนไขขอบ (boundary conditions) เช่น ความเร็วของของไหลบริเวณทางเข้า, อุณหภูมิของผนังท่อ และ volume fraction เป็นต้น
- 5) เลือกวิธีการในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งประกอบด้วย สมการความต่อเนื่อง สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน โดยการแปลงให้เป็นสมการเชิงพีชคณิต
- 6) ทำการคำนวณปัญหาจนกระทั่งเกิดการลู่เข้าของคำตอบ

สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขของการศึกษานี้ใช้แบบจำลอง volume of fluid ในการคำนวณปัญหาการไหล และลักษณะการไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ สำหรับ numerical scheme ที่ใช้คือ QUICK scheme และระเบียบวิธีที่ใช้ในการแก้สมการความเร็วและความดัน (coupling) คือ SIMPLE algorithm ส่วนข้อกำหนดที่ใช้ในการพิจารณาการลู่เข้าของคำตอบของสมการความต่อเนื่อง และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม ต้องมีค่าไม่เกิน 0.000001



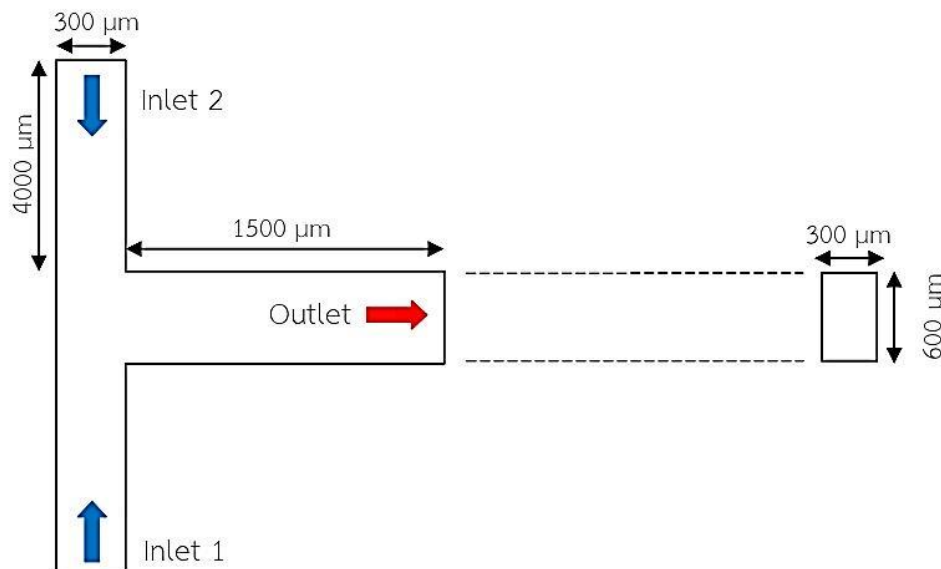
บทที่ 4

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

ในบทนี้จะกล่าวถึงการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม ANSYS FLUENT 12.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาของงานวิจัยที่เคยมีผู้ศึกษามาก่อนหน้านี้และผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 12.0 เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของโปรแกรมว่าสามารถคำนวณผลได้อย่างถูกต้อง โดยกรณีศึกษามีดังนี้

4.1 การเปรียบเทียบกับผลการคำนวณเชิงตัวเลข

กรณีแรกจะศึกษาการเปลี่ยนแปลง mixing efficiency โดยจำลองการไหลผ่านไมโครมิกเซอร์รูปตัว T โดยเปรียบเทียบกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของ Soleymani et al. [6] ซึ่งจำลองการไหลในสามมิติ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำที่ไหลผ่านไมโครมิกเซอร์รูปตัว T ดังแสดงในรูปที่ 4.1



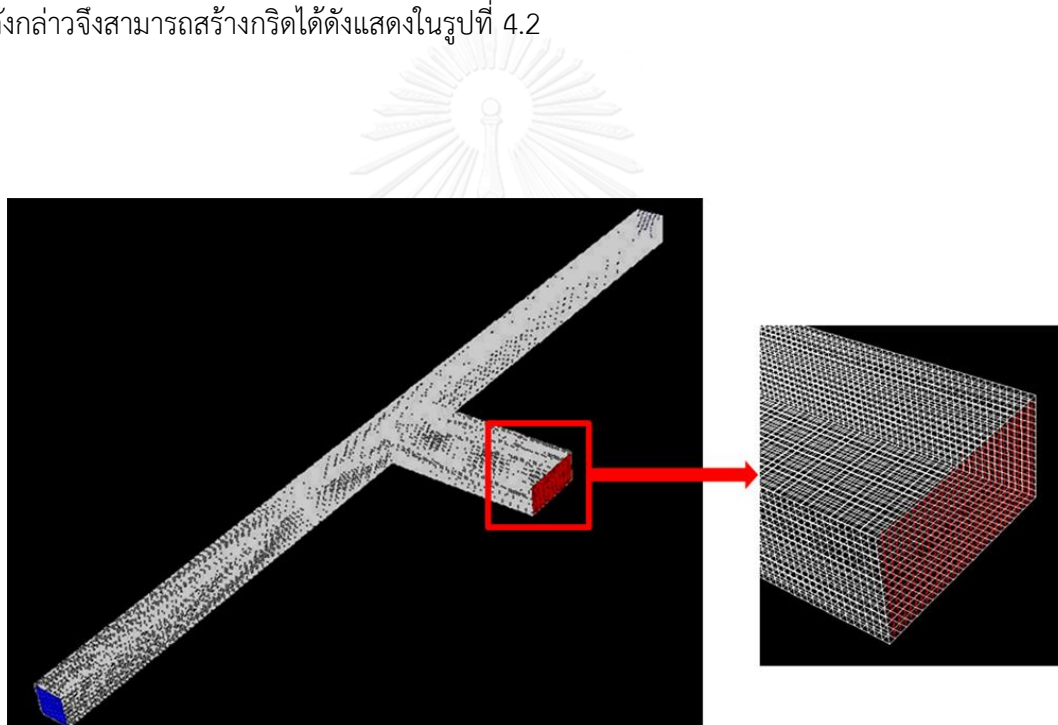
รูปที่ 4. 1 T-shaped micro-mixer ที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำ

4.1.1 Simulation method

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดรูปแบบและวิธีการคำนวณปัญหาของการไหล คือ ใช้ SIMPLE algorithm สำหรับการแก้ระบบสมการระหว่างความเร็วและความดัน (velocity – pressure coupling) และใช้ QUICK scheme สำหรับการดิสครีไทซ์ (discretized) พจน์ของการพา (convection term)

4.1.2 การสร้างกริด (grid generation)

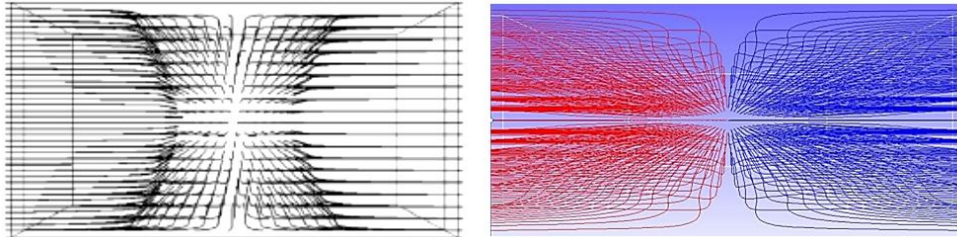
สำหรับกรณีนี้จากผลการศึกษาของ Soleymani et al. [6] พบว่าขนาดของเซลล์ (cells) ที่เหมาะสมในการศึกษานี้ทุกๆ เซลล์ควรมีขนาดเท่ากับ $8 \mu\text{m}$ ในทุกๆ มิติของแต่ละเซลล์ และจากผลดังกล่าวจึงสามารถสร้างกริดได้ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4. 2 กริดที่ใช้ในการคำนวณสำหรับปัญหาการไหล

4.1.3 การเปรียบเทียบผล validation

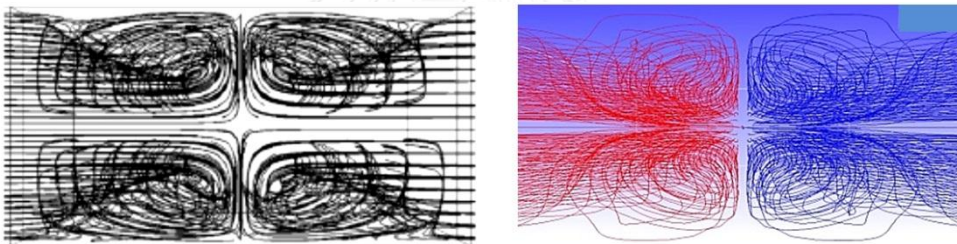
การเปรียบเทียบผลการ validation จะเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลของของไหลและ mixing efficiency ที่บริเวณทางออกของไมโครมิกเซอร์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 – 4.6



(a) Soleymani et al. [6]

(b) Present work

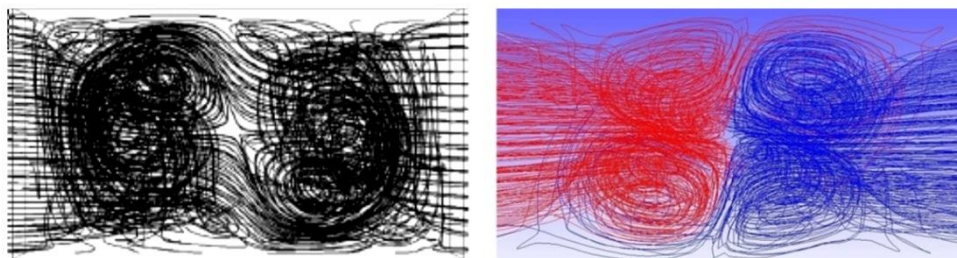
รูปที่ 4. 3 Path lines บริเวณทางเข้า mixing channel ที่ $Re = 12$



(a) Soleymani et al. [6]

(b) Present work

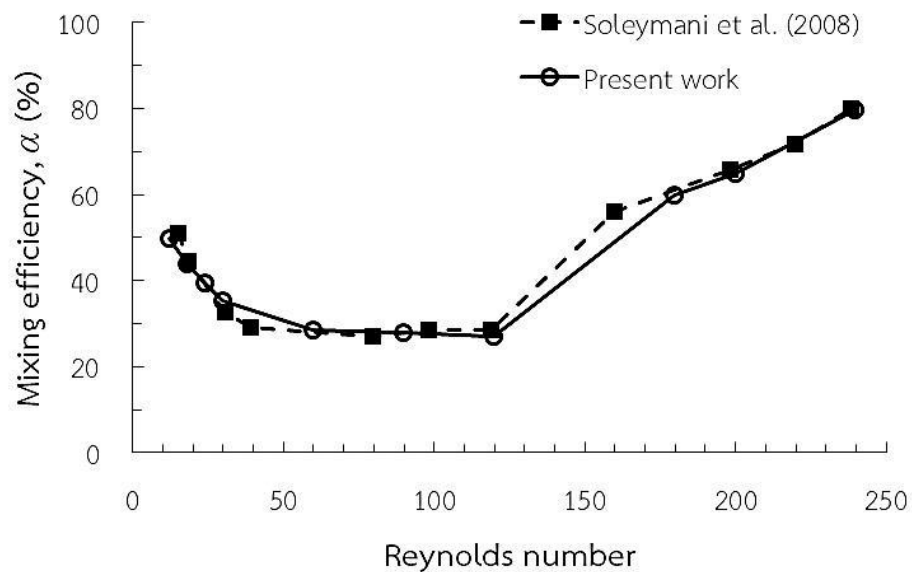
รูปที่ 4. 4 Path lines บริเวณทางเข้า mixing channel ที่ $Re = 80$



(a) Soleymani et al. [6]

(b) Present work

รูปที่ 4. 5 Path lines บริเวณทางเข้า mixing channel ที่ $Re = 240$

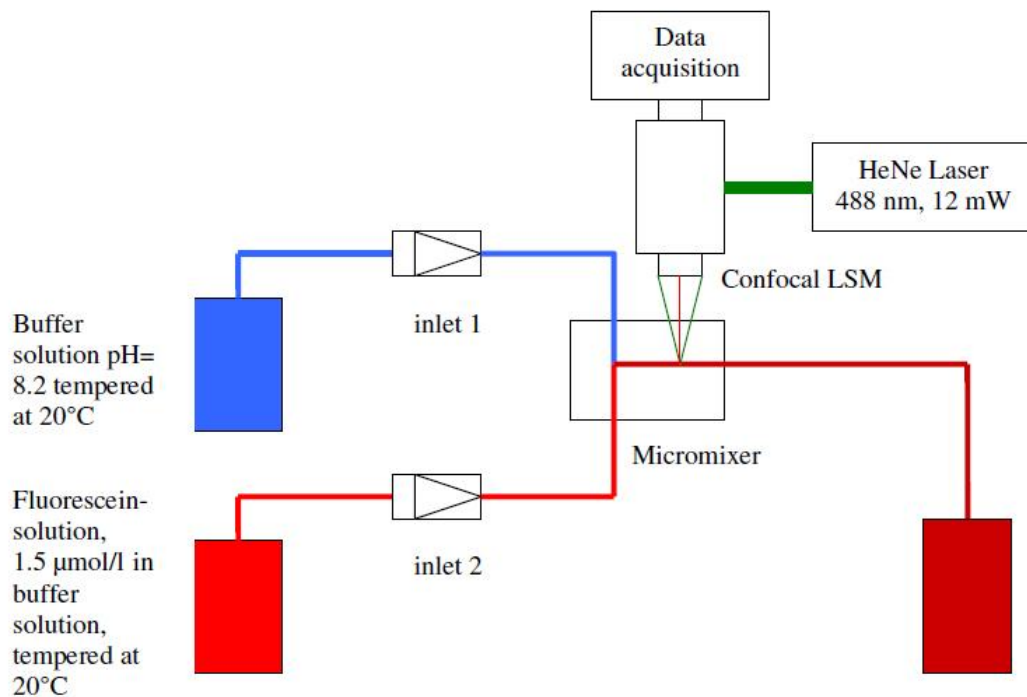


รูปที่ 4. 6 การเปรียบเทียบ mixing efficiency ที่ Reynolds number ต่างๆ

รูปที่ 4.3 – 4.5 แสดง path lines ของน้ำที่ไหลเข้า mixing channel แล้วปะทะกันที่ค่า Reynolds number ต่างๆกัน พบว่าผลที่ได้จากการคำนวณและผลการศึกษาของ Soleymani et al. [6] มีความใกล้เคียงกัน โดยที่ค่า Reynolds number เท่ากับ 12 จะยังไม่เกิดการผสมเข้าด้วยกัน โดยจะของไหลแต่ละฝั่งจะแยกกันไหล เมื่อ Reynolds number เพิ่มขึ้นลักษณะการไหลมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะเริ่มมีการหมุนวนเกิดขึ้นในแต่ละฝั่ง นั่นคือการเริ่มต้นของการผสมกัน และเมื่อ Reynolds number เพิ่มขึ้นอีก น้ำทั้งสองฝั่งมีการหมุนวนเข้าด้วยกันส่งผลให้การผสมกันขึ้น และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.6 ประกอบ จะเห็นชัดเจนว่าเมื่อ Reynolds number เพิ่มขึ้นส่งผลให้ mixing efficiency เพิ่มขึ้นเช่นกัน และผลการเปรียบเทียบ mixing efficiency ที่ Reynolds number ต่างๆ พบว่าผลการคำนวณมีความใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Soleymani et al. [6] และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

4.2 การเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

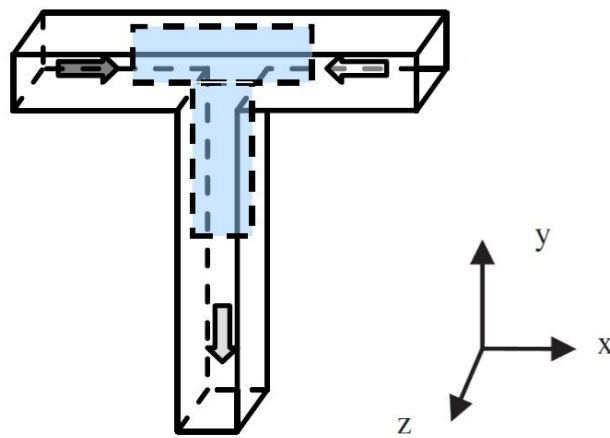
ในส่วนนี้จะเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับผลการทดลองของ Mouheb et al. [8] ซึ่งทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลสองชนิด ผ่าน T-shaped micro-mixer โดยใช้วิธี micro Laser-induced fluorescence (μ -LIF) การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4. 7 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง (Mouheb et al. [8])

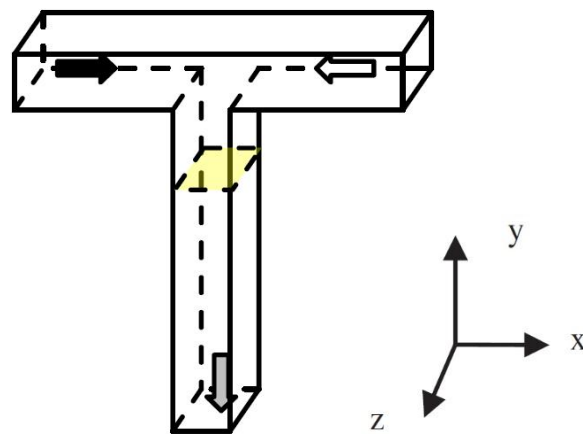
ส่วนขนาดของไมโครมิคเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบ มีความยาวในช่วงที่ไหลเข้าเท่ากับ 16 mm พื้นที่หน้าตัด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ส่วนความยาวของ mixing channel เท่ากับ 24 mm และมีพื้นที่หน้าตัด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ โดยมีการกำหนดเงื่อนไขที่ขอบเป็นดังนี้ ลักษณะการไหลที่ทางเข้าเป็นการไหลแบบพัฒนาเต็มที่, บริเวณทางออกกำหนดการไหลเป็นแบบ outflow และ no-slip condition ในส่วนที่เป็นผนังของช่องการไหล สำหรับวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเลือกใช้ SIMPLE algorithm ในการคำนวณ และ numerical scheme เลือกใช้ QUICK

การแสดงผลการเปรียบเทียบจะแสดงผลในรูปแบบของพฤติกรรมการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตาม Reynolds number โดยจะพิจารณาที่ตำแหน่งของไมโครมิทเซอร์สองตำแหน่งคือ บริเวณกึ่งกลางช่องการไหลที่ของไหลทั้งสองไหลมาปะทะกันและบริเวณระนาบตัดขวางการไหลในช่อง mixing channel โดยมีระยะจากทางออกของ mixing channel เท่ากับ 11.4 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (a) และ (b)



(a) ตำแหน่ง A ที่ใช้พิจารณาการไหล

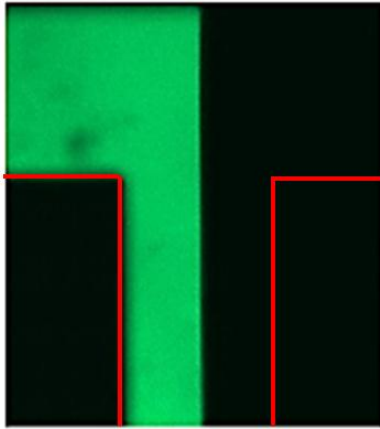
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



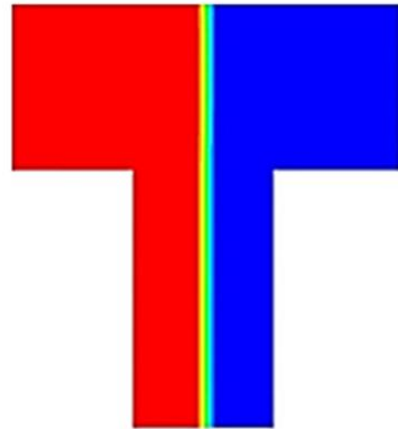
(b) ตำแหน่ง B ที่ใช้พิจารณาการไหล

รูปที่ 4. 8 ตำแหน่งที่ใช้พิจารณาพฤติกรรมการไหล

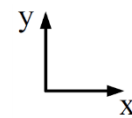
Experiment (Mouheb et al. [8])



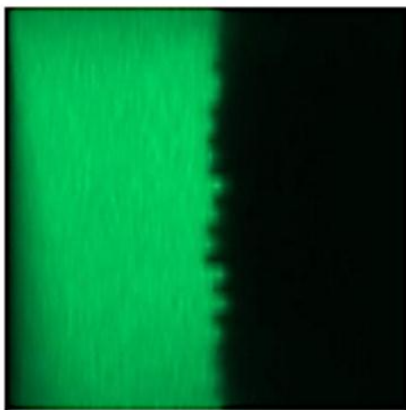
Present work



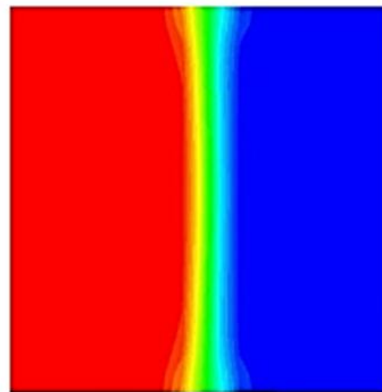
(a) พฤติกรรมการไหลที่ตำแหน่ง A



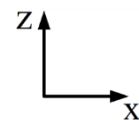
Experiment (Mouheb et al. [8])



Present work

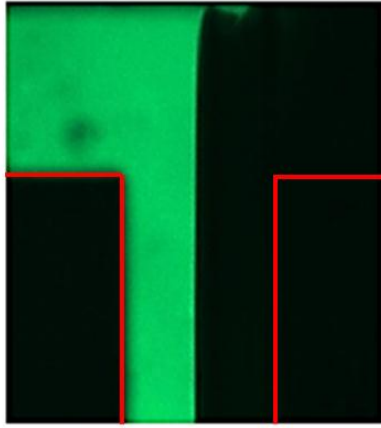


(b) พฤติกรรมการไหลที่ตำแหน่ง B

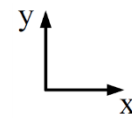
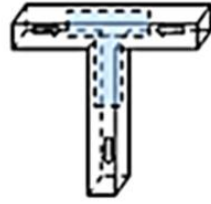
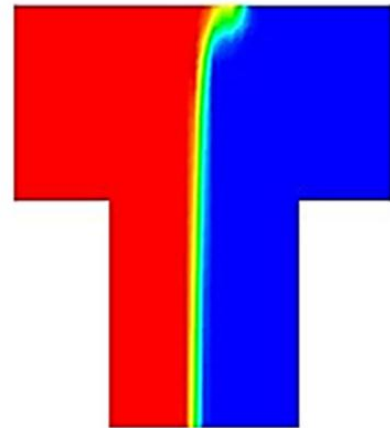


รูปที่ 4. 9 พฤติกรรมการไหลที่ Reynolds number = 25

Experiment (Mouheb et al. [8])

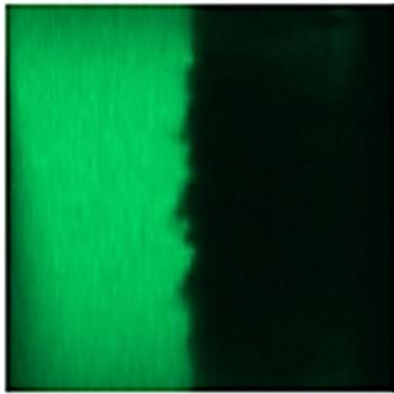


Present work

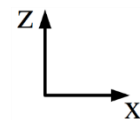
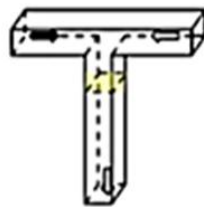
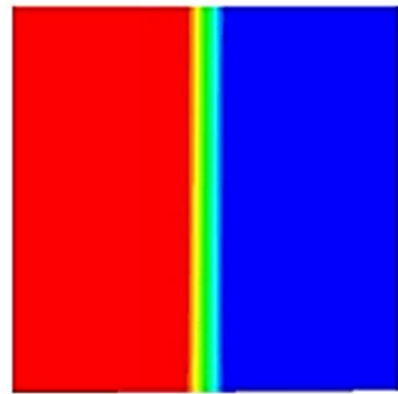


(a) พฤติกรรมการไหลที่ตำแหน่ง A

Experiment (Mouheb et al. [8])



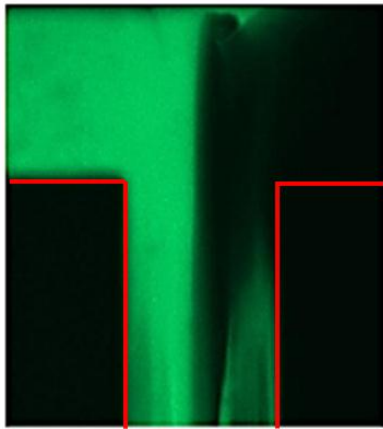
Present work



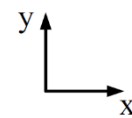
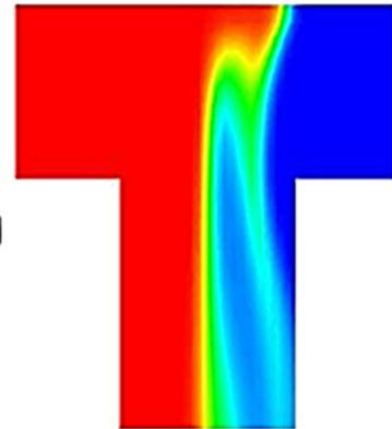
(b) พฤติกรรมการไหลที่ตำแหน่ง B

รูปที่ 4. 10 พฤติกรรมการไหลที่ Reynolds number = 100

Experiment (Mouheb et al. [8])

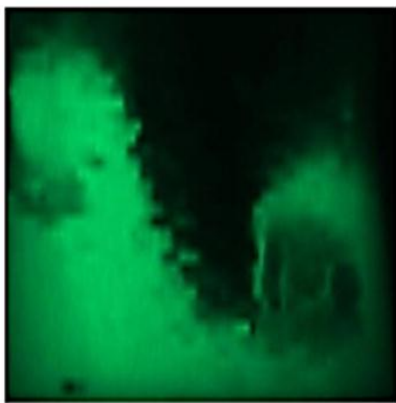


Present work

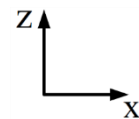
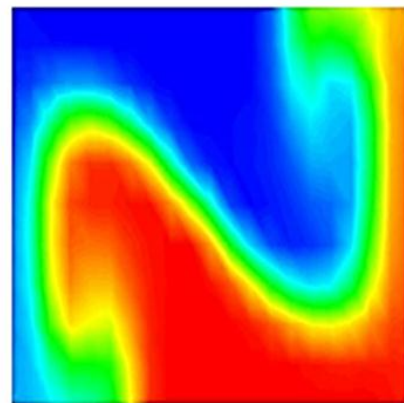


(a) พฤติกรรมการไหลที่ตำแหน่ง A

Experiment (Mouheb et al. [8])



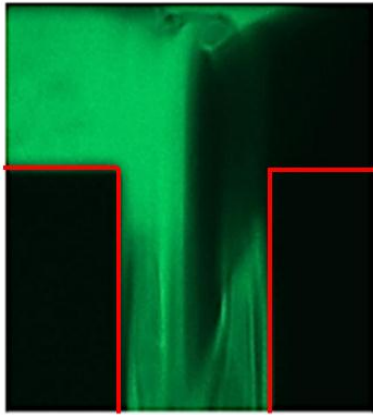
Present work



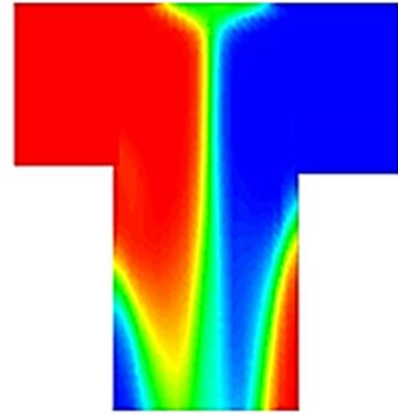
(b) พฤติกรรมการไหลที่ตำแหน่ง B

รูปที่ 4. 11 พฤติกรรมการไหลที่ Reynolds number = 150

Experiment (Mouheb et al. [8])

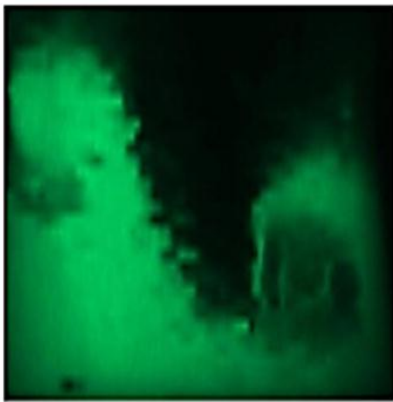


Present work

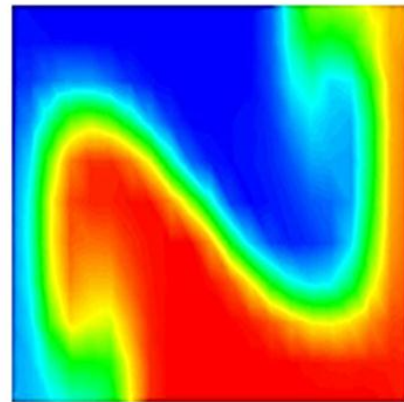


(a) พฤติกรรมการไหลที่ตำแหน่ง A

Experiment (Mouheb et al. [8])



Present work



(b) พฤติกรรมการไหลที่ตำแหน่ง B

รูปที่ 4. 12 พฤติกรรมการไหลที่ Reynolds number = 200

รูปที่ 4.9 – 4.12 แสดงพฤติกรรมการไหลที่ Reynolds number ต่างๆ พบว่ารูปที่ได้จากผลการทดลองและผลจากการคำนวณเชิงตัวเลขมีความคล้ายคลึงกันในทุกๆกรณี ซึ่งอาจจะมีบางตำแหน่งที่มีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย ทั้งนี้อาจจะขึ้นอยู่กับการควบคุมปัจจัยต่างๆในการทดลองให้คงที่สามารถทำได้ยาก แต่เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วก็ถือว่ามีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก

4.3 สรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

จากการตรวจสอบความถูกต้องจากผลการคำนวณเชิงตัวเลขและผลการทดลองจากผู้ที่ทำการศึกษาในอดีตแล้วพบว่า ผลการเปรียบเทียบในแต่ละกรณีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม FLUENT 12.0 ซึ่งทำให้มีความมั่นใจในระดับหนึ่งว่าการใช้งานโปรแกรมมีความแม่นยำมากพอที่จะใช้ในการศึกษาต่อไป



บทที่ 5

ผลลัพธ์จากการคำนวณและการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Simulation) ในไมโครมิกเซอร์ โดยใช้โปรแกรมเชิงพาณิชย์ (Commercial program) คือ FLUENT 12.0 ในจำลองแบบสามมิติ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) และของไหลที่ใช้ในการศึกษาคือ เอทานอล (Ethanol) และน้ำ โดยจะพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการผสมกันของของไหลทั้งสองชนิดและความดันตกที่เกิดขึ้น ซึ่งประกอบด้วย

- 1) Grid independence
- 2) ผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลบริเวณทางเข้าของไมโครมิกเซอร์
- 3) ผลจากการเปลี่ยนแปลง mixing channel aspect ratio ของไมโครมิกเซอร์
- 4) ผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไมโครมิกเซอร์
- 5) การเปรียบเทียบผลของการ Scale up

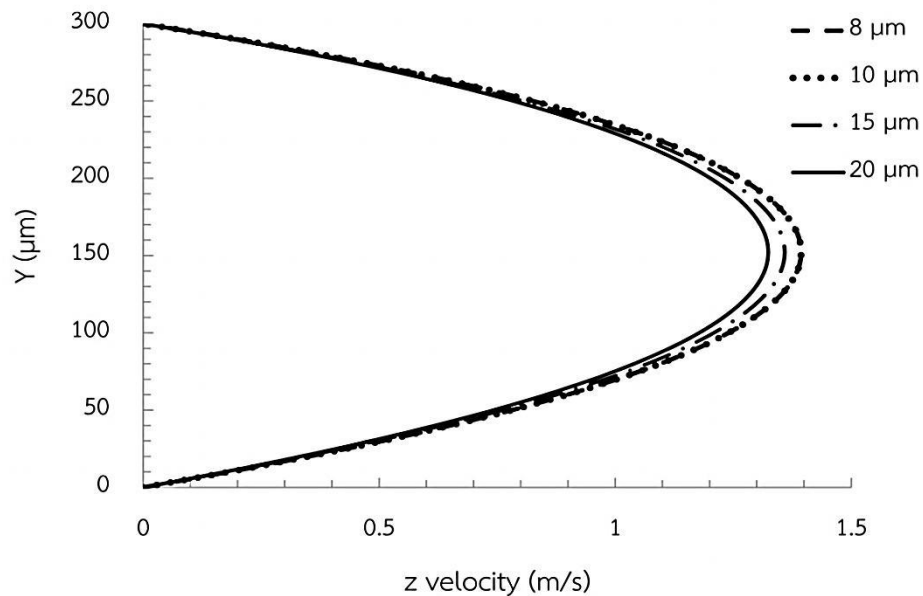
โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อจำกัดในการศึกษาดังนี้

- 1) ศึกษาการไหลในช่วงการไหลแบบราบเรียบ
- 2) ไม่พิจารณาผลจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากการผสมกันของเอทานอลและน้ำ

5.1 Grid independence

ในส่วนแรกจะเป็นการทดสอบ grid independence เนื่องจากในการสร้างกริดสำหรับการทดสอบในแต่ละกรณีจำเป็นต้องสร้างกริดหรือเซลล์ให้มีขนาดที่เหมาะสม เพราะถ้าหากสร้างกริดที่มีความละเอียดน้อยเกินไปก็จะส่งผลต่อความแม่นยำของคำตอบที่ได้จากการคำนวณ และถ้าสร้างกริดให้มีความละเอียดมากเกินไป ก็จะส่งผลต่อระยะเวลาและหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณซึ่งมากเกินความจำเป็น ดังนั้นการทดสอบ grid independence จึงมีความจำเป็นในการศึกษานี้

สำหรับกรณีที่ใช้ทดสอบ grid independence จะจำลองการไหลผ่าน T-shaped micro-mixer ด้วยค่า Reynolds number บริเวณทางเข้าเท่ากับ 300 และเปรียบเทียบกับรูปร่างความเร็ว (velocity profile) ที่ทางออกของ mixing channel โดยการสร้างกริดในแต่ละกรณีจะกำหนดขนาดของเซลล์แต่ละเซลล์ให้มีขนาดเท่ากับ 8, 10, 15 และ 20 μm ในทุกๆมิติของแต่ละเซลล์



รูปที่ 5. 1 Velocity profile บริเวณทางออกของ mixing channel ที่ $Re = 300$

จากรูปที่ 5.1 แสดง velocity profile บริเวณทางออกของ mixing channel โดยการเปรียบเทียบกับขนาดของเซลล์แต่ละเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณ เพื่อหาขนาดของเซลล์ที่มีความเหมาะสมสำหรับการศึกษานี้ หากพิจารณาในรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าการใช้เซลล์ขนาด $8 \mu m$ ในการคำนวณให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกันกับการใช้เซลล์ขนาด $10 \mu m$ แต่ใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า ดังนั้นขนาดของเซลล์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหานี้คือ $10 \mu m$

5.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลบริเวณทางเข้าของไมโครมิกเซอร์

ในการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลบริเวณทางเข้าของไมโครมิกเซอร์ นั้นจะแสดงผลโดยใช้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) เป็นตัวแปร ซึ่งการคำนวณค่า Reynolds number จะคำนวณจากคุณสมบัติของน้ำเท่านั้น ตามสมการดังต่อไปนี้

$$Re = \frac{\rho U d_H}{\mu} \quad (5.1)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ

μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำ

U คือ ความเร็วเฉลี่ยของน้ำที่ทางเข้า

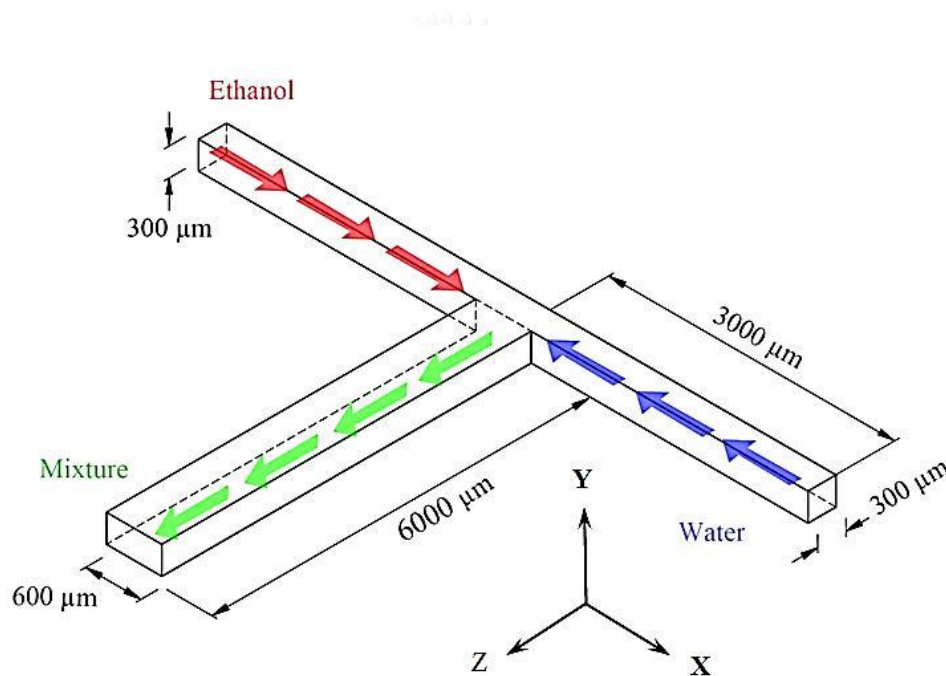
d_H คือ hydraulic diameter ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$d_H = \frac{2wh}{w+h} \quad (5.2)$$

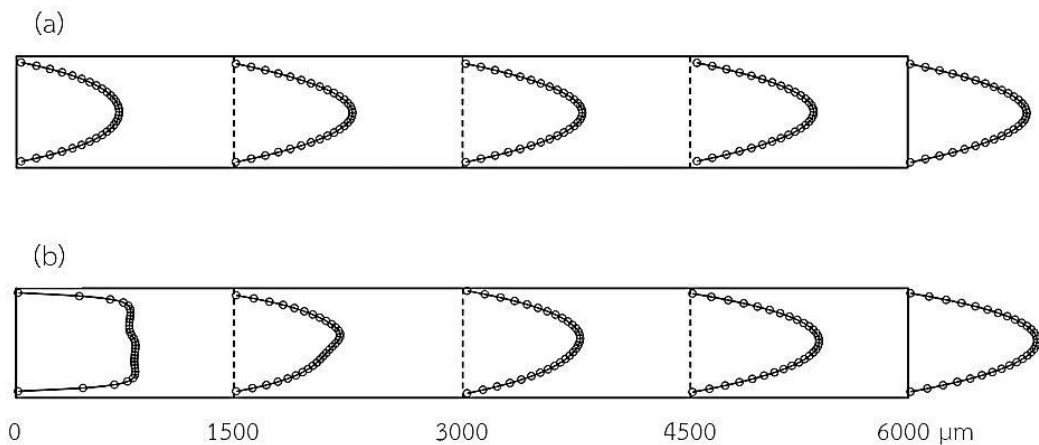
เมื่อ w คือ ความกว้างของช่องที่น้ำไหลเข้า

h คือ ความสูงของช่องที่น้ำไหลเข้า

โดยค่า Reynolds number ที่ใช้ศึกษาในกรณีนี้มีค่าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 300 และรูปแบบไมโครมิคเซอร์ที่ใช้เป็นไมโครมิคเซอร์รูปแบบตัว T (T-shaped micro-mixer) ดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดยมีค่า Mixing channel aspect ratio เท่ากับ 0.5



รูปที่ 5. 2 ไมโครมิคเซอร์รูปแบบตัว T (T-shaped micro-mixer)



รูปที่ 5.3 Velocity profile ตลอดความยาวของ mixing channel

(a) Reynolds number = 1 และ (b) Reynolds number = 300

ในการพิจารณาผลจากการจำลองแบบ ที่ค่า Reynolds number ต่างๆ จะพิจารณาที่บริเวณทางออกของไมโครมิกเซอร์ โดยมีเงื่อนไขคือ การไหลต้องเป็นการไหลแบบพัฒนาเต็มที่ (Fully developed flow) ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากรูปร่างความเร็ว (Velocity profile) ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ซึ่งพบว่าทุกๆ Reynolds number ที่ทดสอบการไหลบริเวณทางออกเป็น fully developed flow ทุกกรณี

จากรูปที่ 5.4 แสดง contour plot ของ ethanol-water volume fraction บริเวณทางออกของ mixing channel โดยที่บริเวณสีแดงคือ เอทานอล และบริเวณสีน้ำเงินคือ น้ำ พบว่าที่ Reynolds number ต่างๆกัน ลักษณะการผสมกันก็มีความแตกต่างกัน โดยที่ค่า Reynolds number ต่ำ เอทานอลและน้ำจะไหลโดยแยกชั้นกันและยังไม่เกิดการผสมกัน และเมื่อ Reynolds number เพิ่มขึ้นเอทานอลและน้ำก็เริ่มผสมเข้าด้วยกันดีขึ้นเรื่อยๆตาม Reynolds number ที่เพิ่มขึ้น ในการแสดงผลเชิงปริมาณสามารถคำนวณได้จาก contour plot ของค่า volume fraction ซึ่งจะแสดงผลที่ได้เป็นค่า mixing efficiency (α) มีวิธีการคำนวณดังนี้

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{\sigma^2}{\sigma_{\max}^2}} \quad (5.3)$$

โดยที่ σ^2 คือ สัดส่วนความแปรปรวนของความเข้มข้น
(the ratio of variance of concentration)

σ_{\max}^2 คือ ความแปรปรวนสูงสุดของของผสม
(the maximum variance of the mixture)

ซึ่งค่าทั้งสองสามารถคำนวณได้จาก

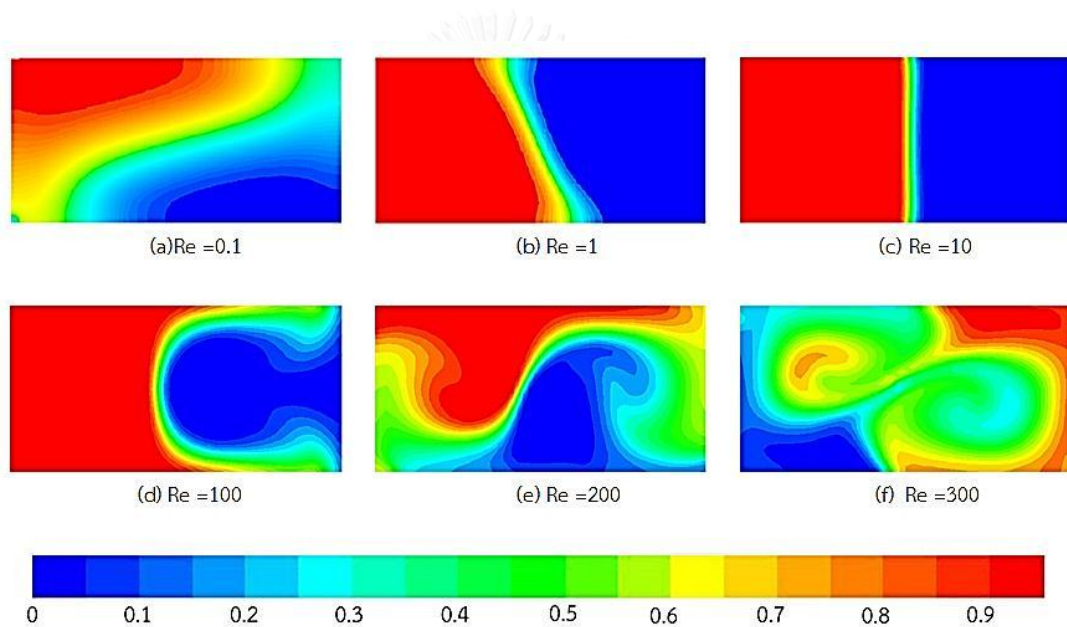
$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2 \quad (5.4)$$

$$\sigma_{\max}^2 = \bar{c}(1 - \bar{c}) \quad (5.5)$$

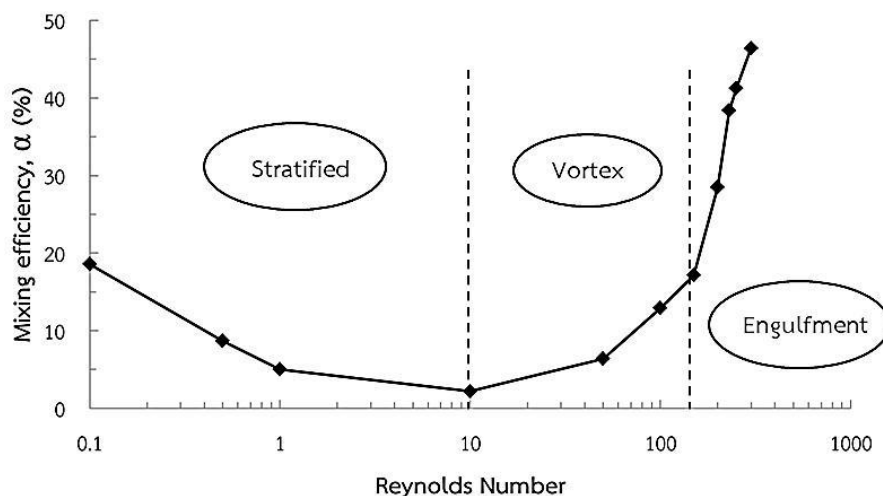
โดยที่ n คือ จำนวน node ทั้งหมดบนพื้นที่หน้าตัดที่พิจารณา

c_i คือ ความเข้มข้นของสาร ณ ตำแหน่ง i ใดๆบน พื้นที่หน้าตัดที่พิจารณา

\bar{c} คือ ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยบนพื้นที่หน้าตัดที่พิจารณา



รูปที่ 5. 4 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์
ที่ Reynolds number 0.1 - 300

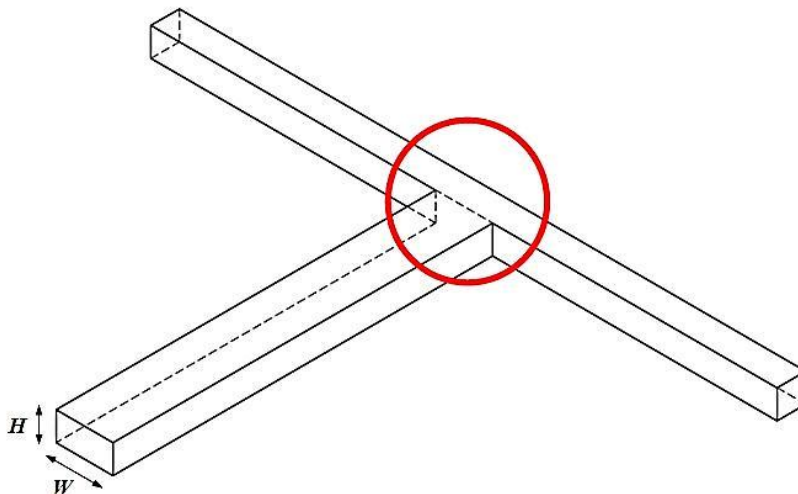


รูปที่ 5. 5 Mixing efficiency ที่ Reynolds number 0.1 – 300

รูปที่ 5.5 แสดงค่า mixing efficiency ที่เปลี่ยนแปลงตามค่า Reynolds number พบว่า ในช่วง Reynolds number 0.1 – 10 ค่า mixing efficiency มีค่าลดลง หากพิจารณาพร้อมกับรูปที่ 5.4 (a) ถึง 5.4 (c) จะเห็นว่าพฤติกรรมการไหลนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดโดยที่ค่า Reynolds number เท่ากับ 0.1 การไหลมีการแยกชั้นการไหลในลักษณะที่ของไหลทั้งสองชนิดไหลเข้าหากันแต่ยังไม่ได้ผสมกัน และเมื่อ Reynolds number เพิ่มขึ้น ของไหลทั้งสองก็ยังคงแยกชั้นกันอยู่ แต่การไหลเข้าหากันลดน้อยลง เนื่องการความเร็วที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดการแยกชั้นอย่างชัดเจน

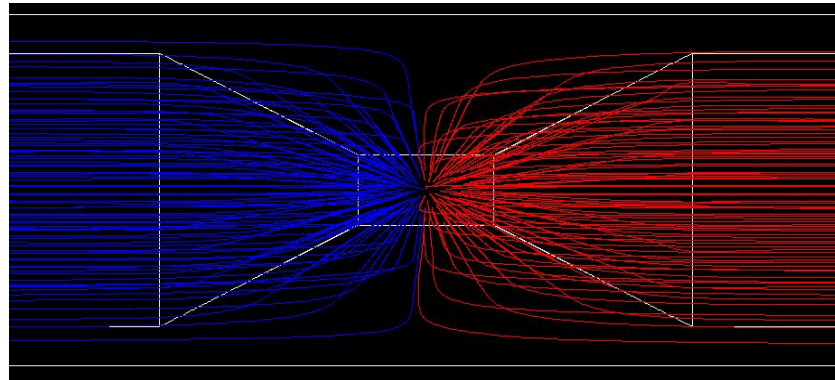
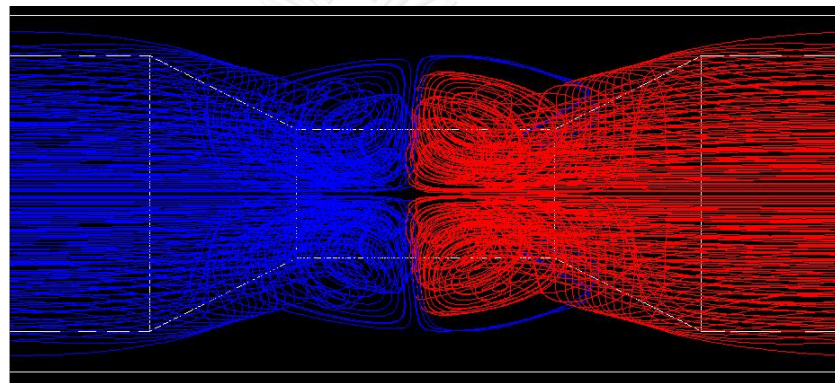
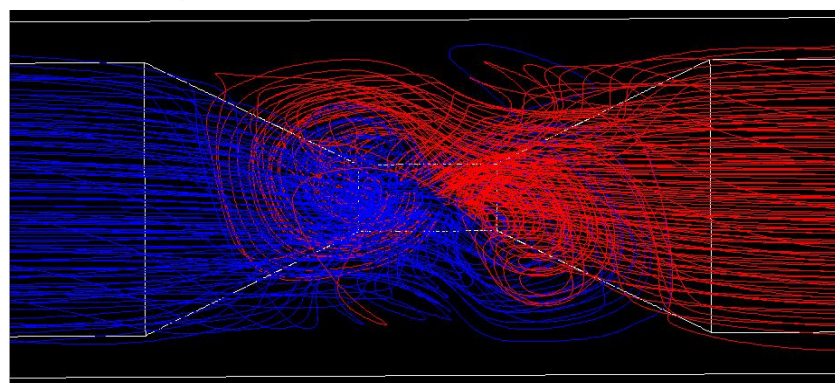
และหากพิจารณาในช่วงที่ Reynolds number เท่ากับ 10 – 150 พบว่า mixing efficiency ค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเมื่อพิจารณาประกอบกับรูปที่ 5.4 (d) พบว่าพฤติกรรมการไหลของของไหลทั้งสองเริ่มจะผสมเข้าด้วยกันเล็กน้อย จึงส่งผลให้ mixing efficiency ค่อยๆเพิ่มขึ้น

สุดท้ายในช่วง Reynolds number 150 เป็นต้นไป พบว่าค่า mixing efficiency เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.4 (e) และ 5.4 (f) ประกอบ จะเห็นได้ว่าของไหลทั้งสองผสมเข้าด้วยกันเป็นอย่างดีทำให้ค่า mixing efficiency เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้หากพิจารณารูปที่ 5.5 ดูแล้ว พบว่าสามารถแบ่งช่วงการไหลได้ 3 ช่วง โดยการแบ่งช่วงของการไหลจะพิจารณาจากลักษณะการผสมกันของของไหลบริเวณทางเข้าของ mixing channel ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.6 และ 5.7 ซึ่งผลที่ได้มีลักษณะสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bothe et al. [26] ที่สามารถแบ่งช่วงการไหลได้เป็น 3 ช่วงเช่นเดียวกัน แต่เกิดขึ้นที่ Reynolds number ต่างกัน เนื่องจากของไหลที่ศึกษาเป็นของไหลต่างชนิดกัน



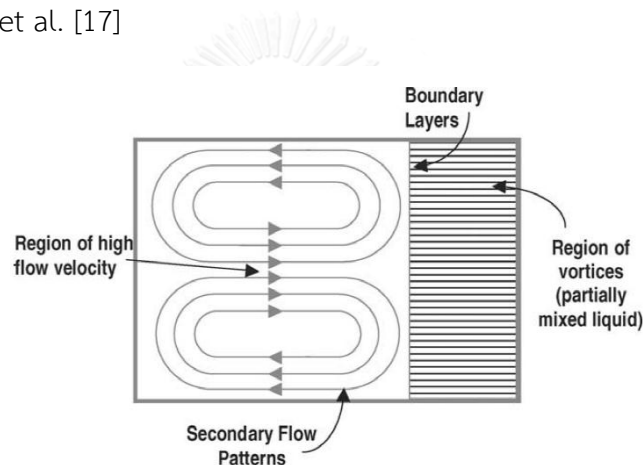
รูปที่ 5. 6 ตำแหน่งที่ใช้พิจารณาการแบ่งช่วงการไหล

ที่ค่า Reynolds number ต่ำ การไหลจะเป็นแบบ stratified flow หรือ strictly laminar คือลักษณะการไหลของเอทานอลและน้ำจะไหลแยกชั้นกันซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจน ดังแสดงรูปที่ 5.4 (a) และ 5.7 (a) ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าของไหลทั้งสองยังไม่ผสมเข้าด้วยกัน และเมื่อ Reynolds number เพิ่มขึ้นจากช่วง stratified พบว่าลักษณะการไหลเกิดการหมุนวนเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.7 (b) ซึ่งสาเหตุของการหมุนวนเกิดจากความไม่เสถียรของการไหลเนื่องมาจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal forces) ที่เกิดขึ้นจากการที่ของไหลปะทะกันบริเวณทางเข้า mixing channel ช่วงการไหลนี้จึงถูกเรียกว่า vortex flow ตามลักษณะการไหลที่เกิดขึ้น และเมื่อพิจารณาถึง mixing efficiency ที่เกิดขึ้นในช่วงการไหลนี้พบว่าค่า mixing efficiency มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากการไหลที่ยังไม่เสถียรการผสมที่เกิดขึ้นจึงให้ผลที่ยังไม่มีประสิทธิภาพมากนัก (ดังรูปที่ 5.4 (d)) และสุดท้ายคือการไหลในช่วงที่สามคือ engulfment flow เกิดขึ้นที่ค่า Reynolds number สูง โดยมีลักษณะการไหลคือเกิดการไหลแบบหมุนวนขึ้น แต่แตกต่างกับการหมุนวนในช่วง vortex flow ตรงที่ในช่วง vortex flow การหมุนวนเกิดขึ้นในตัวของตัวเอง แต่ในช่วง engulfment flow การหมุนวนที่เกิดขึ้นเกิดจากของไหลทั้งสองชนิดหมุนวนเข้าด้วยกัน ตามรูปที่ 5.7(c) ทำให้ element ของของไหลทั้งสองชนิดเข้าถึงกัน ดังรูปที่ 5.4 (e) และ 5.4 (f) จึงส่งผลให้ค่า mixing efficiency มีค่าสูงขึ้น

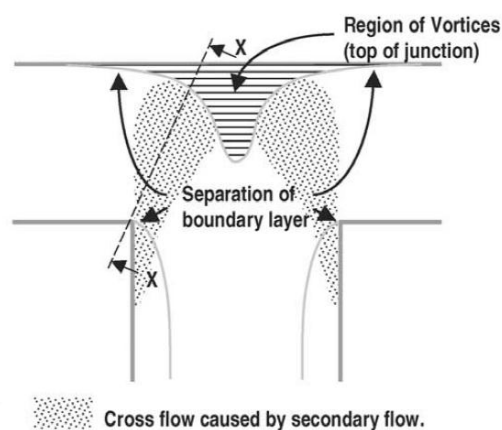
(a) $Re = 10$ (b) $Re = 100$ (c) $Re = 250$

รูปที่ 5.7 Path lines ของการไหลที่ Reynolds number ต่างๆ

สำหรับกลไกการผสมกันของของไหลที่เกิดขึ้นจากลักษณะการไหลในช่วง vortex flow และ engulfment flow นั้นเกิดจาก secondary flow ซึ่งมีพฤติกรรมไหลแบบหมุนวนที่เกิดจาก centrifugal force โดยการไหลจะเกิด vortex เป็นแบบสมมาตร โดยลักษณะการเกิด secondary flow ในไมโครมิกเซอร์แบบตัว T แสดงในรูปที่ 5.8 (a) โดยของไหลทั้งสองข้างที่ไหลเข้าจะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลภายใน mixing channel และเกิดเป็น vortex ขึ้น ซึ่งการหมุนวนนี้จะเกิดขวางการไหลตาม mixing channel และของไหลบางส่วนจะเกิดการแยกชั้นขึ้นที่บริเวณด้านบนของ mixing channel ดังแสดงในรูปที่ 5.8 (b) และในบริเวณที่เกิดการหมุนวนจะทำให้ของไหลทั้งสองชนิดเกิดการผสมกันในบริเวณนี้ และถ้าความเร็วของของไหลที่ไหลเข้ามีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ secondary flow มีขนาดใหญ่และรุนแรงขึ้น ทำให้การผสมดีขึ้น สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถศึกษาได้จาก Wong et al. [17]

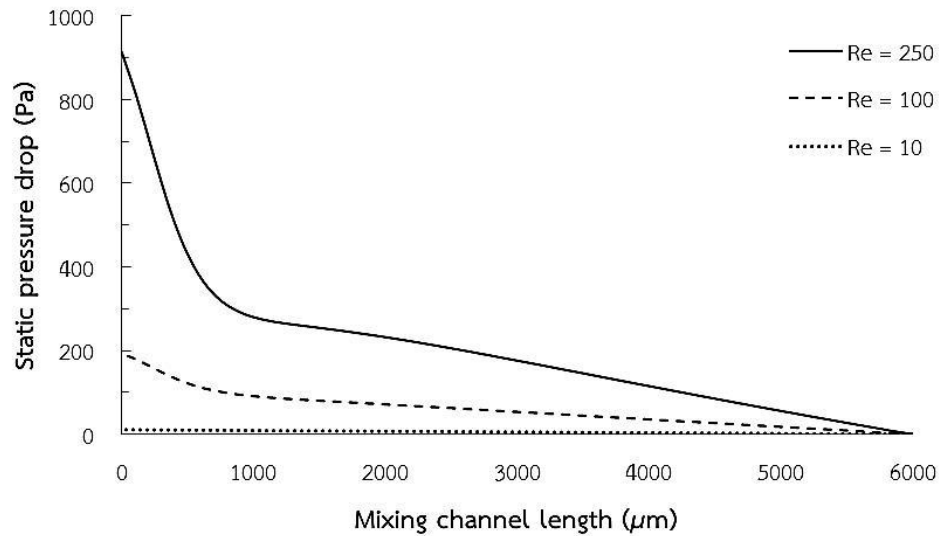


(a) Cross section x-x



(b) ลักษณะการไหลบริเวณทางเข้า mixing channel

รูปที่ 5.8 การเกิด secondary flow (Wong et al. [17])



รูปที่ 5. 9 การเปรียบเทียบความดันเฉลี่ยตลอดความยาวของ mixing channel ที่ Reynolds number ต่างๆ

สำหรับการเปลี่ยนแปลงความดันตลอดความยาวของ mixing channel จะคำนวณจากความดันเฉลี่ยในพื้นที่หน้าตัด ณ ตำแหน่งที่สนใจ และสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 5.9 พบว่าในช่วง stratified flow ($Re = 10$) ความดันมีการลดลงอย่างสม่ำเสมอในลักษณะของเส้นตรง ซึ่งนี่คือพฤติกรรมการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) และในช่วงการไหลแบบ vortex flow ($Re = 100$) พบว่าในช่วงต้นของ mixing channel ความดันมีการลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากในช่วงต้นนั้นเป็นช่วงที่ของไหลทั้งสองชนิดปะทะกันจึงทำให้การไหลยังไม่เสถียรซึ่งเกิดจากหมุนวนและเปลี่ยนทิศทางในการไหล (mixing zone) จึงส่งผลให้ความดันลดลงอย่างรวดเร็ว แต่หลังจากนั้นความดันก็ค่อยๆ ลดลงอย่างสม่ำเสมอพร้อมๆ กับการไหลค่อยๆ เปลี่ยนไปจนเป็นการไหลแบบ fully developed flow และสุดท้ายคือช่วงที่การไหลมีค่า Reynolds number มากขึ้น พบว่า mixing zone ก็มีระยะเพิ่มขึ้นเช่นกัน และความดันก็ลดลงมากกว่าในช่วง vortex flow เนื่องมาจากการไหลแบบหมุนวนมีขนาดใหญ่และรุนแรงขึ้น จึงต้องใช้ระยะการไหลเพิ่มขึ้นกว่าการไหลนั้นจะเสถียร

5.3 ผลจากการเปลี่ยนแปลง mixing channel aspect ratio ของไมโครมิกเซอร์

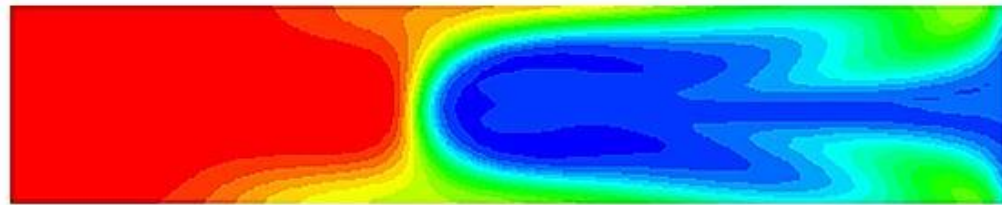
ในการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลง mixing channel aspect ratio ของไมโครมิกเซอร์ โดยค่า aspect ratio คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างความสูงของ mixing channel (H) และความกว้างของ mixing channel (W) ดังแสดงในรูปที่ 5.6 ในการศึกษานี้จะทดสอบค่า aspect ratio ในช่วง 0.2 ถึง 1.0

ในการเปลี่ยนแปลงค่า aspect ratio กำหนดให้ ความสูงของ mixing channel (H) มีค่าคงที่เท่ากับ 300 μm และทดสอบที่ค่า Reynolds number เท่ากับ 250 เนื่องจากเป็นช่วงการไหลแบบ engulfment flow ซึ่งเกิดการผสมกันของของไหลแล้วในช่วงนี้ และรูปแบบไมโครมิกเซอร์ที่ใช้เป็นไมโครมิกเซอร์รูปแบบตัว T ขนาดของไมโครมิกเซอร์สามารถดูได้จากตารางที่ 5.1

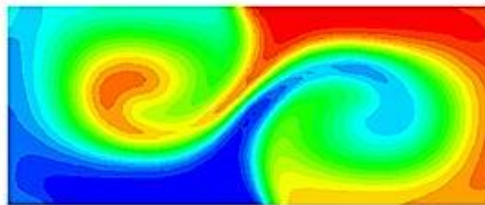
ตารางที่ 5.1 ขนาดของไมโครมิกเซอร์ที่ aspect ratio ค่าต่างๆ

Aspect ratio	H (μm)	W _{out} (μm)	d _H (μm)
0.2	300	1500	500
0.4	300	750	428.57
0.6	300	500	375
0.7	300	428.57	352.94
0.8	300	375	333.33
1.0	300	300	300

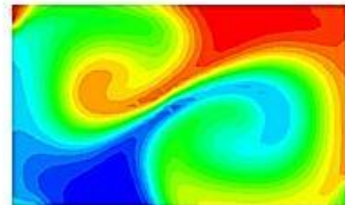
จากการจำลองแบบเชิงตัวเลข ผลที่ได้สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.10 ซึ่งแสดงผลเป็น contour plot ณ บริเวณทางออกของ mixing channel จะเห็นได้ว่าที่ aspect ratio เท่ากับ 0.2 ของไหลผสมเข้ากันได้ไม่ดีนักเพราะช่องการไหลของ mixing channel มีความกว้างมากเกินไป และหากพิจารณาจากรูปที่ 5.10 ดูแล้วจะเห็นได้ว่าที่ aspect ratio 0.6 ถึง 0.8 ของไหลทั้งสองเกิดการผสมกัน แต่ยังไม่สามารถทราบได้อย่างแน่ชัดว่าที่ aspect ratio เท่าใดให้ค่า mixing efficiency สูงที่สุด ดังนั้นจาก contour plot นี้จะนำไปคำนวณต่อโดยใช้สมการที่ (5.1) – (5.3) จะได้เป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ mixing efficiency ที่ค่า aspect ratio ต่างๆ ดังรูปที่ 5.10



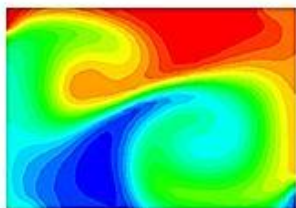
a) AR = 0.2



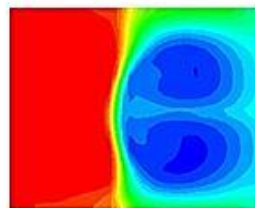
b) AR = 0.4



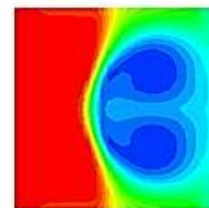
c) AR = 0.6



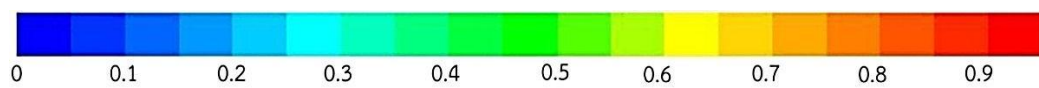
d) AR = 0.7



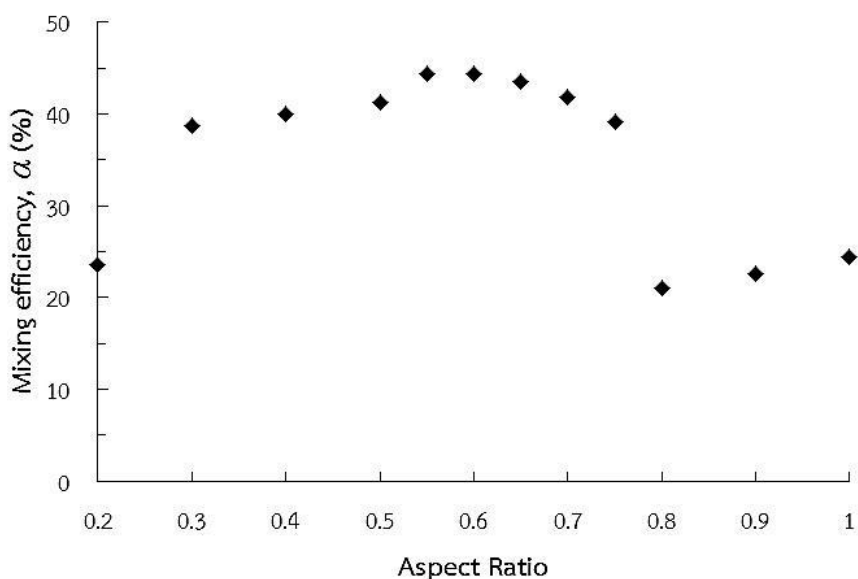
e) AR = 0.8



f) AR = 1.0

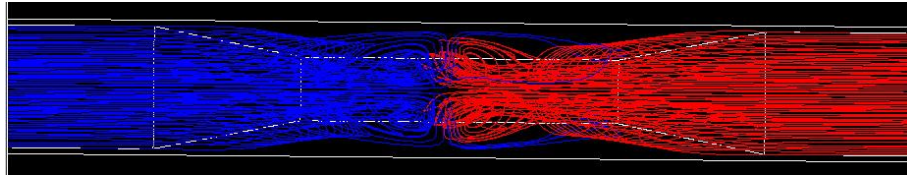


รูปที่ 5. 10 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์
ที่ aspect ratio ต่างๆ ที่ $Re = 250$

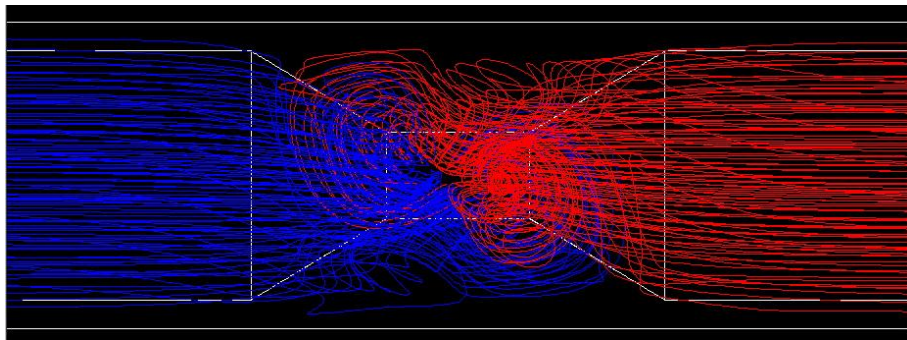


รูปที่ 5. 11 Mixing efficiency ที่ aspect ratio ต่างๆ ที่ $Re = 250$

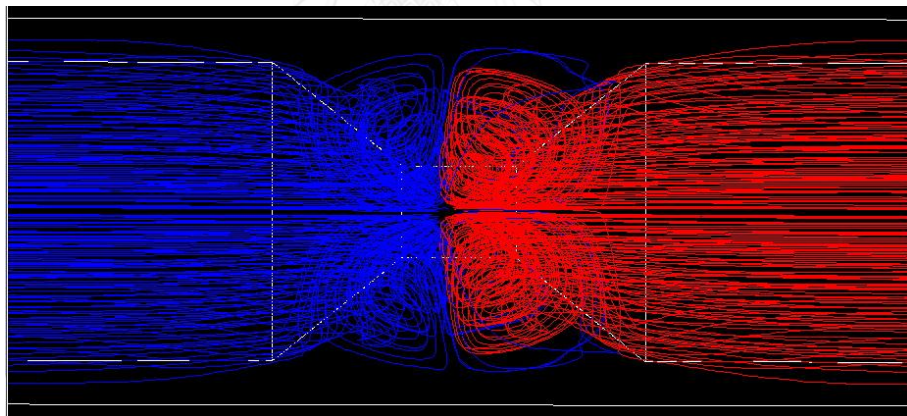
รูปที่ 5.11 แสดงค่า mixing efficiency ที่เปลี่ยนแปลงตามค่า aspect ratio ที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่า mixing efficiency สูงที่สุดเท่ากับ 44.35% เกิดขึ้นที่ค่า aspect ratio เท่ากับ 0.6 และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.9 พบว่าการเปลี่ยนแปลง aspect ratio มีผลทำให้รูปแบบการไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน โดยที่ค่า aspect ratio ต่ำ การไหลใน mixing channel จะมีรูปแบบการไหลเป็นแบบ vortex flow ดังแสดงในรูป 5.12 (a) เนื่องจากที่ค่า aspect ratio ต่ำ mixing channel จะมีพื้นที่สัมผัสมากขึ้นจึงส่งผลให้มีความเสียดทานที่ผิวมากขึ้นไปด้วย ดังนั้นแทนที่การไหลจะเป็นการไหลแบบ engulfment flow จึงเป็นการไหลแบบ vortex flow แทน ทั้งนี้จึงส่งผลให้ mixing efficiency มีค่าลดลง และเมื่อ aspect ratio เพิ่มขึ้นรูปแบบการไหลจึงเปลี่ยนเป็นการไหลแบบ engulfment flow เพราะพื้นที่ผิวนิ่งลดลงทำให้แรงเสียดทานที่ผิวนิ่งลดลงเช่นกัน จึงทำให้กระแสการไหลที่หมุนวนก่อตัวใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.12 (b) ส่งผลให้ค่า mixing efficiency สูงมากขึ้น แต่หากเพิ่มค่า aspect ratio ขึ้นไปจากค่า aspect ratio ที่ให้ค่า mixing efficiency สูงที่สุด พบว่ากระแสการไหลที่หมุนวนลดลง จนเปลี่ยนรูปแบบการไหลกลับไปเป็น vortex flow จึงส่งผลให้ mixing efficiency ลดลงเช่นกัน



(a) AR = 0.2



(b) AR = 0.6



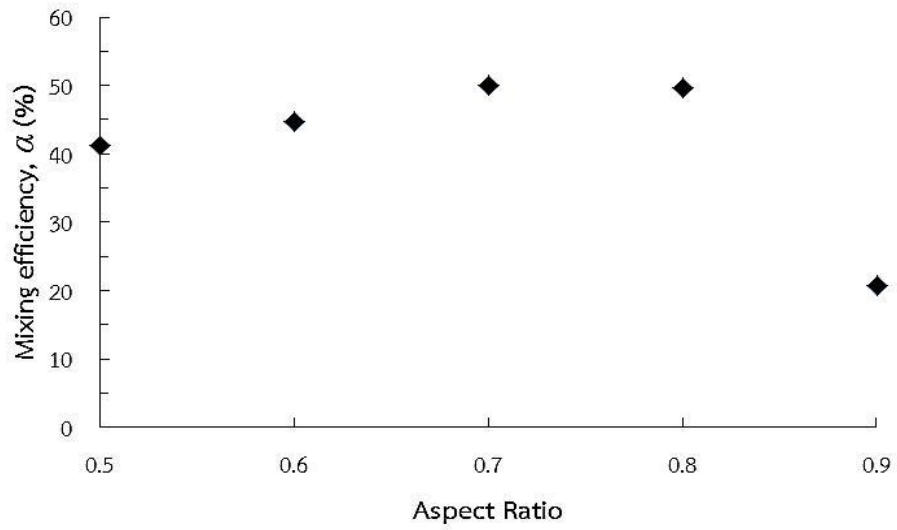
(c) AR = 0.8

รูปที่ 5. 12 Path lines ของการไหลที่ aspect ratio ต่างๆ ที่ $Re = 250$

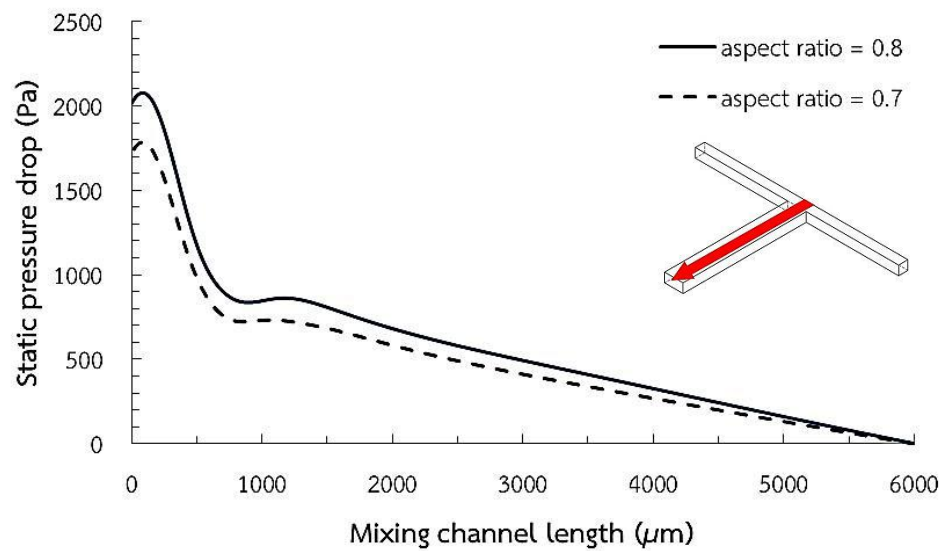
แต่เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาต้องการศึกษาพฤติกรรมการไหลผ่าน mixing channel ที่มี การเพิ่มและลดขนาดของช่องการไหล เพื่อต้องการทราบว่าช่วงของ aspect ratio เท่าใดจะให้ค่า mixing efficiency สูงที่สุด และจากการทดสอบพบว่าช่วงของ aspect ratio ที่ทำให้ค่า mixing efficiency สูงที่สุดอยู่ในช่วงระหว่าง 0.5 ถึง 0.7 ดังนั้นในการทดสอบต่อไปจะทำการกำหนดขนาด พื้นที่หน้าตัดของ mixing channel ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.18 mm^2 และช่วงของ aspect ratio ที่ใช้ คือ 0.5 ถึง 0.9 โดยที่ขนาดของไมโครมิกเซอร์ในแต่ละกรณีแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5. 2 ขนาดของไมโครมิกเซอร์ที่ aspect ratio ค่าต่างๆ
(พื้นที่หน้าตัด mixing channel = 0.18 mm^2)

Aspect ratio	H (μm)	W_{out} (μm)	d_H (μm)
0.5	300	600	400
0.6	328	549	410.65
0.7	355	507	417.6
0.8	380	475	422.22
0.9	402	448	423.75



รูปที่ 5. 13 Mixing efficiency ที่ aspect ratio 0.5 – 0.9 ที่ $Re = 250$
(พื้นที่หน้าตัด mixing channel = 0.18 mm^2)



รูปที่ 5. 14 การเปรียบเทียบความดันเฉลี่ยตลอดความยาวของ mixing channel ที่ $Re = 250$
และที่ $AR = 0.7$ และ 0.8

จากรูปที่ 5.13 แสดงค่า mixing efficiency ที่ค่า aspect ratio ต่างๆ โดยที่มีพื้นที่หน้าตัดของ mixing channel เท่ากับ 0.18 mm^2 พบว่าที่ค่า aspect ratio เท่ากับ 0.7 และ 0.8 ให้ค่า mixing efficiency ค่อนข้างสูงและมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมาก แต่เมื่อพิจารณาค่าความดันลดที่เกิดขึ้นพบว่า ที่ค่า aspect ratio 0.7 มีค่าความดันลดมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5.14 ดังนั้นค่า aspect ratio ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการศึกษานี้คือ 0.8

5.4 ผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไมโครมิกเซอร์

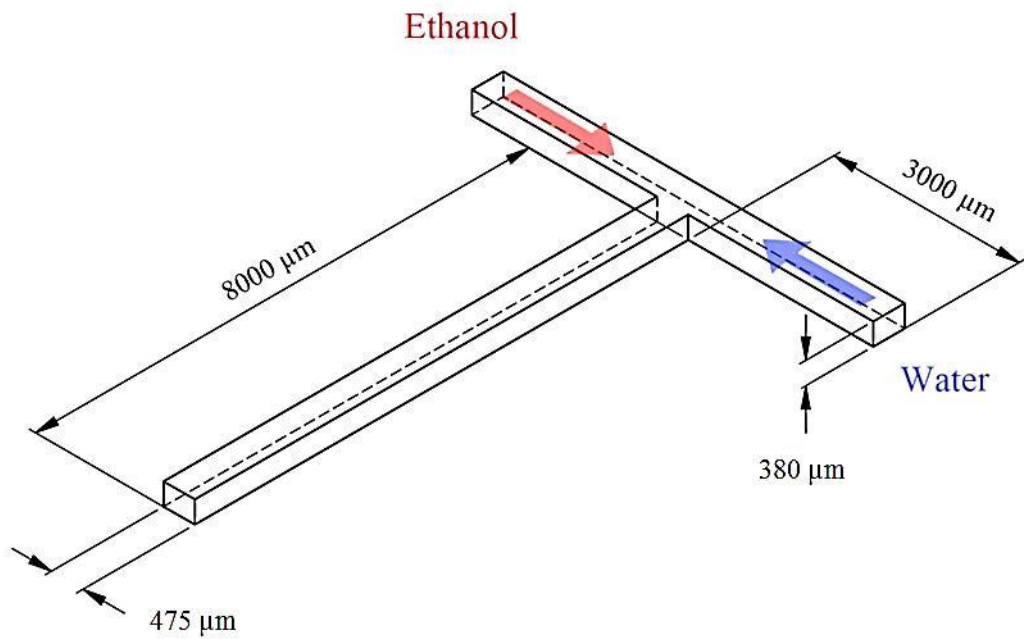
จากการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ผ่านมา พบว่าทั้งความเร็วบริเวณทางเข้าและ aspect ratio มีอิทธิพลอย่างมากต่อค่า mixing efficiency ในส่วนนี้จะทำการทดสอบโดยใช้ไมโครมิกเซอร์ที่มีรูปร่างแตกต่างกัน 4 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 5.15 – 5.18 ซึ่งข้อกำหนดของไมโครมิกเซอร์ทั้ง 4 แบบคือ มีพื้นที่ส่วนที่เป็นช่องทางไหลเข้าทั้งหมดเท่ากันทุกแบบ และจากข้อมูลการทดสอบที่ผ่านมา ในส่วนนี้จะทดสอบในช่วงของ Reynolds number เริ่มต้นที่ 250 เป็นต้นไป เพราะในช่วงนี้การไหลเป็นแบบ engulfment flow ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการผสมของของไหล และค่า aspect ratio ของ mixing channel ทั้ง 4 แบบ มีค่าเท่ากับ 0.8 ซึ่งมีขนาด $380 \times 475 \mu\text{m}^2$

ไมโครมิกเซอร์ model A มีลักษณะเป็น T-shaped เหมือนกับที่ได้ทำการทดสอบมาในตอนต้น ดังรูปที่ 5.15 และมีขนาดของช่องไหลเข้าและ mixing channel เท่ากันคือ $380 \times 475 \mu\text{m}^2$

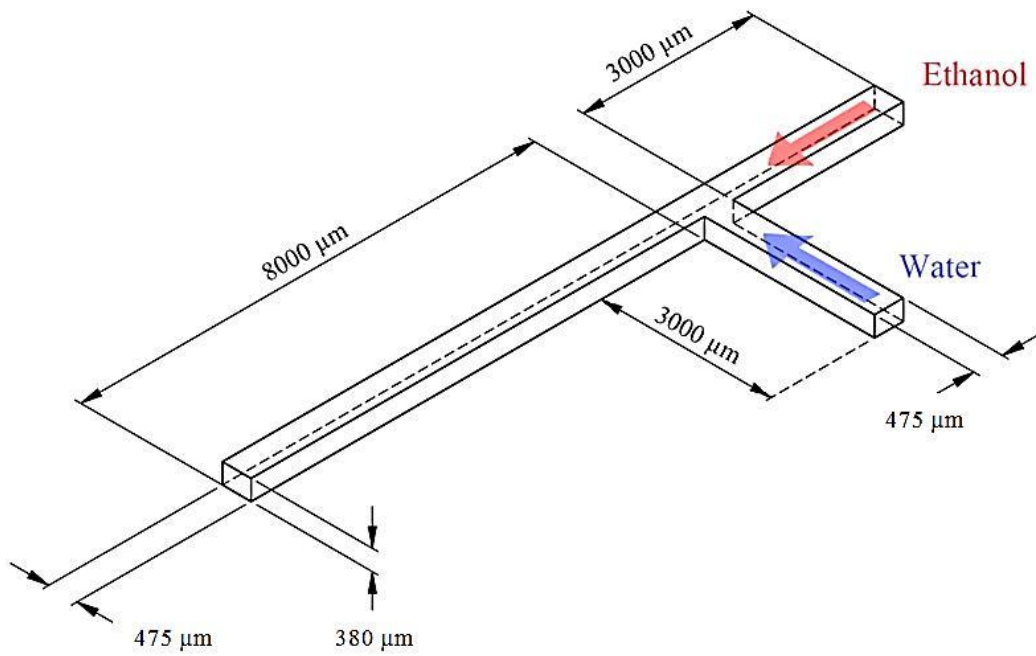
ไมโครมิกเซอร์ model B มีช่องทางไหลเข้าสองช่องเช่นกันแต่จะแตกต่างกันที่จะมีหนึ่งช่องที่ทิศทางการไหลจะไหลในแนวเดียวกับ mixing channel ส่วนขนาดของทั้งช่องทางไหลเข้าและ mixing channel จะมีขนาดเท่ากับไมโครมิกเซอร์ model A ทุกประการ ดังแสดงในรูปที่ 5.16

ไมโครมิกเซอร์ model C มีลักษณะคล้ายกับ model A แต่จะแตกต่างกันที่ช่องการไหลเข้าจะแบ่งออกเป็น 4 ช่องโดยที่ขนาดของแต่ละช่องจะมีความกว้างเป็นครึ่งหนึ่งของ model A และมีการวางตัวดังแสดงในรูปที่ 5.17 ส่วน mixing channel มีขนาดเท่ากันกับ model A และ B

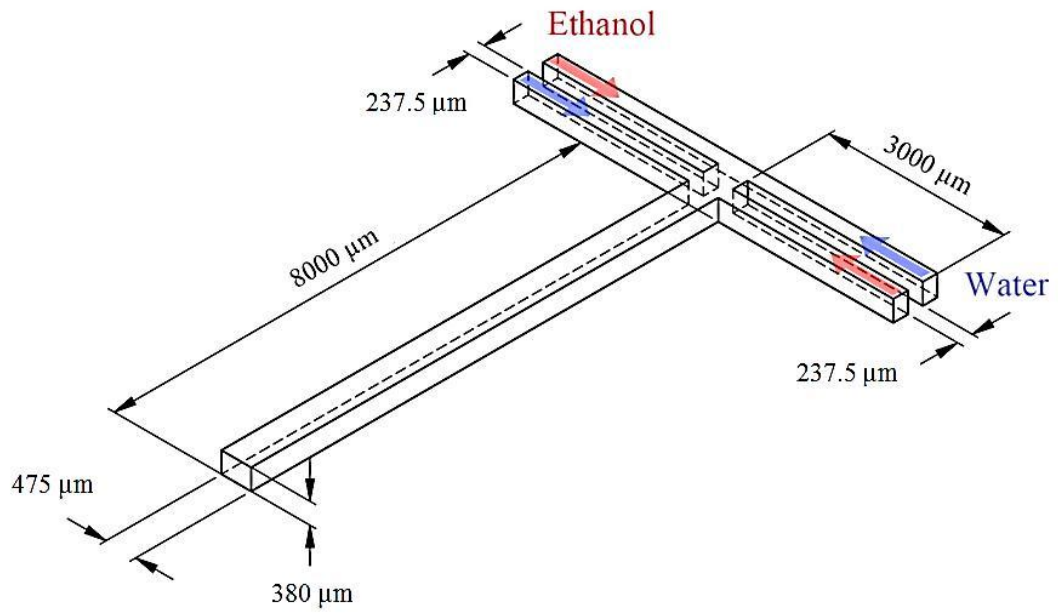
ไมโครมิกเซอร์ model D จะมีช่องไหลเข้าทั้งหมด 6 ช่อง ซึ่งแต่ละช่องมีความกว้างเป็นหนึ่งในสามของ model A และวางตัวในลักษณะเดียวกับรูปที่ 5.18 และ mixing channel มีขนาดเท่ากันกับ model A, B และ C คือ $380 \times 475 \mu\text{m}^2$



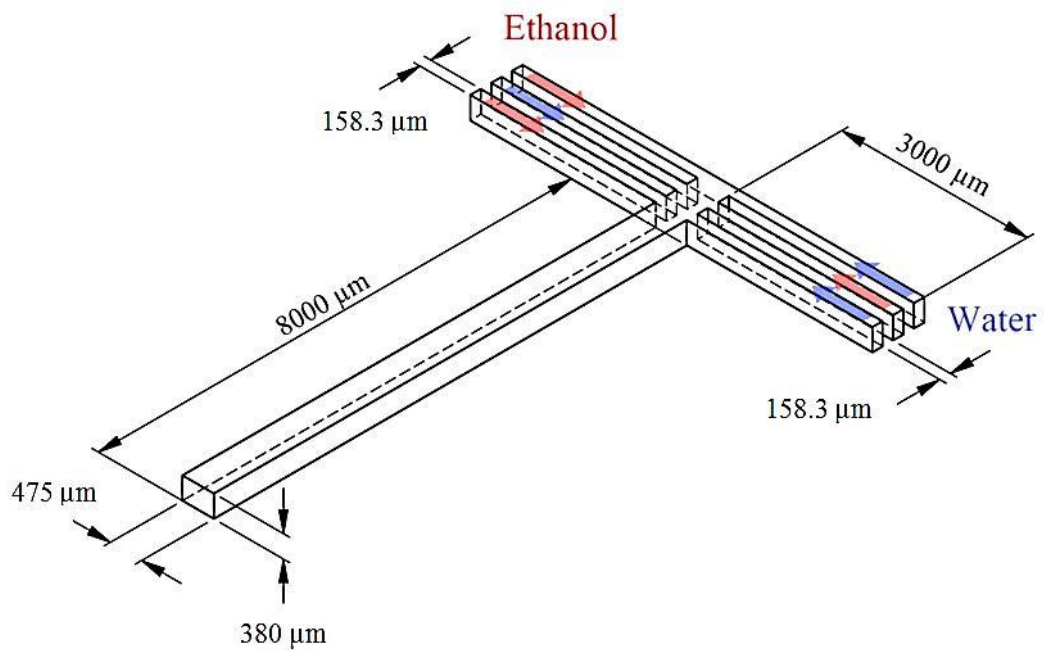
รูปที่ 5. 15 ไมโครมิกเซอร์ model A



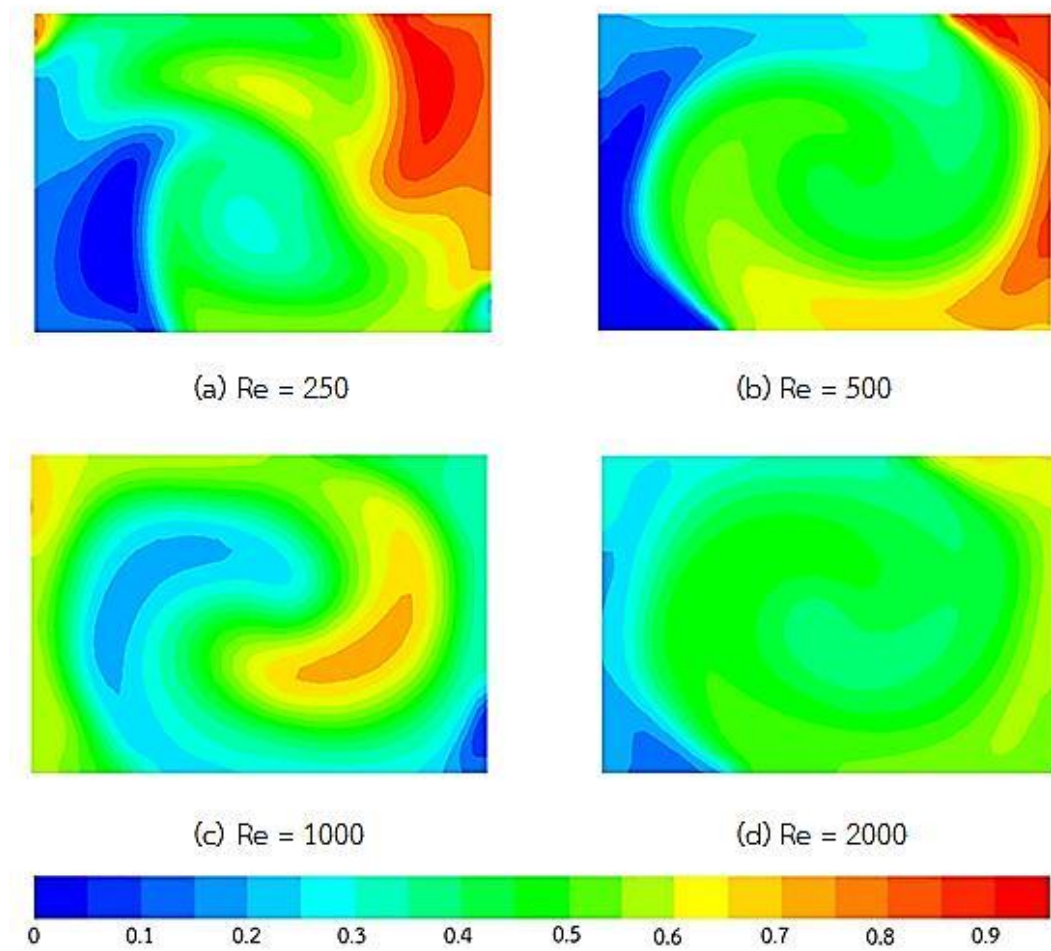
รูปที่ 5. 16 ไมโครมิกเซอร์ model B



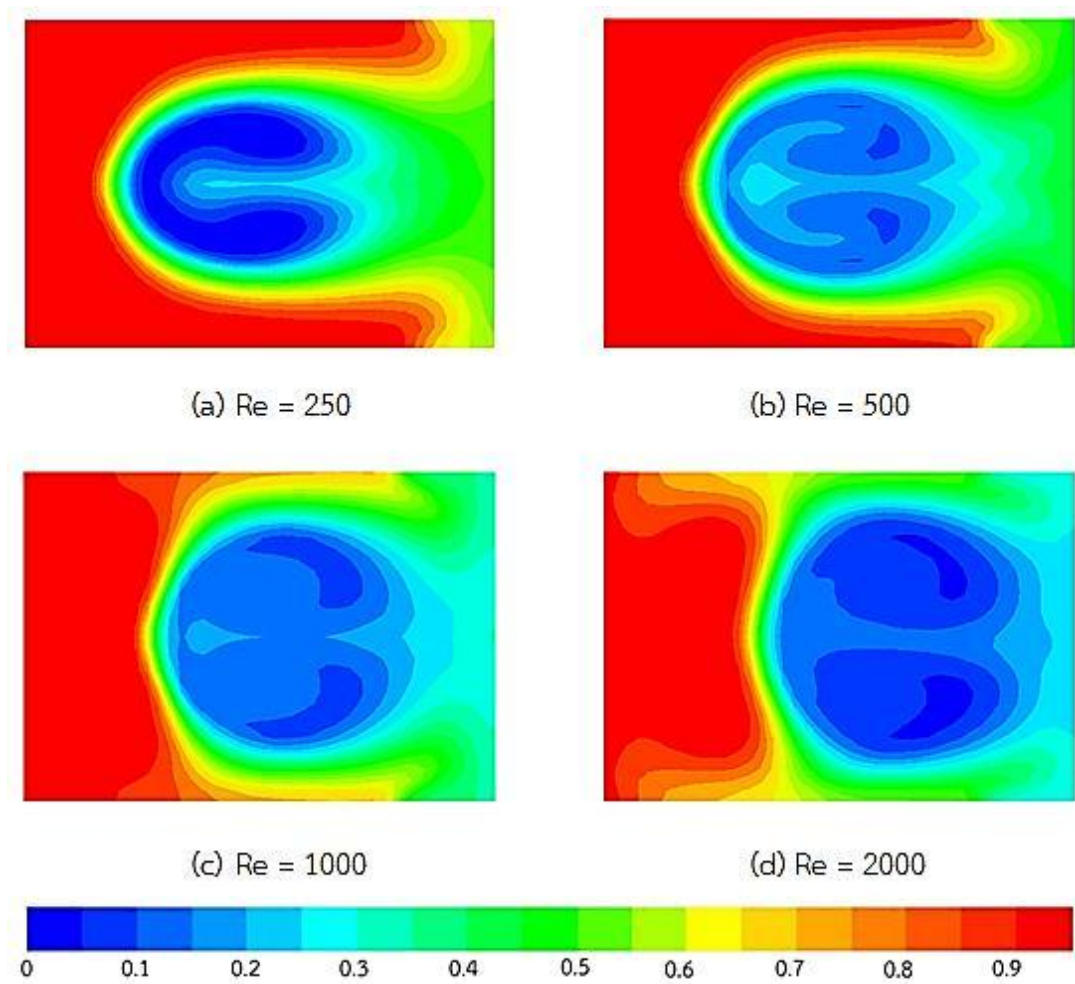
รูปที่ 5. 17 ไมโครมิกเซอร์ model C



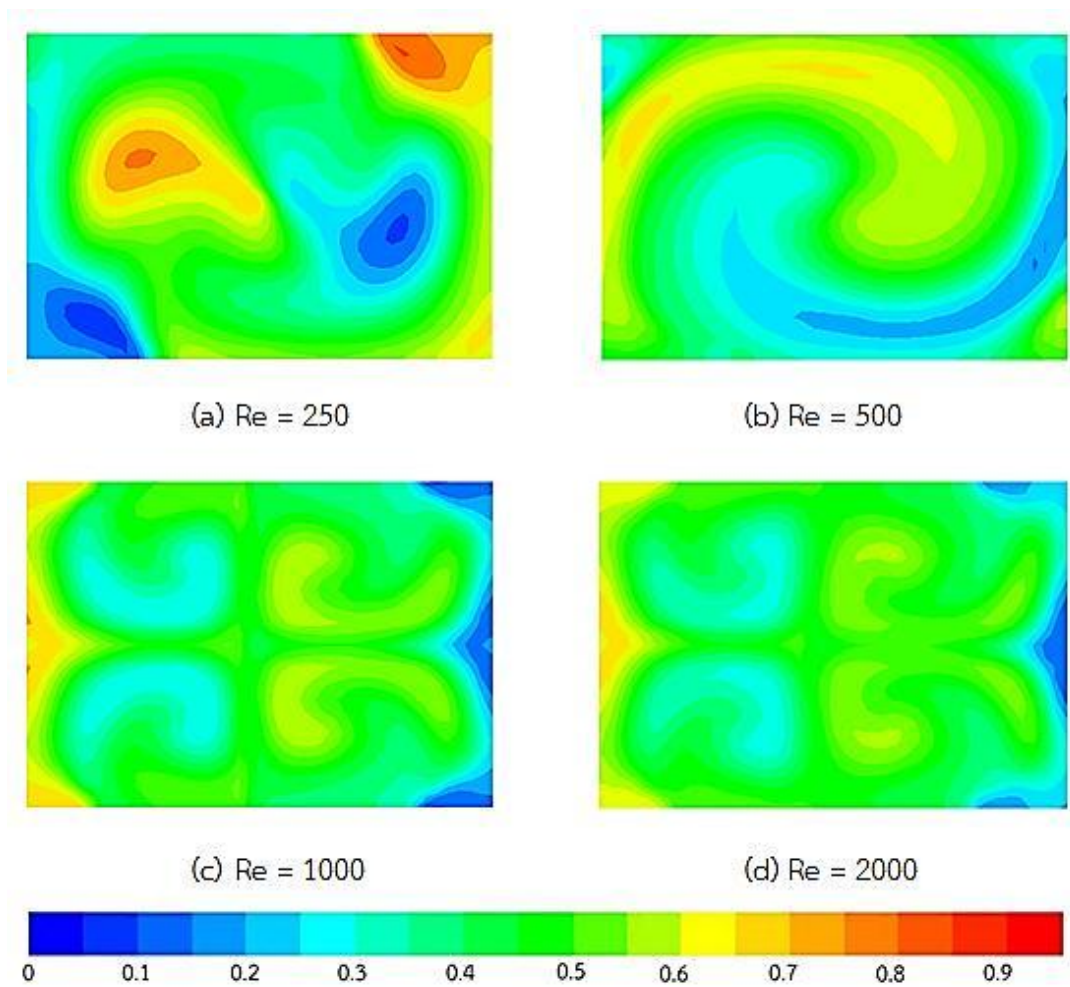
รูปที่ 5. 18 ไมโครมิกเซอร์ model D



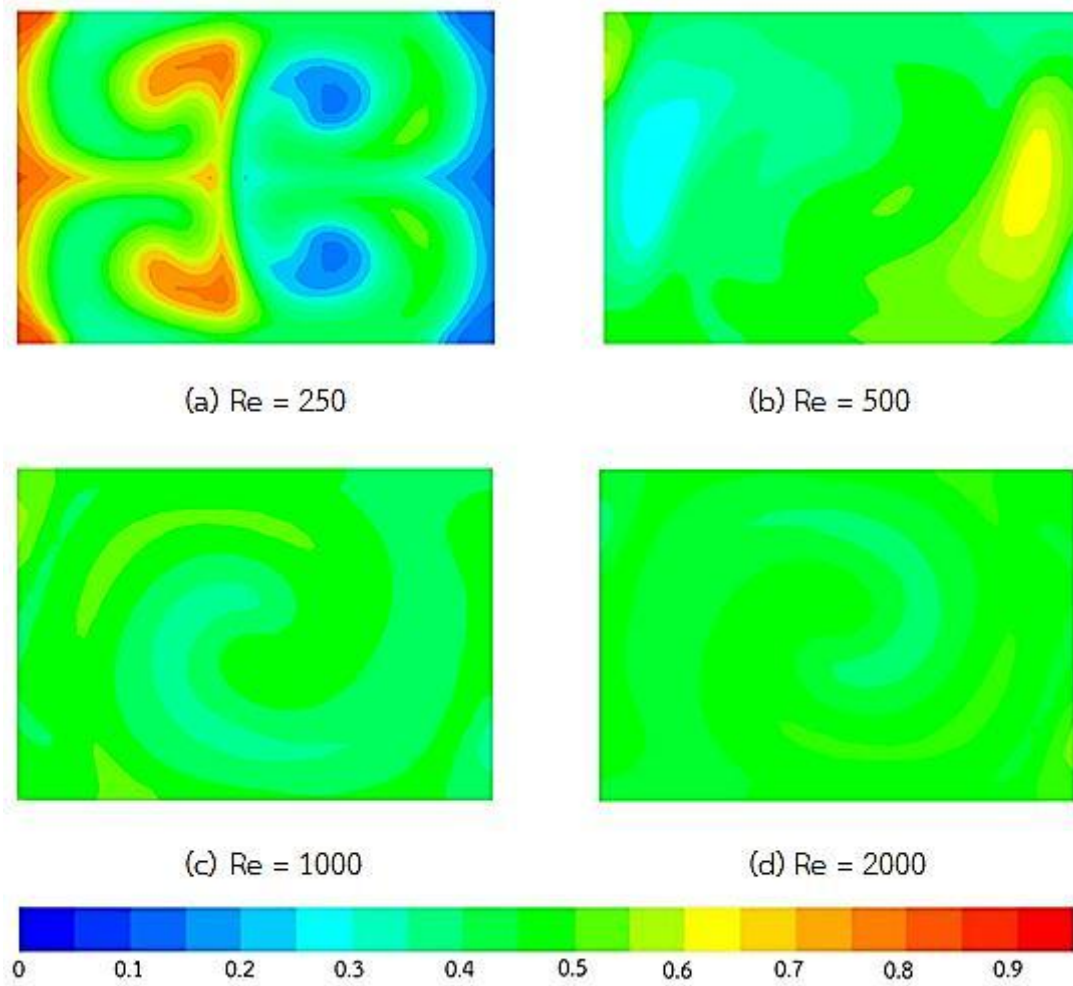
รูปที่ 5. 19 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์ model A ที่ Reynolds number 250 - 2000



รูปที่ 5. 20 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิคเซอร์ model B
ที่ Reynolds number 250 - 2000



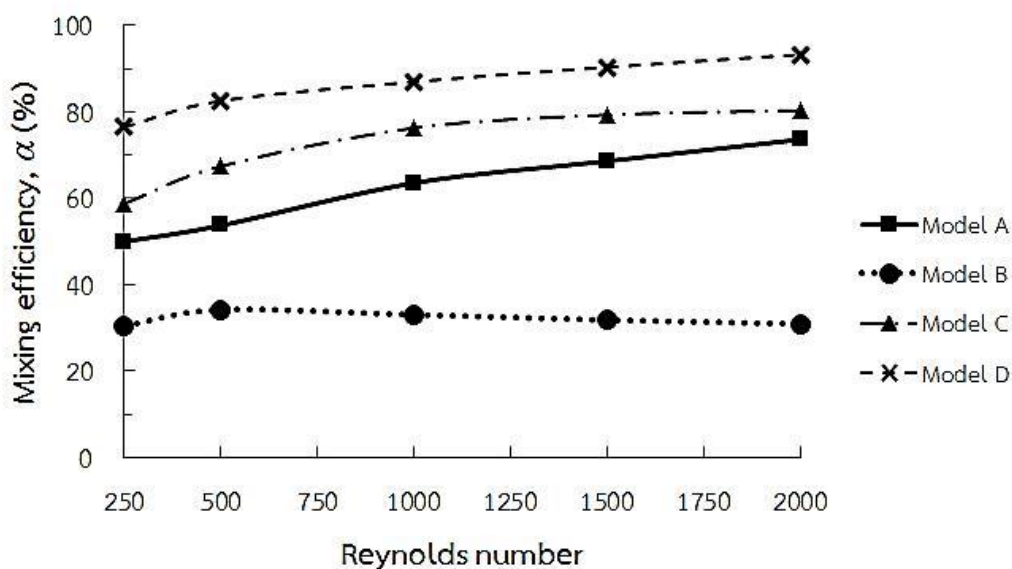
รูปที่ 5. 21 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์ model C ที่ Reynolds number 250 – 2000



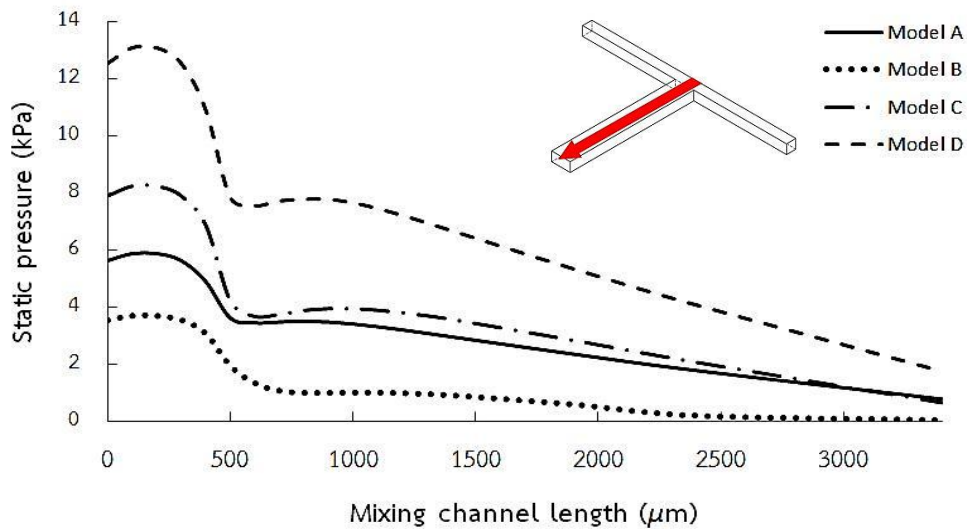
รูปที่ 5. 22 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์ model D ที่ Reynolds number 250 - 2000

รูปที่ 5.19 – 5.22 แสดง contour plot ของ ความเข้มข้นของเอทานอลและน้ำที่บริเวณทางออกของไมโครมิกเซอร์แต่ละแบบ โดยการเปลี่ยนแปลง Reynolds number สำหรับไมโครมิกเซอร์ model A จากการพิจารณารูปที่ 5.19 พบว่า เอทานอลและน้ำผสมเข้ากันดีขึ้นตาม Reynolds number ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อสังเกตพฤติกรรมการไหลจะเห็นได้ว่าการไหลเกิดการหมุนวนและเมื่อ Reynolds number เพิ่มขึ้นการหมุนวนก็จะรุนแรงขึ้น จึงส่งผลให้เอทานอลและน้ำผสมเข้ากันได้ดี และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.20 แสดงการผสมกันของไมโครมิกเซอร์ model B จะเห็นได้ว่าการผสมกันยังไม่ดีนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะการไหลเข้าของเอทานอลและน้ำมีทิศทางการไหลคนละทางกัน ถึงแม้การไหลจะมี Reynolds number สูงก็ตาม ก็ไม่ส่งผลให้การไหลเกิดการหมุนวน ดังนั้นของไหลทั้งสองจึงผสมกันไม่ได้ดี สำหรับไมโครมิกเซอร์ model C และ D สามารถดูพฤติกรรมการไหลได้จาก รูปที่ 5.21 และ 5.22 ตามลำดับ พบว่าทั้งไมโครมิกเซอร์ model C และ D สามารถผสมเอทานอลและน้ำได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะไมโครมิกเซอร์ model D และเมื่อ Reynolds number เพิ่มขึ้นการผสมก็ดีขึ้นเช่นกัน

และจาก contour plot สามารถนำข้อมูลที่ได้แสดงให้อยู่ในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลง mixing efficiency และ Reynolds number เพื่อนำไมโครมิกเซอร์ทั้ง 4 แบบมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.23



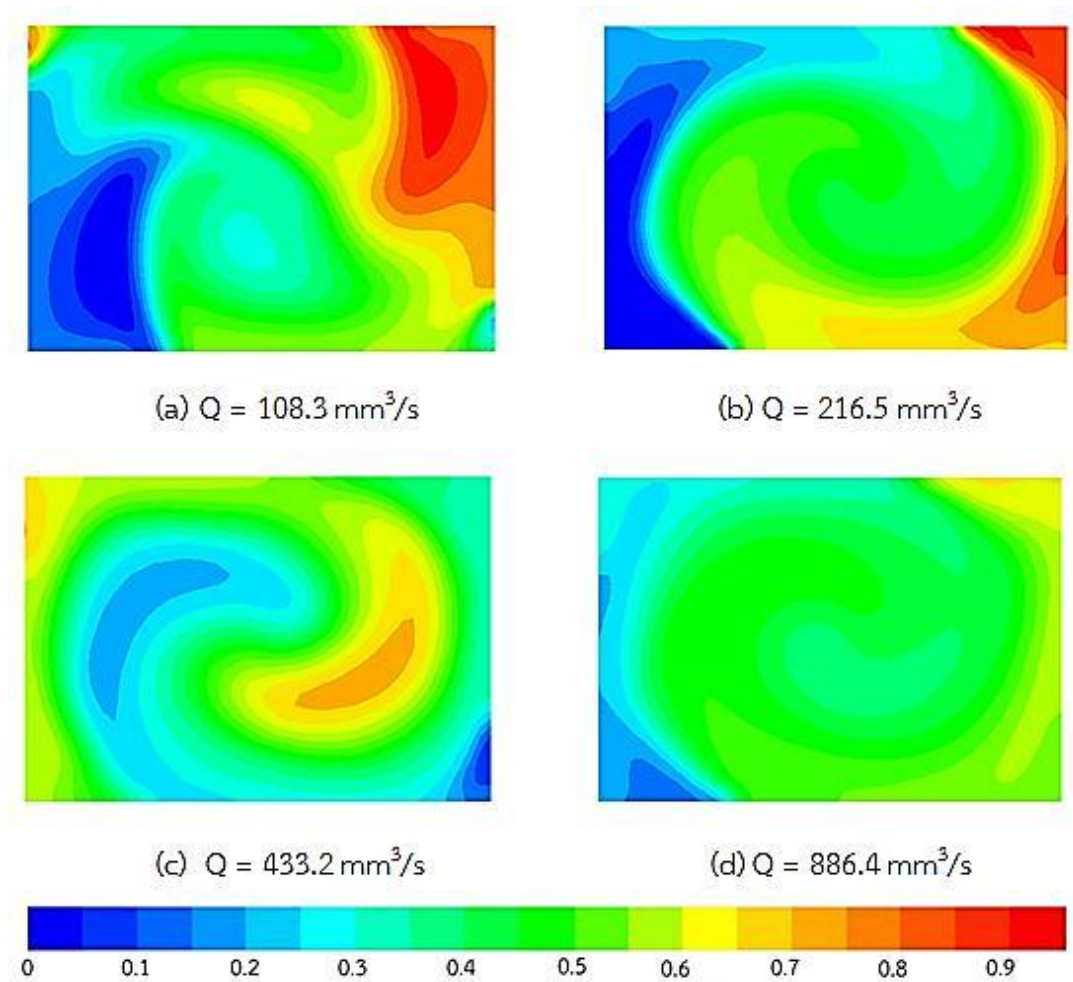
รูปที่ 5. 23 Mixing efficiency ของไมโครมิกเซอร์ทั้ง 4 รูปแบบ ที่ Reynolds number ต่างๆ



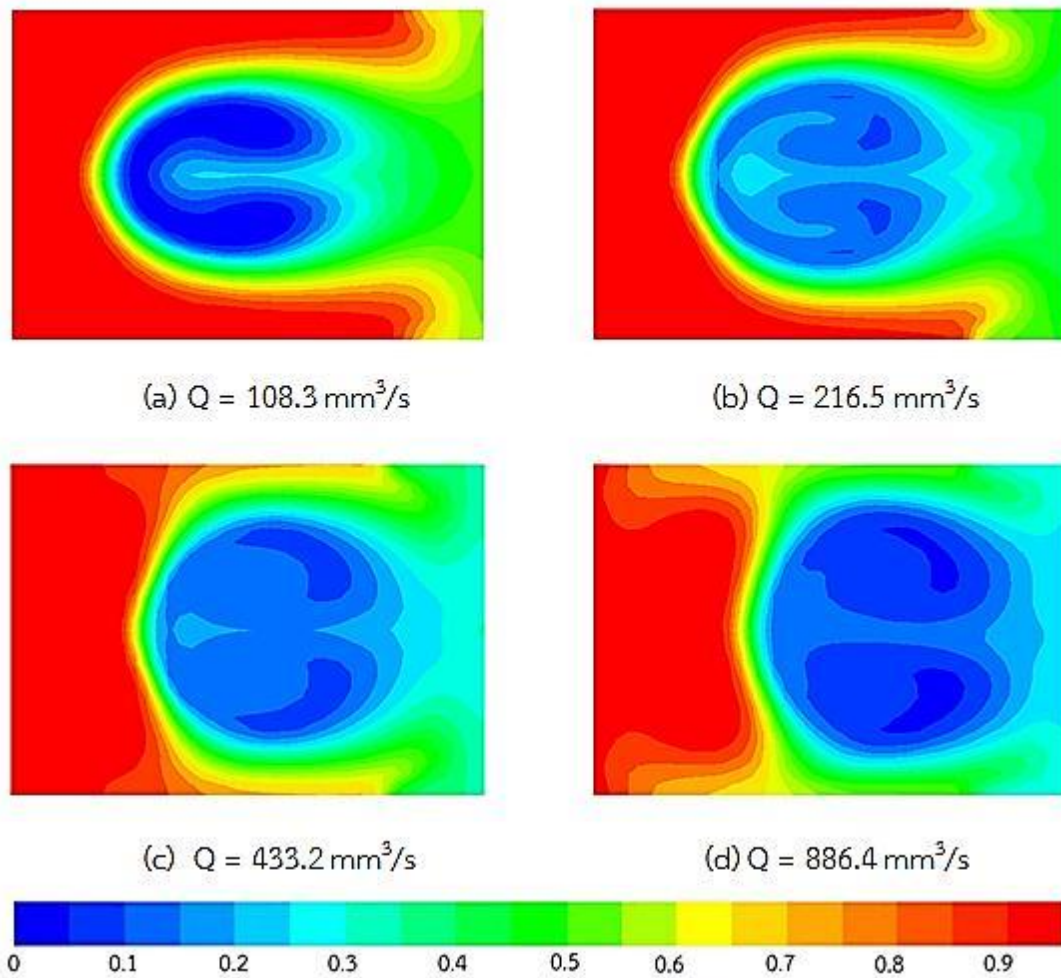
รูปที่ 5. 24 ความดันเฉลี่ยตลอดความยาวของไมโครมิกเซอร์ทั้ง 4 รูปแบบ ที่ $Re = 500$

จากรูปที่ 5.23 แสดงผลการเปรียบเทียบ mixing efficiency ของไมโครมิกเซอร์ทั้ง 4 รูปแบบที่ค่า Reynolds number ต่างๆ พบว่าไมโครมิกเซอร์ model B มี mixing efficiency ต่ำที่สุด และ model D มี mixing efficiency สูงที่สุด แต่หากพิจารณาค่าความดันลดที่เกิดขึ้น ในรูปที่ 5.24 พบว่า model D มีค่าความดันลดมากที่สุด เนื่องจากช่องทางไหลเข้าของไมโครมิกเซอร์มีขนาดเล็ก และเมื่อของไหลที่มี Reynolds number สูงไหลผ่าน ทำให้เกิดแรงดันสูง ดังนั้นไมโครมิกเซอร์ model D จึงมีความดันลดเกิดขึ้นมากที่สุด แต่ลักษณะของความดันลดที่เกิดขึ้นในไมโครมิกเซอร์แต่ละแบบพบว่าแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือความดันในช่วงแรกของ mixing channel มีความแปรปรวนและเพิ่มขึ้นสูง ซึ่งเกิดจากของไหลทั้งสองข้างเข้ามาปะทะกันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลใน mixing channel แต่เมื่อการไหลเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ ความดันก็ค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง และจากข้อมูลดังกล่าวจึงยังไม่สามารถสรุปได้ว่าไมโครมิกเซอร์รูปแบบใดมีความเหมาะสมมากที่สุด

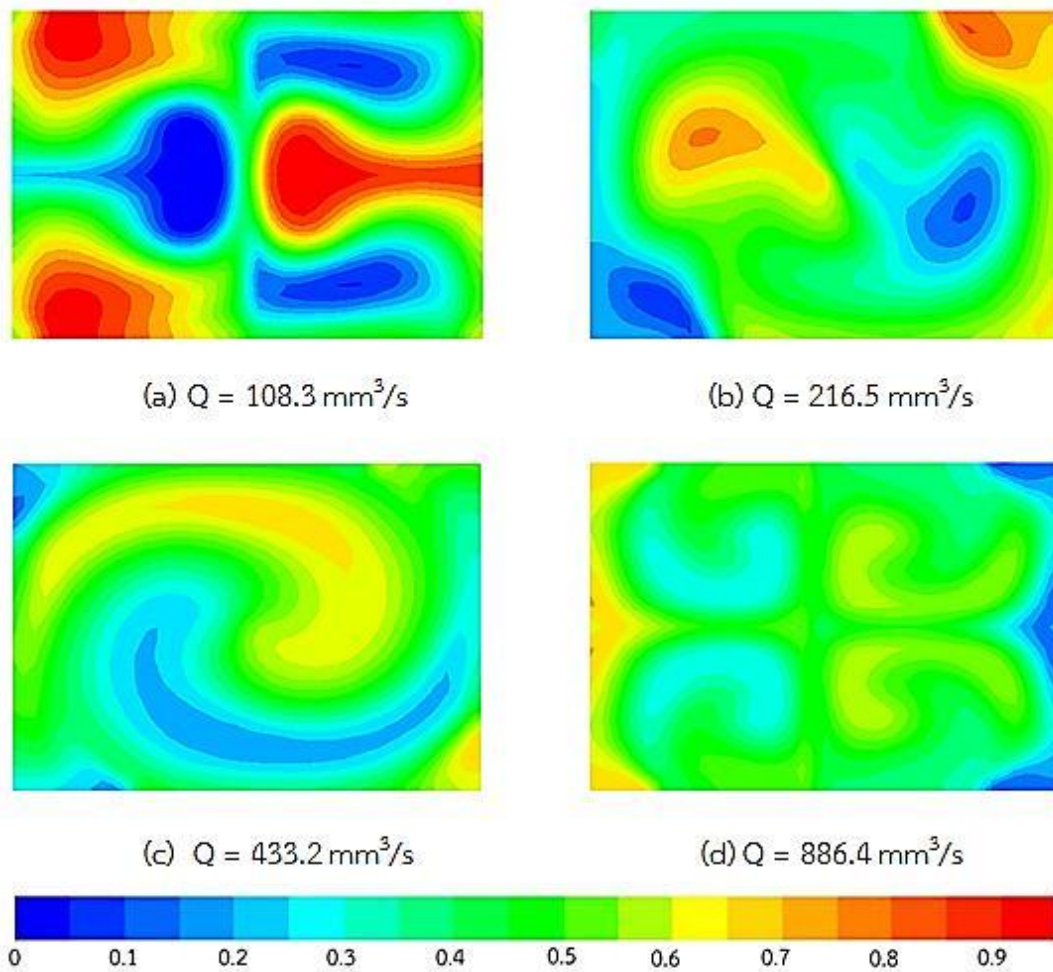
แต่เนื่องจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า mixing efficiency ของไมโครมิกเซอร์ทั้ง 4 แบบ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า Reynolds number นั้น หากพิจารณาแล้วพบว่าปริมาณของเหลวที่ไหลผ่านไมโครมิกเซอร์ทั้ง 4 แบบ มีปริมาณไม่เท่ากัน เนื่องจาก model C และ D มีทางเข้าของของไหลมากกว่า 2 ช่อง แต่ในการพิจารณาค่า Reynolds number จะคำนวณจากทางเข้าเพียงช่องเดียว เพราะฉะนั้นปริมาณของของไหลใน model C และ D จะมีปริมาณมากกว่า model A และ B ดังนั้นการทดสอบต่อไปจะทดสอบการเปลี่ยนแปลง mixing efficiency โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล (volume flow rate) แทน ซึ่งพฤติกรรมของการไหลที่ผ่านไมโครมิกเซอร์แบบต่างๆ สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.25 ถึง 5.28 ดังนี้



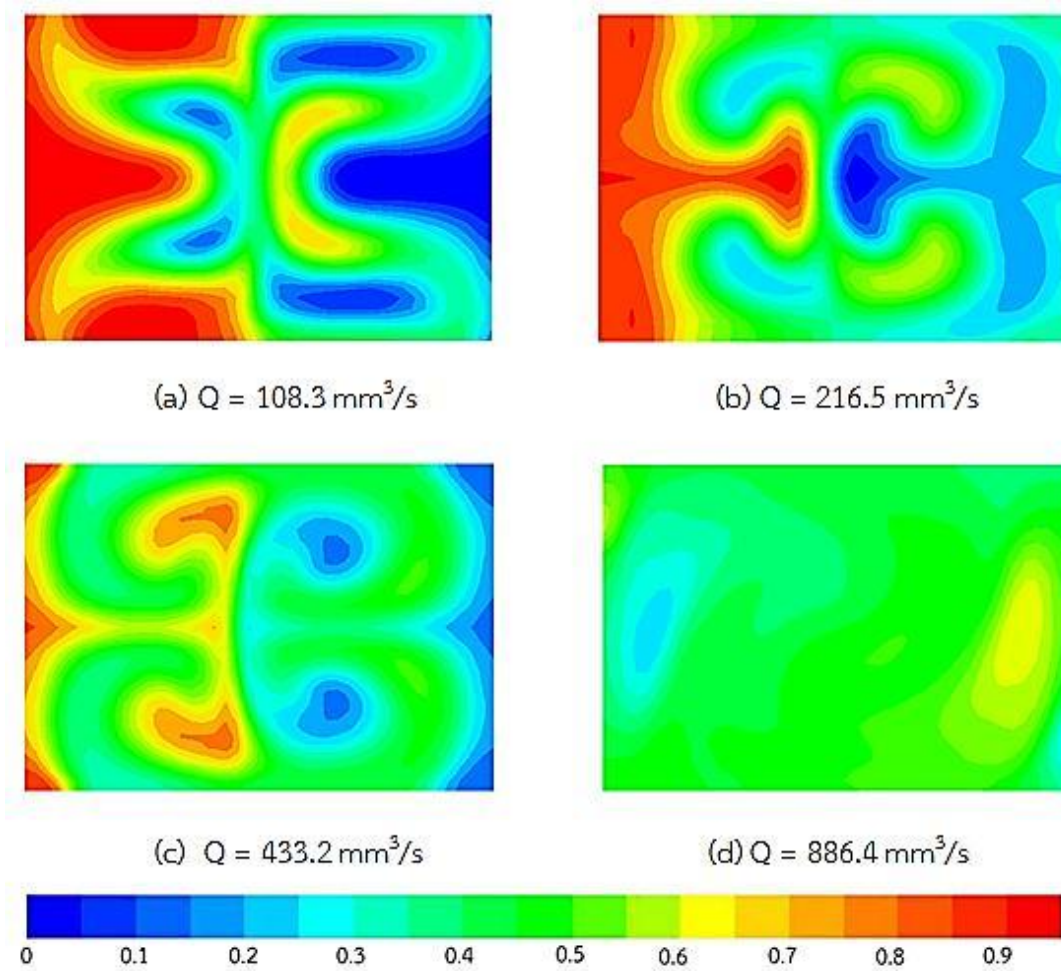
รูปที่ 5. 25 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์ model A ที่อัตราการไหล 108.3 – 886.4 mm^3/s



รูปที่ 5. 26 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิคเซอร์ model B ที่อัตราการไหล $108.3 - 886.4 \text{ mm}^3/\text{s}$

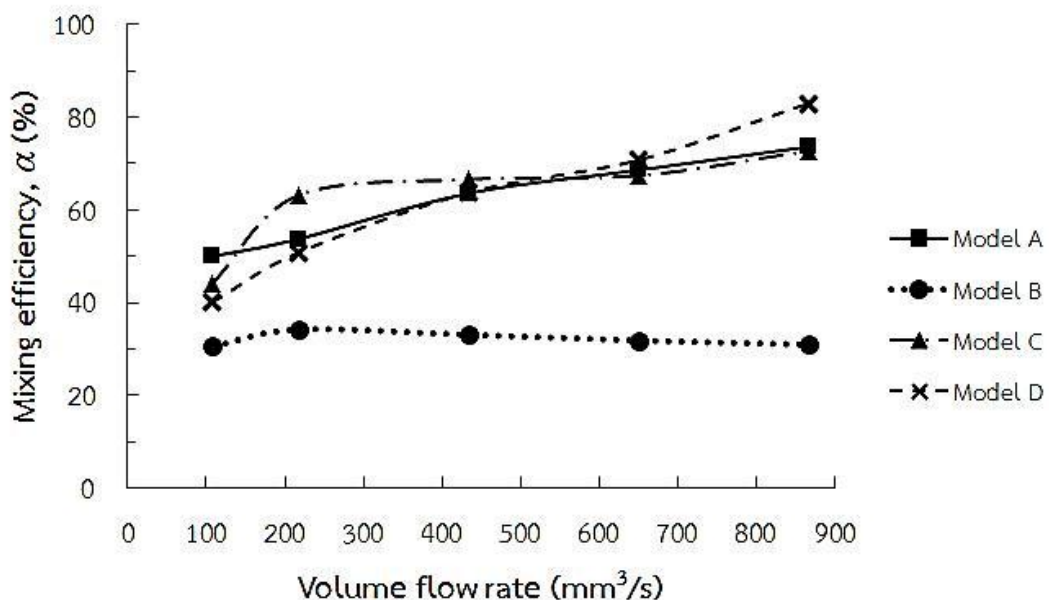


รูปที่ 5. 27 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์ model C ที่อัตราการไหล 108.3 – 886.4 mm^3/s

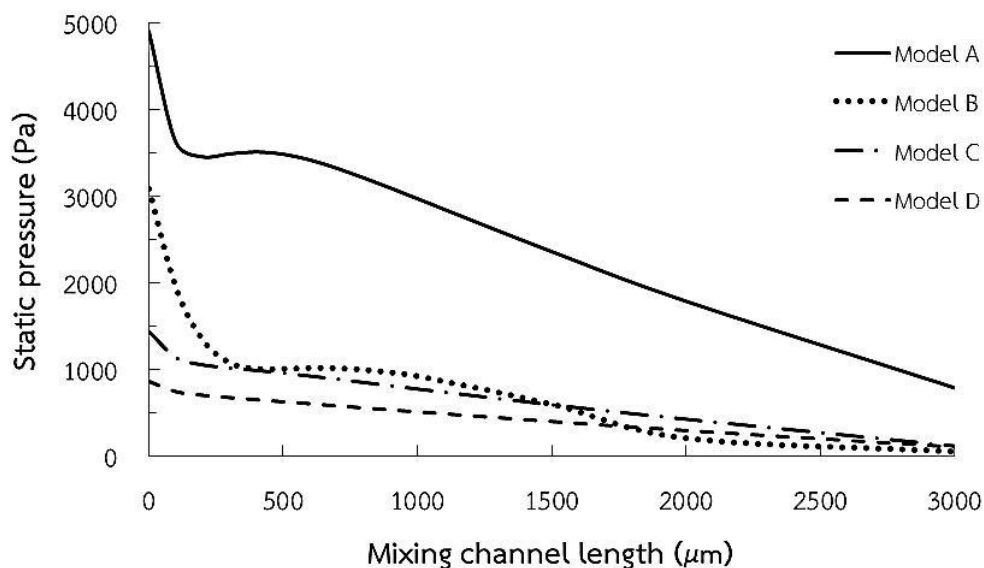


รูปที่ 5. 28 Ethanol-water contour plot ณ พื้นที่หน้าตัดทางออกของไมโครมิกเซอร์ model D ที่อัตราการไหล 108.3 – 886.4 mm^3/s

รูปที่ 5.25 – 5.28 แสดง contour plot ของ ความเข้มข้นของเอทานอลและน้ำที่บริเวณทางออกของไมโครมิกเซอร์แต่ละแบบ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล (Q) สำหรับไมโครมิกเซอร์ model A และ B จะสังเกตเห็นว่าพฤติกรรมกรไหลจะเหมือนกันกับการเปลี่ยนแปลง Reynolds number (รูปที่ 5.25 และ 5.26) เนื่องจากที่ Reynolds number 250, 500, 1000 และ 2000 สามารถแปลงค่าให้เป็นอัตราการไหลได้เท่ากับ 108.3, 216.5, 433.2 และ 886.4 mm³/s ตามลำดับ ดังนั้นพฤติกรรมกรไหลจึงมีลักษณะเหมือนเดิม แต่สำหรับไมโครมิกเซอร์ model C และ D จะแตกต่างกันไปจากเดิมเนื่องจากในการพิจารณาอัตราการไหลจะพิจารณาอัตราการไหลโดยรวม แต่ไมโครมิกเซอร์ทั้งสองแบบมีช่องกรไหลมากกว่า model A และ B ดังนั้นอัตราการไหลจึงถูกแบ่งไปในแต่ละช่องกรไหลเข้าในอัตราส่วนเท่าๆกัน และเมื่อพิจารณาพฤติกรรมกรไหลแล้วพบว่า จากรูปที่ 5.27 พฤติกรรมกรไหลที่ไหลผ่านไมโครมิกเซอร์ model C มีการผสมกันดีขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งยังมีลักษณะการไหลแบบหมุนวนเกิดขึ้น ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 5.28 แต่จากรูปยังไม่สามารถตัดสินได้ว่าไมโครมิกเซอร์รูปแบบใดสามารถผสมของไหลได้ดีที่สุด จึงนำข้อมูลทั้งหมดไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลง mixing efficiency และอัตราการไหล ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.29

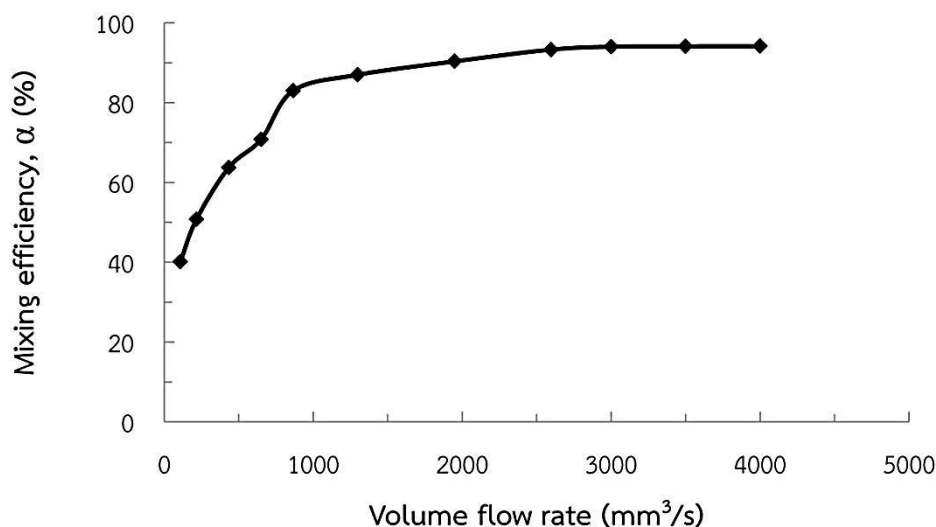


รูปที่ 5. 29 Mixing efficiency ของไมโครมิกเซอร์ทั้ง 4 รูปแบบ ที่อัตราการไหลต่างๆ



รูปที่ 5.30 ความดันเฉลี่ยตลอดความยาวของไมโครมิกเซอร์ทั้ง 4 รูปแบบ
ที่อัตราการไหล = $216.5 \text{ mm}^3/\text{s}$

รูปที่ 5.29 แสดงผลการเปลี่ยนแปลง mixing efficiency เมื่ออัตราการไหลเปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่อพิจารณาภาพโดยรวม ไมโครมิกเซอร์ model A,C และ D มี mixing efficiency อยู่ระดับสูงใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจจะมีบางช่วงอัตราการไหลที่สามารถทำงานได้ดีแตกต่างกันไป เช่น ในช่วงอัตราการไหลประมาณ $100 - 500 \text{ mm}^3/\text{s}$ ไมโครมิกเซอร์ model C ให้ค่า mixing efficiency มากที่สุด แต่ในช่วงอัตราการไหลประมาณ $550 \text{ mm}^3/\text{s}$ เป็นต้นไป ไมโครมิกเซอร์ model D มี mixing efficiency สูงที่สุด แต่สุดท้ายหากพิจารณาค่าความดันลดที่เกิดขึ้นจากไมโครมิกเซอร์ทั้ง 4 รูปแบบแล้ว จากรูปที่ 5.30 พบว่าไมโครมิกเซอร์ model D มีความดันลดต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากไมโครมิกเซอร์ model D มีช่องทางไหลเข้ามากกว่ารูปแบบอื่น นั่นแสดงว่าความเร็วของของไหลที่ไหลเข้าจึงมีความเร็วไม่มาก ทำให้ความดันลดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าไมโครมิกเซอร์รูปแบบอื่น ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า ไมโครมิกเซอร์ model D เป็นไมโครมิกเซอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการศึกษานี้ ซึ่งสามารถให้ค่า mixing efficiency สูงที่สุด

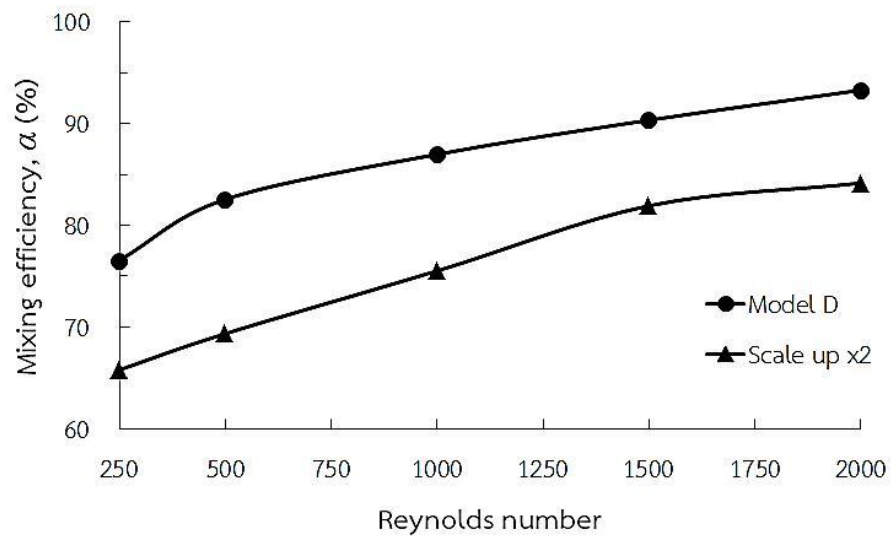


รูปที่ 5. 31 Mixing efficiency ของไมโครมิกเซอร์ model D ที่อัตราการไหลต่างๆ

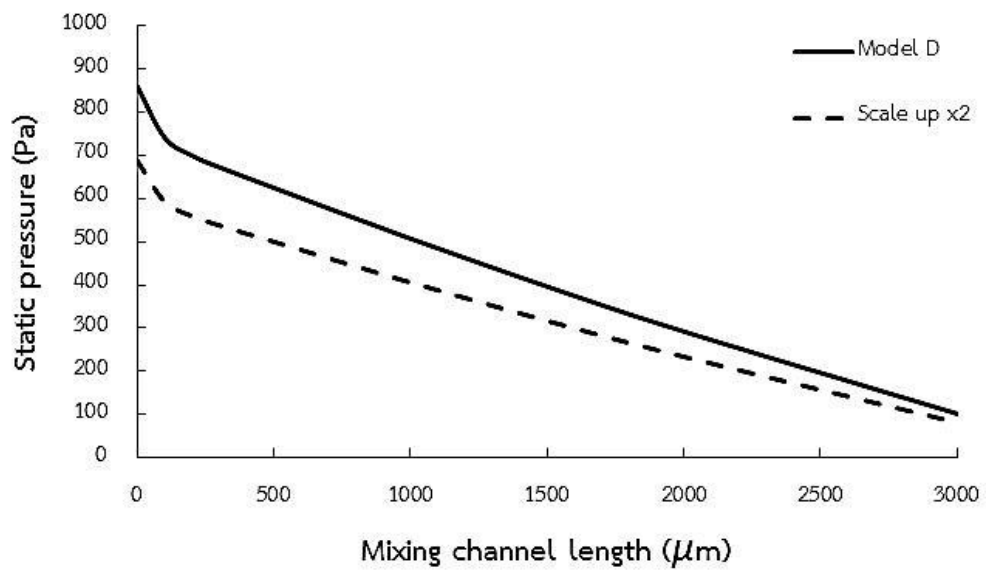
รูปที่ 5.31 แสดงผลการเปลี่ยนแปลง mixing efficiency ของไมโครมิกเซอร์ model D เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น พบว่าในช่วงแรกของการเปลี่ยนแปลงที่อัตราการไหลต่ำกว่า 1000 mm³/s มีการเปลี่ยนแปลงของ mixing efficiency ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่การไหลเริ่มเข้าสู่ช่วง engulfment flow ดังนั้นการไหลแบบหมุนวนจึงเกิดขึ้นและมีความรุนแรงเพราะการไหลยังไม่คงตัว แต่เมื่ออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้น ตั้งแต่ค่าประมาณ 1500 mm³/s เป็นต้นไปการไหลก็เริ่มที่จะเข้าสู่สภาวะการไหลแบบคงตัว จนท้ายที่สุดสามารถให้ค่า mixing efficiency ได้มากที่สุด ประมาณ 94%

5.5 การเปรียบเทียบผลของการ Scale up

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบเพื่อหาไมโครมิกเซอร์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการศึกษานี้แล้ว พบว่าไมโครมิกเซอร์ model D มีประสิทธิภาพมากที่สุด และอีกหนึ่งปัจจัยที่จะเป็นตัวบ่งบอกให้ได้ทราบว่าเทคโนโลยี micro scale นั้นสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าหรือไม่ นั่นก็คือการขยายขนาดของ ไมโครมิกเซอร์แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกัน ในการทดสอบนี้จะใช้ไมโครมิกเซอร์ model D และไมโครมิกเซอร์ model D ที่ขยายขนาดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า และจะทดสอบในช่วง Reynolds number ตั้งแต่ 250 เป็นต้นไป เพราะเป็นช่วงการไหลแบบ engulfment flow แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 5. 32 การเปรียบเทียบ mixing efficiency กรณีที่ scale up model



รูปที่ 5. 33 การเปรียบเทียบความดันเฉลี่ยกรณีที่ scale up model ที่ $Re = 500$

รูปที่ 5.32 แสดงผลการเปรียบเทียบ mixing efficiency ระหว่างไมโครมิกเซอร์ model D ขนาดปกติ และไมโครมิกเซอร์ model D ที่ขยายขนาดเป็นสองเท่า พบว่าไมโครมิกเซอร์ model D ขนาดปกติมี mixing efficiency มากกว่า ไมโครมิกเซอร์ model D ที่ scale up ทั้งนี้มีเหตุผลเนื่องมาจาก การ scale up ทำให้มีพื้นที่ส่วนที่เป็นผนังเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้มีแรงเสียดทานมากขึ้น จึงทำให้ mixing efficiency ลดลง แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 5.33 พบว่าการ scale up นั้นทำให้ความดันลดมีค่าน้อยกว่า ดังนั้นในการนำไมโครมิกเซอร์ไปใช้งานจริงควรพิจารณาถึงความต้องการที่แท้จริง เช่น ในงานที่ต้องการ mixing efficiency สูงๆ โดยอาจจะไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบจากความดันลดที่เกิดขึ้นมากนักก็ควรเลือกใช้ไมโครมิกเซอร์ model D และในทางปฏิบัติไมโครมิกเซอร์ที่ใช้กันโดยทั่วไปส่วนใหญ่จะมีการใช้งานในช่วงอัตราการไหล 3 - 2500 mm³/s และความดันสูงสุดที่สามารถรับได้มีค่าประมาณ 1.5 bar

สำหรับงานวิจัยฉบับนี้เป็นการวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไมโครมิกเซอร์ เพื่อใช้ในการออกแบบไมโครมิกเซอร์ให้มีความเหมาะสมในการใช้งานในสถานการณ์ต่างๆ ซึ่งพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไมโครมิกเซอร์ประกอบไปด้วย ความเร็วของของไหลที่ไหลเข้าไมโครมิกเซอร์ซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะการไหลให้เป็นไปตามรูปแบบทั้ง 3 แบบดังที่อธิบายไว้ข้างต้น และอีกปัจจัยหนึ่งก็คือ aspect ratio เป็นตัวแปรที่กำหนดขนาดของช่องการไหลให้มีความเหมาะสม เพราะถ้าหากช่องการไหลมีขนาดใหญ่หรือเล็กเกินไปก็จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของไมโครมิกเซอร์เช่นกัน

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลสองชนิดที่ไหลผ่านไมโครมิกเซอร์ และเกิดการผสมกัน โดยการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง mixing efficiency และความดันลด (pressure drop) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

6.1.1 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลบริเวณทางเข้าของไมโครมิกเซอร์

ความเร็วของของไหลที่ไหลเข้าไมโครมิกเซอร์มีอิทธิพลอย่างมากต่อการผสมกันของของไหล ทั้งสองชนิดและค่าความดันลดที่เกิดขึ้น จากการทดสอบพบว่าสามารถแบ่งลักษณะการไหลได้เป็น 3 ลักษณะ คือ stratified flow, vortex flow และ engulfment flow ซึ่งขึ้นอยู่กับ Reynolds number คือ $Re < 10$, $10 < Re < 150$ และ $Re > 150$ ตามลำดับ และช่วงการไหลแบบ engulfment flow เป็นช่วงที่ของไหลผสมเข้ากันได้ดี

6.1.2 การเปลี่ยนแปลง aspect ratio ของไมโครมิกเซอร์

Aspect ratio เป็นตัวแปรอีกหนึ่งตัวที่มีผลต่อ mixing efficiency และความดันลด เช่นเดียวกัน โดยถ้าหาก aspect ratio มีค่าน้อย นั่นคือช่องการไหลจะมีพื้นที่มากขึ้น และเมื่อพื้นที่ของช่องการไหลมากแรงเสียดทานบริเวณผนังก็มากขึ้นด้วย ซึ่งมีผลทำให้การผสมกันของของไหลไม่มีประสิทธิภาพ และสำหรับค่า aspect ratio ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้มีค่าเท่ากับ 0.8 หรือมีขนาด $380 \times 475 \mu\text{m}^2$

6.1.3 รูปร่างของไมโครมิกเซอร์

ในการศึกษานี้ทำการทดสอบโดยใช้ไมโครมิกเซอร์ที่มีรูปร่างแตกต่างกัน 4 แบบ โดยที่มีขนาดของ mixing channel เท่ากันทั้ง 4 แบบ แต่จะแตกต่างกันตรงที่ช่องทางการไหลเข้าของของไหลทั้งสองชนิด ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าไมโครมิกเซอร์ model D ซึ่งมีช่องการไหลเข้าทั้งหมด 6 ช่อง แบ่งเป็นช่องการไหลเข้าของเอทานอล 3 ช่อง และของน้ำ 3 มีค่า mixing efficiency มากที่สุด ซึ่งสามารถให้ mixing efficiency ได้มากที่สุดประมาณ 94%

6.1.4 Scale up

จากการเปรียบเทียบ mixing efficiency ระหว่าง ไมโครมิกเซอร์ model D ขนาดปกติและ ไมโครมิกเซอร์ model D ที่เพิ่มขนาดให้ใหญ่ขึ้นสองเท่า พบว่าไมโครมิกเซอร์ model D ขนาดปกติ ให้ค่า mixing efficiency มากกว่า แต่ก็มีควมดันลดเกิดขึ้นมากกว่า ทั้งนี้ทั้งนั้นไมโครมิกเซอร์ทั้งสองแบบก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันดังนี้

- ไมโครมิกเซอร์ขนาดปกติมีประสิทธิภาพในการผสมสูงกว่าไมโครมิกเซอร์ที่ scale up
- ไมโครมิกเซอร์ขนาดปกติสามารถควบคุมปริมาณสารในระบบได้ง่ายกว่า เช่นภายในระบบเกิดสารพิษขึ้นก็จะสามารถควบคุมและจัดการได้ง่ายกว่า
- ไมโครมิกเซอร์ขนาดปกติใช้พื้นที่ในการจัดเก็บหรือวางน้อย เนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดเล็กกว่า
- ไมโครมิกเซอร์ขนาดปกติเกิดการอุดตันได้ง่ายเพราะช่องการไหลมีขนาดเล็กมาก
- ไมโครมิกเซอร์ที่ scale up สามารถขึ้นรูปหรือผลิตอุปกรณ์ได้ง่ายกว่า ซึ่งอาจจะส่งผลต่อราคาและต้นทุนที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์
- ไมโครมิกเซอร์ที่ scale up สามารถใช้งานได้ง่ายและสะดวกกว่า

6.2 ข้อเสนอแนะในวิทยานิพนธ์และสำหรับงานวิจัยในอนาคต

- 1) สำหรับไมโครมิกเซอร์ model D ในทางปฏิบัติการควบคุมความเร็วบริเวณทางเข้าให้เท่ากันนั้นอาจทำได้ยาก เนื่องจากปั๊มที่ส่งของไหลเข้าสู่ระบบจะมีการแยกของไหลออกไปตามช่องต่างๆทำให้การควบคุมทำได้ค่อนข้างยาก
- 2) ควรจำลองแบบเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการไหลผ่านไมโครมิกเซอร์ที่มีรูปร่างซับซ้อนขึ้น เนื่องจากไมโครมิกเซอร์ที่มีการใช้งานในปัจจุบันมีหลายรูปแบบที่มีความซับซ้อน เช่น การเปลี่ยนทิศทางการไหลในช่วง mixing channel
- 3) ควรจำลองแบบเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการไหลที่มีปัจจัยภายนอกมารบกวนซึ่งอาจจะมีผลต่อการผสมกันของของไหล เช่น การไหลผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, การไหลผ่านคลื่นเสียง เป็นต้น เพราะปัจจัยต่างๆเหล่านี้ส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของของไหลในระบบ
- 4) ควรจำลองแบบเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการไหลในกรณีที่เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม เนื่องจากในการนำเอาไมโครมิกเซอร์ไปใช้งานจริงในงานด้านเคมีบางครั้งสารทำงานทั้งสองอาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้น เช่น ความร้อน และการเปลี่ยนสถานะของของไหล เป็นต้น ซึ่งเหล่านี้ส่งผลต่อการผสมกันของของไหล

รายการอ้างอิง

- [1] E. K. Sackmann, A. L. Fulton, and D. J. Beebe, "The present and future role of microfluidics in biomedical research," *Nature*, vol. 507, pp. 181-189, 03/13/print 2014.
- [2] A. Salic and B. Zelic, "Microreactors – Portable factories for biodiesel fuel production," *GOMABN*, vol. 50, pp. 85-110, 2011.
- [3] A. Salic, A. Tusek, and B. Zelic, "Application of microreactors in medicine and biomedicine," *Journal of APPLIED BIOMEDICINE*, vol. 10, pp. 137-153, 2012.
- [4] N. T. Nguyen and Z. Wu, "Micromixers—a review," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, pp. R1-R16, 2005.
- [5] V. Hessel, H. Löwe, and F. Schönfeld, "Micromixers—a review on passive and active mixing principles," *Chemical Engineering Science*, vol. 60, pp. 2479-2501, 2005.
- [6] A. Soleymani, E. Kolehmainen, and I. Turunen, "Numerical and experimental investigations of liquid mixing in T-type micromixers," *Chemical Engineering Journal*, vol. 135, pp. S219-S228, 2008.
- [7] S. S. Hsieh, J. W. Lin, and J. H. Chen, "Mixing efficiency of Y-type micromixers with different angles," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 44, pp. 130-139, 2013.
- [8] N. A. Mouheb, D. Malsch, A. Montillet, C. Solliec, and T. Henkel, "Numerical and experimental investigations of mixing in T-shaped and cross-shaped micromixers," *Chemical Engineering Science*, vol. 68, pp. 278-289, 2012.
- [9] E. A. Mansur, Y. D. Wang, and Y. Y. Dai, "Computational Fluid Dynamic Simulation of Liquid–Liquid Mixing in a Static Double-T-shaped Micromixer," *The Chinese Journal of Process Engineering*, vol. 8, 2008.
- [10] M. A. Ansari, K. Y. Kim, K. Anwar, and S. M. Kim, "Vortex micro T-mixer with non-aligned inputs," *Chemical Engineering Journal*, vol. 181–182, pp. 846-850, 2/1/ 2012.

- [11] S. Y. Jin, Y. Z. Liu, W. Z. Wang, Z. M. Cao, and H. S. Koyama, "Numerical evaluation of two-fluid mixing in a swirl micro-mixer*," *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 18, pp. 542-546, 10// 2006.
- [12] T. Andreussi, C. Galletti, R. Mauri, S. Camarri, and M. V. Salvetti, "Flow regimes in T-shaped micro-mixers," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 76, pp. 150-159, 2015.
- [13] C. Galletti, M. Roudgar, E. Brunazzi, and R. Mauri, "Effect of inlet conditions on the engulfment pattern in a T-shaped micro-mixer," *Chemical Engineering Journal*, vol. 185-186, pp. 300-313, 2012.
- [14] M. S. Virk, A. E. Hold, and S. Kaennakham, "Numerical Analysis of Fluid Mixing in T-Shape Micro Mixer," in *COMSOL Users Conference 2007 Grenoble*, 2007.
- [15] G. Hetsroni, A. Mosyak, E. Pogrebnyak, and L. P. Yarin, "Fluid flow in micro-channels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 1982-1998, 2005.
- [16] M. Lorenzini, G. L. Morini, and S. Salvigni, "Laminar, transitional and turbulent friction factors for gas flows in smooth and rough microtubes," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49, pp. 248-255, 2010.
- [17] S. Wong, M. Ward, and C. Wharton, "Micro T-mixer as a rapid mixing micromixer," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 100, pp. 359-379, 2004.
- [18] D. Bothe, C. Stemich, and H. J. Warnecke, "Fluid mixing in a T-shaped micro-mixer," *Chemical Engineering Science*, vol. 61, pp. 2950-2958, 2006.
- [19] G. Orsi, M. Roudgar, E. Brunazzi, C. Galletti, and R. Mauri, "Water-ethanol mixing in T-shaped microdevices," *Chemical Engineering Science*, vol. 95, pp. 174-183, 2013.
- [20] M. Le and I. Hassan, "DSMC simulation of gas mixing in T-shape micromixer," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 2370-2377, 2007.
- [21] J. Yue, G. Chen, and Q. Yuan, "Pressure drops of single and two-phase flows through T-type microchannel mixers," *Chemical Engineering Journal*, vol. 102, pp. 11-24, 2004.
- [22] S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation, Newyork, 1980.

- [23] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computation Fluid Dynamics : The Finite Volume Method* Longman Scientific & Technical, London, 1995.
- [24] C. W. Hirt and B. D. Nichols, *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries:* " *Journal of Computational Physics*, vol. 39, 1981.
- [25] ANSYS, "Tutorial guide," in *ANSYS FLUENT 12.0*, ed: Fluent Inc., 2009.
- [26] D. Bothe, C. Stemich, and H.-J. Warnecke, "Computation of scales and quality of mixing in a T-shaped microreactor," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 32, pp. 108-114, 2008.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศุภสิทธิ์ ประเสริฐลาภ เกิดเมื่อวันที่ 23 เมษายน พ.ศ. 2530 จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

