

การจำลองแบบทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของของเหลวที่ไม่ละลายเข้าหากันในเครื่องปฏิกรณ์
แบบจุลภาคที่ขยายขนาด

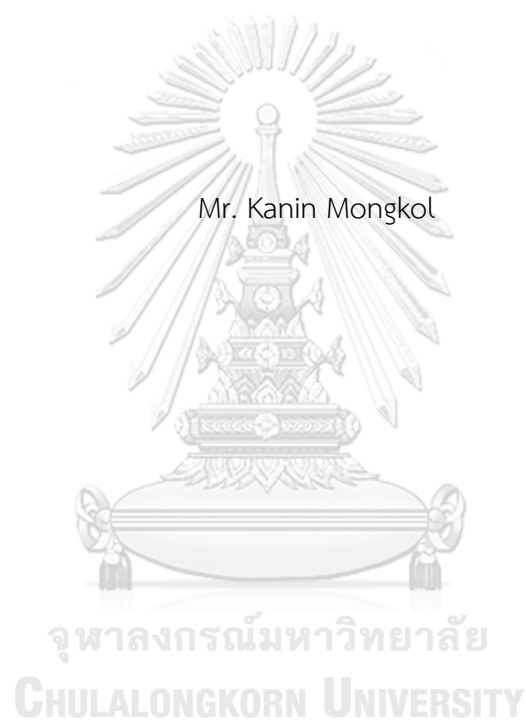


บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODELLING OF IMMISCIBLE LIQUIDS IN SCALED-
UP MICROREACTOR



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 2017

Copyright of Chulalongkorn University

คณิน มงคล : การจำลองแบบทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของของเหลวที่ไม่ละลาย
 เข้าหากันในเครื่องปฏิกรณ์แบบจุลภาคที่ขยายขนาด (COMPUTATIONAL FLUID
 DYNAMICS MODELLING OF IMMISCIBLE LIQUIDS IN SCALED-UP MICROREACTOR)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม:
 ศ. ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์, 89 หน้า.

สำหรับการสกัดด้วยตัวละลายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคนั้น ของเหลวในกระบวนการ
 จะมีคุณสมบัติที่ไม่ละลายเข้าหากันซึ่งจะทำให้เกิดรูปแบบของการไหลที่แตกต่างกันออกไป โดยการ
 ไหลแบบ slug นั้นเป็นรูปแบบการไหลที่มักจะพบได้เมื่อเป็นการไหลที่ความเร็วต่ำ ซึ่งการไหลดังกล่าว
 สามารถรักษารูปแบบการไหลให้คงที่ตลอดความยาวท่อโดยที่มีประสิทธิภาพในการสกัดที่สูงกว่า
 รูปแบบการไหลแบบอื่นๆ ซึ่งเป็นผลจากการหมุนวนภายในเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน
 slug การศึกษาการสกัดด้วยตัวทำละลายด้วยวิธีการดังกล่าวได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพที่สูง
 เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน แต่ที่ผ่านมามักเป็นการศึกษาในระดับ
 จุลภาคซึ่งมีผลผลิตโดยรวมน้อย ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งไปที่การศึกษาผลเนื่องจากการเพิ่มขนาดเส้นผ่าน
 ศูนย์กลางของท่อในระดับมิลลิเมตร ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการหมุนวนภายใน และความดัน
 ตกคร่อมภายใน slug โดยทำการศึกษาดูการจำลองแบบทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบ 2
 มิติ ของการไหลผ่านท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดแตกต่างกันออกไปตั้งแต่ 1-10
 มิลลิเมตร ของเหลว 2 ชนิดที่มีคุณสมบัติการไม่ละลายเข้าหากันประกอบด้วยน้ำและเคโรซีนจะถูก
 ป้อนเข้าสู่ท่อที่อยู่ตรงข้ามกันและเกิดการผสมกันที่บริเวณข้อต่อรูปตัว T โดยเปลี่ยนแปลงค่า Weber
 number ในช่วง 0.002-0.02 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
 ทำให้เวลาการหมุนวนลดลง 1.39% และความดันตกคร่อม slug ลดลง 85.12% โดยที่มีอัตราการ
 ไหลเชิงปริมาตรเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่ารูปแบบการไหลแบบ slug จะไม่สามารถพบได้อีก
 ต่อไปเมื่อเป็นการไหลในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 6 มิลลิเมตร

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5870121921 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: SLUG FLOW / NUMERICAL SIMULATION / INTERNAL CIRCULATION / MULTIPHASE FLOW

KANIN MONGKOL: COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODELLING OF IMMISCIBLE LIQUIDS IN SCALED-UP MICROREACTOR. ADVISOR: ASST. PROF. SOMPONG PUTIVISUTISAK, Ph.D., CO-ADVISOR: PROF. SUTTICHA ASSABUMRUNGRAT, Ph.D., 89 pp.

Among the different flow regimes in the liquid-liquid extraction in microchannel, Taylor or slug flow is a type of flow that maintains a stable shape as two immiscible fluids convect alongside and harvests higher extraction efficiency than other flow types. Its attributes narrate the genesis of the internal circulation within the slug. While most research on slug flow are at microscale level, this research highlights the effect of diameter range of a circular tube at millimeter-scale, featuring the phenomena that arise out of the internal circulation patterns and the pressure drop caused at large channel. Investigation is done via a 2D numerical simulation of flow through microchannel with different diameters (1 to 10 mm). Two immiscible fluids are fed into two adverse ends of the tube, and mixing occurs within the mixing element of the T-junction. The Weber number is in the range of 0.002-0.02. Upon the operating conditions that induced the slug flow pattern, an increment in the tube diameter leads to the decrement of the recirculation time up to 1.39% and 85.121% of pressure drop along the channel. However, findings reveal that slug flow pattern is no longer generated when the channel diameter is larger than 6 mm.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยการช่วยเหลือและคำแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ศ.ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ ตลอดจนคณะอาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำที่มีประโยชน์และความกรุณาให้แก่ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอดผู้วิจัยขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา ประธานกรรมการและ ดร.ชฎานุตม์ โฆษิตานนท์ กรรมการ ที่ให้คำแนะนำและชี้แนะให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา สถาบันการศึกษาอันทรงเกียรติที่มอบโอกาสในการศึกษา และ NSTDA Chair Professor Grant (NO. 5) funded by the Crown Property Bureau of Thailand and National Science and Technology Development Agency ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยชิ้นนี้



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
บทที่ 2 การศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	5
2.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	5
2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบหลายวัฏภาคแบบทั่วไป.....	7
2.3 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคสำหรับปฏิกิริยาแบบหลายวัฏภาค.....	7
2.3.1 รูปแบบการไหลภายในท่อจุลภาค.....	9
2.3.2 การหมุนวนภายใน.....	11
2.3.3 เวลาการหมุนวน.....	16
2.4 การถ่ายเทมวล.....	18
2.5 การศึกษาโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	24
2.5.1 พฤติกรรมการไหลภายในท่อ.....	24
2.5.2 พฤติกรรมการถ่ายเทมวล.....	26
2.6 วิธีการเพิ่มปริมาณผลผลิต.....	27

2.6.1 การเพิ่มจำนวนท่อ.....	27
2.6.2 การขยายขนาดท่อ.....	31
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎี.....	33
3.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	33
3.2 แบบจำลองการไหลแบบหลายวัฏภาค.....	33
3.2.1 แบบจำลอง Volume of Fluid.....	33
3.2.2 สมการสัดส่วนโดยปริมาตร.....	34
3.2.3 การประมาณค่าที่ผิว.....	34
3.3 สมการควบคุม.....	36
3.3.1 สมการอนุรักษ์มวล.....	36
3.3.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม.....	38
3.3.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน.....	41
3.4 กระบวนการหาผลเฉลย.....	42
3.4.1 การหาผลเฉลยของความดัน.....	43
3.4.2 การหาผลเฉลยของโมเมนตัม.....	43
3.4.3 การเชื่อมโยงความเร็วและความดัน.....	45
บทที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณและการวิเคราะห์.....	50
4.1 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	50
4.1.1 ลักษณะของแบบจำลอง.....	50
4.1.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบ.....	52
4.1.3 สรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	52
4.2 ลักษณะของปัญหา.....	53
4.3 ผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าของมุมสัมผัส.....	55

4.4	ผลเนื่องจากการขยายขนาดท่อต่อรูปแบบการไหลแบบ slug.....	57
4.5	ผลเนื่องจากการขยายขนาดท่อต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน slug	65
4.6	รูปแบบการกระจายตัวของความดัน	69
4.7	การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทมวล	73
4.7.1	การเปลี่ยนแปลงขนาดและอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร	73
4.7.2	ความเร็ว slug	75
4.7.3	เวลาการหมุนวน	76
บทที่ 5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	82
5.1	ผลเนื่องจากการขยายขนาดท่อ	82
5.1.1	การเกิดการไหลแบบ slug	82
5.1.2	ขนาดของ slug และอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร	82
5.1.3	รูปแบบการกระจายตัวของความดัน.....	83
5.1.4	เวลาการหมุนวน.....	83
5.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	83
รายการอ้างอิง.....	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	84
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	CHULALONGKORN UNIVERSITY	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การสกัดด้วยวัฏภาคของเหลว (Liquid-Liquid extraction) หรือการสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการแยกสารประกอบ กระบวนการดังกล่าวมักจะเกี่ยวข้องกับน้ำที่มีคุณสมบัติมีขั้วและตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติไม่มีขั้ว อย่างไรก็ตามด้วยความสามารถในการละลายและแรงจลนศาสตร์ทางเคมี (chemical potential) ที่แตกต่างกันของสารแต่ละชนิด ทำให้เกิดการถ่ายเทสารละลายเป้าหมายระหว่างของเหลวภายในกระบวนการ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการเคลื่อนที่ของสารละลายเป้าหมายนั้นมักจะเคลื่อนที่จากสารละลายที่เป็นน้ำ (aqueous solution) ไปยังสารละลายอินทรีย์ (organic solution) นับเป็นอีกกระบวนการสำคัญที่ถูกนำมาใช้เพื่อการสกัดแยกสารประกอบในกรณีที่สารประกอบนั้นมีความสามารถในการระเหยที่ใกล้เคียงกันซึ่งไม่สามารถทำการสกัดแยกสารด้วยวิธีการกลั่นแบบธรรมดา (distillation) ปัจจุบันมีการใช้งานในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการผลิตยา, อุตสาหกรรมปิโตรเคมี, และอื่น ๆ [1-3]

หลักการทางงานโดยทั่วไปของเครื่องปฏิกรณ์แบบหลายวัฏภาคคือการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวเพื่อให้เกิดการถ่ายเทสารละลายโดยการแพร่ผ่านพื้นผิวสัมผัสระหว่างของเหลว อย่างไรก็ตามเนื่องจากอัตราการถ่ายเทระหว่างของเหลว (transfer rate) นั้นส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ ในกระบวนการที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวที่เครื่องปฏิกรณ์ทำได้นั้นมักจะไม่เพียงพอ ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องปฏิกรณ์นั้นลดต่ำลงไปด้วย เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวได้มีการพัฒนาวิธีการและอุปกรณ์เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวที่มีหลักการทางแตกต่างกันไปดังเช่น 1.multistage agitated column, 2.centrifugal, 3.column (packed, plate, vibrating plates, buss loop, etc.) 4.tubular (straight, coiled) และ 5.film reactor [4] ซึ่งสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวได้มากขึ้น มีกลไกการทำงานที่ไม่ซับซ้อน และค่าบำรุงรักษาต่ำ อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการทำงานดังกล่าวข้างต้นมักจะมีขนาดใหญ่จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูง มีการใช้พลังงานสูง และประสิทธิภาพการทำงานดีในบางเงื่อนไขการดำเนินการเท่านั้น

เพื่อลดขนาดของเครื่องปฏิกรณ์และเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์โดยการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลระหว่างของเหลว Burns and Ramshaw [5] ได้นำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับการเพิ่มความเข้มข้นของกระบวนการ (process intensification) โดยทำการศึกษาการไหลภายในท่อขนาดจุลภาคโดยใช้กระบวนการ nitration of benzene ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างกรดและสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายเข้าหา

กันซึ่งมีปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์ (reaction kinetics) สูง ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงตามไปด้วย จึงต้องการอุปกรณ์ที่สามารถทำให้เกิดการถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวได้อย่างรวดเร็วเพื่อลดการเกิดผลผลิตพลอยได้ (byproduct) โดยพบว่าปริมาณผลผลิตพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการลดลงซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดำเนินการผ่านเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลได้

ต่อมาจึงได้มีการศึกษาการสกัดแยกสารโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์นั้นมีขนาดเล็ก, การไหลเป็นแบบราบเรียบ [5-7] และอัตราการถ่ายเทมวลสูง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์รูปแบบอื่นที่มีการใช้งานในปัจจุบัน [8, 9] เนื่องจากของเหลว 2 ชนิดที่ไม่ละลายเข้าหากันเมื่อไหลร่วมกันภายในท่อขนาดเล็กจะทำให้เกิดรูปแบบการไหลที่แตกต่างกันไปหลากหลายรูปแบบซึ่งถูกควบคุมโดยหลายตัวแปร โดยรูปแบบการไหลที่จะสามารถพบได้ทั่วไป ได้แก่ การไหลแบบขนาน (stratified flow), การไหลแบบทรงกระบอก (core-annular flow), การไหลแบบสลัก (slug flow), และการไหลแบบหยด (droplet flow) ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการไหลแบบสลัก (slug) และการไหลแบบขนาน (stratified) เป็นรูปแบบการไหลที่สามารถรักษาสภาพการไหลได้คงที่ตลอดความยาวของแนวท่อ [10-12]

โดยทั่วไปแล้วการถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคนั้นจะเกิดขึ้นผ่านกลไกการแพร่ระหว่างพื้นผิวของเหลวที่สัมผัสกันเท่านั้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเท (transfer rate) โดยพิจารณาเฉพาะรูปแบบการไหลที่มีความสามารถรักษารูปแบบการไหลได้ตลอดความยาวท่อจะพบว่าการไหลแบบ slug นั้นมีอัตราการถ่ายเทสูงกว่ารูปแบบการไหลแบบขนานและรูปแบบการไหลแบบอื่น ๆ [10-14] โดยประสิทธิภาพการสกัด (extraction efficiency) เมื่อดำเนินการภายในท่อจุลภาคที่มีรูปแบบการไหลแบบ slug เพิ่มขึ้น 20%, 40%, และ 80% เมื่อเปรียบเทียบการดำเนินการภายในท่อจุลภาคที่มีรูปแบบการไหลแบบขนาน, การใช้ถึงกวนที่มีความเร็วรอบการหมุนสูง (600-1000 rpm), และการใช้ถึงกวนที่มีความเร็วรอบการหมุนต่ำ (50 rpm) ตามลำดับ [8] นอกจากนี้ความสามารถในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลแล้วการไหลแบบ slug นั้นยังสามารถใช้กับกระบวนการที่ต้องการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเช่นกัน โดยได้มีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในกรณีที่ฟลักซ์ความร้อนบริเวณผนังคงที่และพฤติกรรมของของเหลวภายในท่อเป็นการไหลแบบ slug โดยพบว่ามีค่า 12.6 นัสเซิลต์ (Nu) ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 17.8% เมื่อเปรียบเทียบกับ การไหลแบบของเหลววัฏภาคเดียว [15]

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้การไหลแบบ slug นั้นมีอัตราการถ่ายเทสูงกว่ารูปแบบการไหลแบบอื่น ๆ คือ การหมุนวนที่เกิดขึ้นภายใน slug ซึ่งส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลเนื่องจากการพาภายใน slug และยังทำให้เกิดการสร้างพื้นผิวใหม่ในบริเวณที่ของเหลวนั้นสัมผัสกันทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างผิวสัมผัสระหว่างของเหลวมากขึ้น นอกจากนี้การไหลแบบ slug นั้นทำให้ได้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรสูงที่ส่งผลถึงการเพิ่มของการถ่ายเทมวลโดยการแพร่ที่เกิดขึ้น

บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลว จะเห็นได้ว่าการสกัดสารในท่อจุลภาคที่มีรูปแบบการไหลแบบ slug นั้นสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลให้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสกัดด้วยตัวทำละลายโดยเครื่องปฏิกรณ์แบบที่มีการใช้งานอยู่ทั่วไป ซึ่งทำให้สามารถลดเวลาที่ใช้เพื่อทำการสกัดและลดต้นทุนการผลิตและอื่น ๆ

เนื่องจากความสามารถในการถ่ายเทมวลที่สูงส่งผลให้ได้ผลผลิตมากขึ้นและสามารถลดต้นทุนการผลิต แต่จากการสกัดสารโดยมีกรไหลแบบ slug ที่ผ่านมานั้นส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาระดับจุลภาค จึงทำให้ผลผลิตโดยรวมที่สามารถทำได้มีปริมาณน้อยโดยมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรอยู่ในระดับมิลลิลิตรต่ออนาที เพื่อให้ได้อัตราการผลิตมากขึ้นสามารถทำได้โดย 1. การเพิ่มจำนวนท่อ (numbering up) และ/หรือ 2. การขยายขนาดท่อ (scale-up) การเพิ่มปริมาณผลผลิตโดยการเพิ่มจำนวนท่อนั้นอาจเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการเพิ่มปริมาณผลผลิตเนื่องจากสามารถรักษาคุณสมบัติสำคัญในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทที่ได้จากรูปแบบการไหลแบบ slug เอาไว้ได้ อย่างไรก็ตามเครื่องปฏิกรณ์นั้นจะมีค่าความดันตกคร่อมที่สูงมาก ในขณะที่การเพิ่มปริมาณการผลิตโดยการเพิ่มขนาดของท่อในเครื่องปฏิกรณ์ จะทำอัตราการไหลเชิงปริมาตรเพิ่มมากขึ้น แต่ผลเนื่องจากแรงภายนอกจะเข้ามามีผลต่อพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการถ่ายเท เช่น ความสามารถในการรักษา รูปแบบการไหลแบบ slug, การหมุนวนภายใน slug, ขนาดของ slug [16] ของของเหลวในระบบ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งไปที่การศึกษาผลของการขยายขนาดท่อในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีผลต่อปัจจัยต่างที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้สำหรับประกอบการพิจารณาการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยมีรูปแบบการดำเนินการแบบ slug ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมกรไหลที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลเมื่อทำการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบจุลภาคเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ประกอบการออกแบบอุปกรณ์จริงต่อไป

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) ทำการศึกษาพฤติกรรมกรไหล โดยโปรแกรมจำลองการไหลเชิงพาณิชย์ ANSYS FLUENT 17.2 [17] และวิเคราะห์ผลของการเพิ่มขนาดท่อที่มีต่อความเร็วของการหมุนวนภายใน slug, ความดันตกคร่อม, อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ทางออก, และอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร

- 2) แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาเป็นลักษณะ 2 มิติ โดยท่อมีขนาดความกว้างตั้งแต่ 1-10 mm โดยให้ของเหลวที่ประกอบด้วย 1.เคโรซีน (kerosene) และ 2.น้ำ (water) ที่ไหลในช่วงของ $We=0.001$ ถึง 0.002 โดยเริ่มเกิดการผสมกันที่ข้อต่อรูปตัว T

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อแสดงให้เห็นพฤติกรรมการไหลซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและการใช้พลังงานของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย ที่ดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบจุลภาคที่ทำการเพิ่มขนาดสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประกอบการพิจารณาความเหมาะสมในการออกแบบสร้างเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นสำหรับความต้องการเพิ่มอัตราการผลิตที่ของไหลที่มีรูปแบบการไหลแบบ slug

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาและทำความเข้าใจหลักการที่ใช้ในการสกัดสารด้วยตัวทำละลาย (liquid-liquid extraction) ที่พบได้ในปัจจุบัน ปัจจัยที่มีผลหรือเกี่ยวข้องกับรูปแบบการไหล และการหมุนวนที่เกิดขึ้นภายใน slug
- 2) ทำการศึกษาวิธีการจำลองการไหลและการถ่ายเทมวลภายในท่อขนาดเล็ก ของสารซึ่งเป็นของเหลวที่ไม่ละลายเข้าหากันโดยใช้โปรแกรมจำลองการไหล
- 3) เลือกแบบจำลองที่ใช้สำหรับการศึกษาการเกิดการไหลแบบ slug ในท่อขนาดเล็ก แล้วทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยทำการจำลองการไหลโดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษารูปแบบการไหลแบบ slug นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน
- 4) ทำการศึกษาหาความเร็วของการไหลภายในท่อขนาดเล็กที่ทำให้ของเหลวนั้นมีรูปแบบการไหลแบบ slug, วิเคราะห์ค่าความดันตกคร่อมระหว่าง slug, ความรุนแรงของการหมุนวนที่เกิดขึ้นภายใน slug
- 5) เปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษาทำการวิเคราะห์และสรุปผล

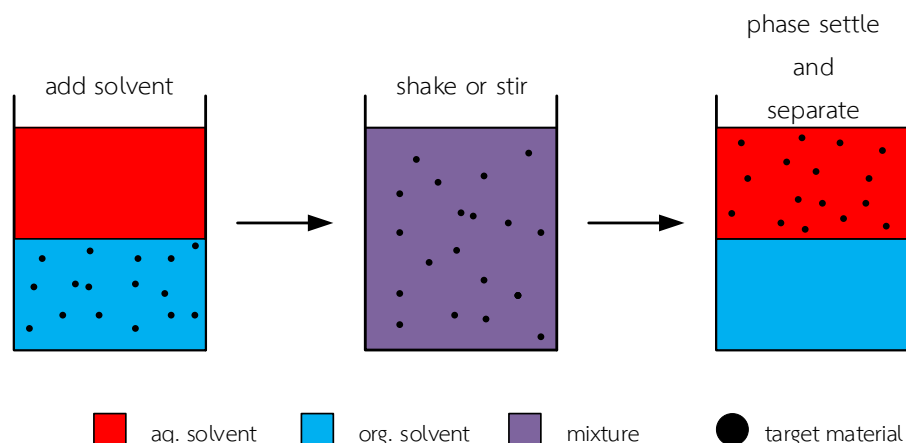
บทที่ 2

การศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา

ในอดีตได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการสกัดโดยวัฏภาคของเหลว (liquid-liquid extraction) เรื่อยมาเพื่อแก้ไขปัญหาที่พบจากเครื่องปฏิกรณ์แบบเดิมและเพิ่มผลผลิต ซึ่งการสกัดโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคนั้นเป็นกระบวนการที่เรียบง่ายและมีประสิทธิภาพในการสกัดแยกสาร อย่างไรก็ตามรูปแบบการไหลที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคที่แตกต่างกัน ส่งผลถึงความสามารถในการสกัดแยกสาร โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาเกี่ยวกับการควบคุม การเกิดการไหลแบบ slug ตลอดจนกลไกการถ่ายเท (มวลและความร้อน) ที่เกิดขึ้นภายในซึ่งมีความสำคัญของที่มาและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ถูกรวบรวมไว้ดังนี้

2.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย

การสกัดด้วยตัวทำละลาย (liquid-liquid extraction) เป็นกระบวนการพื้นฐานที่ถูกใช้ในการถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เป็นหนึ่งในวิธีที่ถูกนำมาใช้ในการสกัดแยกสาร โดยอาศัยหลักการของความสามารถในการละลายที่แตกต่างกันในของเหลวแต่ละชนิด ตัวถูกละลาย (solute) ตั้งแต่หนึ่งชนิดหรือมากกว่าจะถูกแยกออกจากของเหลวชนิดแรก (feed solution) และถูกส่งผ่านไปยังของเหลวอีกชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย (solvent) การสกัดด้วยตัวทำละลายนั้นสามารถทำได้โดยป้อนของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายเข้าหากันแต่มีความสามารถในการละลายสารที่ต้องการเข้าหากันให้เกิดการสัมผัสกันของของเหลวทั้งคู่ ด้วยความสามารถการละลายที่แตกต่างกันของตัวถูกละลาย (solute species) ในของเหลวต่างชนิดกัน ตัวถูกละลายที่ต้องการนั้นจะเคลื่อนที่ออกจาก feed solution ไปอยู่ใน solvent phase หรือก็คือตัวทำละลายที่อิมัลชันตัวถูกละลาย ในขณะที่ feed solution ที่ไม่มีตัวถูกละลายเหลืออยู่แล้วจะเรียกว่า raffinate phase หลังจากกระบวนการสกัดสารแล้วของเหลวนั้นต้องถูกนำมาผ่านกระบวนการการแยกสาร (separation) ให้อยู่ในรูปแบบที่บริสุทธิ์ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการทางเคมีและอุตสาหกรรมสมัยใหม่ ที่มีสัดส่วนการใช้งานมากในโรงงาน โดยค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสกัดแยกสารนั้นคิดเป็น 40%-70% [18] ของต้นทุนการดำเนินการ หลักการสกัดสารด้วยตัวทำละลายอย่างง่ายถูกแสดงในรูปที่ 2.1 กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายนั้นมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตยาปฏิชีวนะ (penicillin), การแปรรูปปิโตรเลียม (petroleum processing), และการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีจุดเดือดสูงออกจากร้าน้ำเสีย เป็นต้น



รูปที่ 2.1 หลักการการสกัดสารด้วยตัวทำละลาย

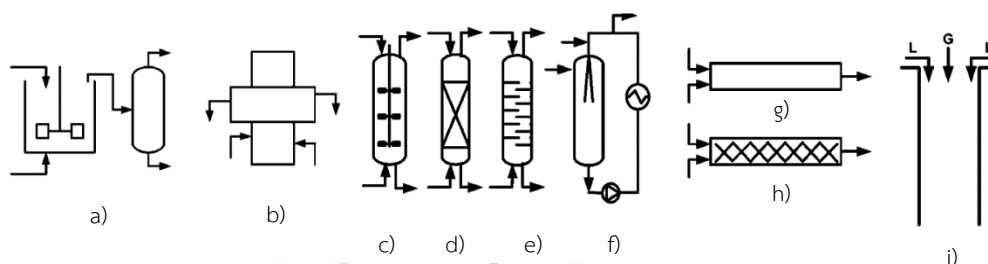
อุปกรณ์สำหรับใช้เพื่อทำการสกัดด้วยตัวทำละลายเรียกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบหลายวัฏภาค (multiphase reactor) ด้วยการดำเนินการสกัดโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบดั้งเดิมนั้น พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์จะถูกจำกัดโดยความสามารถในการถ่ายเทมวล โดยประสิทธิภาพโดยรวมจะลดลงเมื่อใช้กับกระบวนการที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง เมื่อไม่นานมานี้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาค (micro reactor) ได้เริ่มเป็นที่สนใจและถูกนำมาศึกษาอย่างแพร่หลายโดยคาดหวังว่าจะสามารถนำมาใช้เพื่อทดแทนเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการใช้งานกันทั่วไปในอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากกว่า $10,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ซึ่งส่งผลอย่างมากต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล และเนื่องจากการดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคนั้นมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรน้อยจึงมักจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) ซึ่งสามารถควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายจึงทำให้ได้ผลผลิตมากขึ้น (higher product yield) และนอกจากนั้นขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ที่เล็กลงยังทำให้สามารถลดความต้องการใช้พลังงานสำหรับการดำเนินงานด้วยดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พลังงานที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่าง ๆ [19]

Contactor	Power input (kJ/m ³ of liquid)
agitated extraction column	0.5-190
mixer-settler	150-250
rotating disk	175-250
centrifugal extractor	850-2600
liquid-liquid slug flow ^[18]	0.2-20

2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบหลายวัฏภาคแบบทั่วไป

หลักการสำคัญของกระบวนการแยกสารนั้นคือการทำให้มีพื้นที่สำหรับการถ่ายเทระหว่างของเหลวให้มากที่สุด เพื่อให้สามารถทำการแยกสาร (separation) ได้รวดเร็วและได้ปริมาณมาก ปัจจุบันได้มีการใช้งานอุปกรณ์ที่รู้จักกันในชื่อ ‘เครื่องปฏิกรณ์แบบหลายวัฏภาค’ ซึ่งออกแบบเพื่อใช้ในการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างของเหลวให้มากขึ้นโดยมีการลักษณะทำงานที่แตกต่างกันไปดังรูปที่ 2.2 อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์แบบหลายวัฏภาค ถูกกำหนดโดยอัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งพบว่าในบางกระบวนการซึ่งมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงจะต้องมีความต้องการอัตราการถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวที่สูงเช่นกัน อย่างไรก็ตามความพยายามในการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างของเหลวโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบหลายวัฏภาคที่มีการใช้งานอยู่นั้นยังคงไม่เพียงพอสำหรับบางกระบวนการเนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างของเหลวไม่สอดคล้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของระบบนั้น ๆ โดยข้อดีและข้อจำกัดที่พบได้จากเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการใช้งานทั่วไปนั้นถูกแสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของเหลว a) mixture settler, b) centrifugal, c) multistage agitated column, d) packed column, e) sieve tray column, f) buss loop, g) tubular reactor, h) static mixer, i) film reactor [4]

2.3 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคสำหรับปฏิกิริยาแบบหลายวัฏภาค

เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากความไม่สมดุลระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและอัตราการถ่ายเทมวลในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายซึ่งจำกัดประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคได้รับความนิยมในการนำมาศึกษามากขึ้น และพบว่าเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคเป็นหนึ่งวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มอัตราการถ่ายเท Burns and Ramshaw [5] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลระหว่างของเหลว 2 ชนิดที่ไม่ละลายเข้าหากันผ่านกระบวนการ nitration of benzene ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อจำกัดของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้กับระบบของเหลวชนิดต่าง ๆ [4]

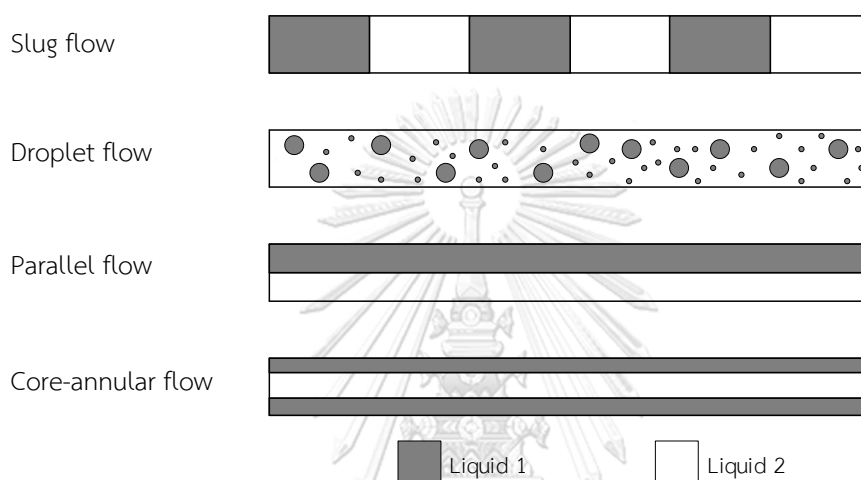
เครื่องปฏิกรณ์	ข้อดี	ข้อจำกัด
mixer settler	<ul style="list-style-type: none"> ■ เรียบง่ายและการบำรุงรักษาต่ำ ■ จำนวนขั้นตอนที่ต้องใช้น้อยลง ■ มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ต้นทุนการติดตั้งสูง
centrifugal	<ul style="list-style-type: none"> ■ สามารถใช้ได้กับของเหลว ชนิดที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน ■ ใช้ปริมาณตัวทำละลายในปริมาณน้อยลง ■ กระบวนการผสมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสามารถแยกผลิตภัณฑ์ได้มาก 	<ul style="list-style-type: none"> ■ การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์เป็นไปได้ยาก ■ กลไกการทำงานซับซ้อน ■ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง
agitated columns	<ul style="list-style-type: none"> ■ ค่าบำรุงรักษาต่ำ ■ เกิดการผสมที่รุนแรงซึ่งส่งผลให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น 	<ul style="list-style-type: none"> ■ การกำหนดขนาดของ drop/bubble ทำได้ยาก ■ การแยกของเหลวที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันทำได้ยาก
static column	<ul style="list-style-type: none"> ■ ใช้งานง่าย ■ ประสิทธิภาพดีในระดับนำพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับราคาเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่สูงมาก 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ประสิทธิภาพการทำงานขึ้นอยู่กับรูปแบบการเรียงตัวของคอลัมน์ภายใน ■ มีประสิทธิภาพสูงในช่วงอัตราการไหลที่จำกัด
film reactor	<ul style="list-style-type: none"> ■ ความดันตกคร่อมน้อย ■ มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก 	<ul style="list-style-type: none"> ■ รูปแบบการไหลไม่คงที่เมื่อระบบมีอัตราการไหลสูง ■ फिल्मของเหลวที่มีความหนามากทำให้เกิดความต้านทานการถ่ายเทมวลที่สูงขึ้น

ต้องการการถ่ายเทมวลที่รวดเร็วระหว่างของเหลว เพื่อให้เกิดผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการน้อยที่สุดโดยในการทดลองได้ใช้ท่อที่มีขนาดจุลภาค ($500 \mu\text{m}$) พบว่าภายใต้เงื่อนไขการดำเนินการที่กำหนดการถ่ายเทมวลจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วซึ่งเห็นได้จากการที่ผลผลิตพลอยได้ (byproduct) จากกระบวนการนั้นลดลง ต่อมาจึงได้มีการศึกษาการสกัดสารด้วยตัวทำละลายในท่อขนาดจุลภาคกันอย่างมากขึ้น เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบจุลภาคนั้นเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก [5], อัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรสูง [13, 20], อัตราการถ่ายเทมวลสูง [6, 13, 20], และการไหลมีลักษณะคงที่สามารถกำหนดพื้นที่การถ่ายเทได้อย่างแม่นยำ (well-defined slug) [19] และจากการศึกษาที่ผ่านมา นั้นแสดงให้เห็นได้ว่าเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคในกระบวนการสกัดสารด้วยตัวทำละลายสามารถทำให้การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานการสกัดสารที่กระทำโดยใช้วิธีแบบดั้งเดิม [7, 21] จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่า การสกัดสารด้วยตัวทำละลายที่ทำในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคนั้นมีข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานการสกัดสารด้วยตัวทำละลายโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบดั้งเดิมหลายอย่าง เช่น ได้อัตราการผลิตที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ที่มีขนาดเดียวกัน, การดำเนินการมีความปลอดภัยมากกว่าเนื่องจากสามารถควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้, และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการลดลงเนื่องจากขนาดของอุปกรณ์ที่เล็กลง, ใช้จำนวนท่อน้อยลง, ใช้พลังงานน้อยลง, ลดการเกิดผลผลิตพลอยได้ เป็นต้น จากประโยชน์ที่ได้จากการสกัดสารในท่อจุลภาคที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ทำให้เทคโนโลยีของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาค (microreactor technology) นั้นได้รับความสนใจที่จะนำมาศึกษาและพัฒนาเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานต่อในระดับอุตสาหกรรม

2.3.1 รูปแบบการไหลภายในท่อจุลภาค

การการสกัดด้วยตัวทำละลายนั้นเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวที่มีคุณสมบัติการไม่ละลายเข้าหากันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เมื่อของไหลนั้นเกิดการไหลภายในท่อผลเนื่องจากแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่ออนุภาคของเหลวจะทำให้เกิดรูปแบบการไหลที่แตกต่างกันไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อขนาดปกติ ($d_h \geq 3\text{mm}$) นั้นแรงตึงผิว (surface tension) มีผลต่อการเกิดรูปแบบไหลค่อนข้างน้อยในขณะที่ผลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคนั้นแรงต้านสภาพการเคลื่อนที่ (inertia force) และแรงตึงผิว (surface tension force) นั้นมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของอนุภาคของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์อย่างมากในขณะที่แรงโน้มถ่วงมีผลต่อพฤติกรรมการไหลน้อย [22] รูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคนั้นเป็นตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการถ่ายเทมวลและความร้อน

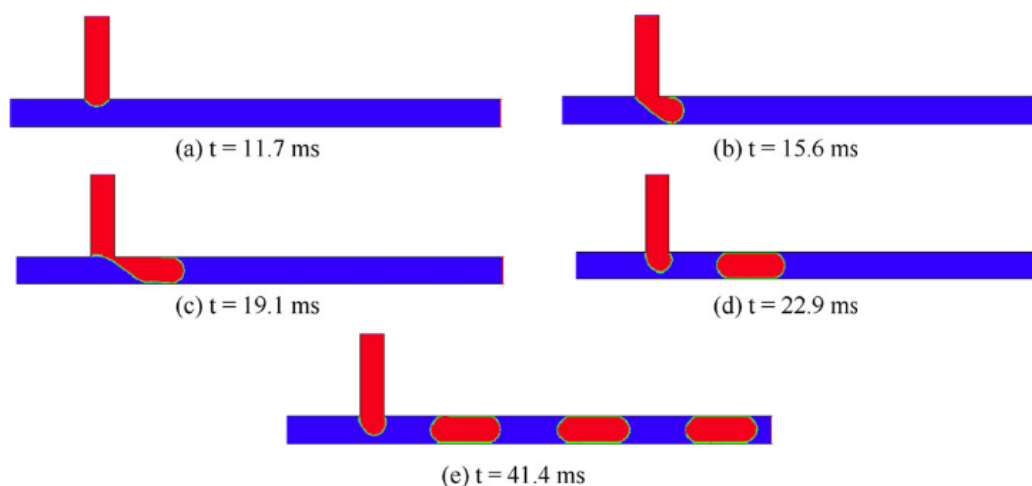
ต่อมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดการไหลพบว่าโดยทั่วไปการไหลของของเหลวที่ไม่ละลายเข้าหากันภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคนั้นสามารถทำให้เกิดรูปแบบการไหลแบบต่าง ๆ พบว่ารูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นนั้นถูกควบคุมโดยตัวแปรหลายชนิด เช่น 1.รูปแบบเรขาคณิตของทางเข้า (inlet junction geometry) [19], 2.คุณสมบัติทางกายภาพของของเหลว [5], 3.เงื่อนไขการดำเนินงาน (ความเร็วเชิงเส้น, อัตราการไหล) [23], และ 4.คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้เป็นท่อ [24] โดยรูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบการไหลที่มักพบได้เช่น slug, droplet, parallel, และ core-annular



รูปที่ 2.3 รูปแบบการไหลที่มักพบสำหรับของไหลที่ไม่ละลายเข้าหากันในท่อจุลภาค

เนื่องจากการเกิดรูปแบบการไหลแบบ slug นั้นถูกควบคุมด้วยปัจจัยหลายอย่างซึ่งจากการทดลองโดยป้อนของเหลวทั้งสองวัฏภาคเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์พร้อมกัน การแทรกสอดระหว่างกันของของเหลวทั้งสองชนิดตรงบริเวณจุดเชื่อมต่อของท่อ (junction) ทำให้เกิดพฤติกรรมของการไหลแบบ slug สลับกันไปเรื่อย Kashid et al. [24] ได้ทำการศึกษาการเกิดการไหลแบบ slug โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณซึ่งผลที่ได้ถูกแสดงในรูปที่ 2.4 โดยแบ่งของเหลวออกเป็น 2 ชนิดคือวัฏภาคปฐมภูมิ (primary phase) แสดงด้วยสีน้ำเงิน และวัฏภาคทุติยภูมิ (secondary phase) แสดงด้วยสีแดง เมื่อเริ่มต้นกำหนดให้มีของเหลวปฐมภูมิไหลอยู่เต็มท่อทั้งหมดแล้วจึงให้ของเหลวทุติยภูมิเริ่มไหลเข้ามาจะเห็นว่าเมื่อของเหลวทุติยภูมิไหลมาพบกับของเหลวปฐมภูมิบริเวณข้อต่อท่อ (รูปที่ 2.4a) จากนั้นจะเริ่มเกิดการแทรกตัวเข้าไปในของเหลวปฐมภูมิที่เป็นกระแสการไหลหลักแล้วเริ่มขยายตัวจนเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อ (รูปที่ 2.4b) เนื่องจากแรงเฉือนระหว่าง droplet กับผนังท่อและความดันตกคร่อมตลอดความยาวท่อของเหลวทุติยภูมิจะยึดตัวออกตามความยาวท่อจนเกิดเป็น 'slug' หรือก็คือ droplet ที่มีความยาวมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (รูปที่ 2.4c) โดยที่คอของของเหลวจะถูก

บีบเข้าหากัน (squeezed) จนขาดออกจากกัน (รูปที่ 2.4d) ซึ่งเป็นการเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเกิดเป็นการไหลแบบ slug (รูปที่ 2.4e)

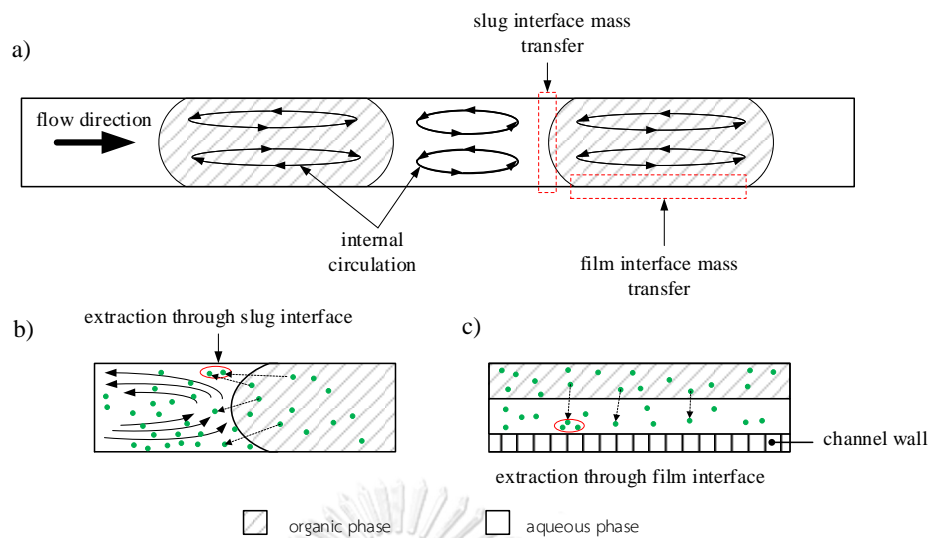


รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเกิดการไหลแบบ slug [24]

2.3.2 การหมุนวนภายใน

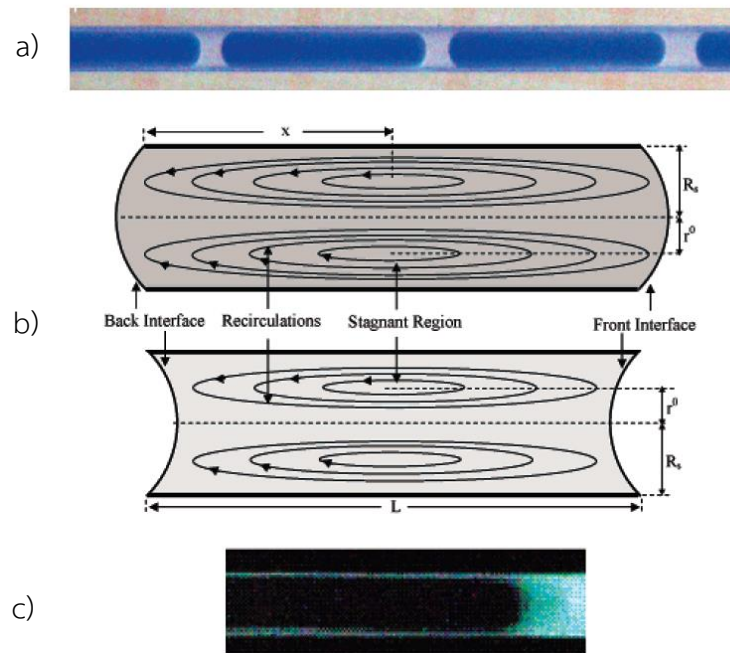
ในบรรดารูปแบบการไหลแบบที่มักพบได้ในการไหลของของเหลวที่ไม่ละลายเข้าหากันในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาค รูปแบบการไหลแบบ slug นั้นเป็นรูปแบบการไหลที่ได้รับการยอมรับว่ามีความสามารถในการถ่ายเทมวลมากกว่ารูปแบบการไหลแบบอื่น เนื่องจาก ‘การหมุนวนภายใน’ ซึ่งเกิดขึ้นภายในแต่ละ slug การหมุนวนภายใน slug นั้นเกิดขึ้นจากผลของแรงเฉือน (shear) ระหว่างของเหลวที่อยู่ติดกับผนังท่อและของเหลวที่บริเวณแกน slug ลักษณะของการหมุนวนภายใน slug และกลไกการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.5

การหมุนวนที่เกิดขึ้นภายในนั้นส่งผลต่อการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นเนื่องจาก 1. จากพฤติกรรมการไหลแบบ slug จะพบว่ามีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่สัมผัสเทียบกับหน่วยปริมาตรสูง (m^2/m^3) ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทมวลเนื่องจากการแพร่ (diffusion) โดยมีการแพร่ที่ผิวสัมผัสบริเวณปลาย slug ที่อยู่ติดกัน (รูปที่ 2.5b) และการแพร่จาก slug ไปยังฟิล์มของเหลวที่ผนังท่อ (รูปที่ 2.5c) และ 2. การหมุนวนภายใน slug นั้นทำให้เกิดการถ่ายเทมวลเนื่องจากการพา (convective) และยังทำให้เกิดการสร้างพื้นผิวสัมผัสใหม่ที่ส่งผลต่อการเพิ่มความแตกต่างของความเข้มข้นซึ่งช่วยให้การแพร่ของมวลที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง slug เกิดได้เร็วขึ้น [10, 11, 13]



รูปที่ 2.5 พลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทมวลภายใน slug a) การหมุนวนภายใน slug และบริเวณที่เกิดการถ่ายเทมวล, b) การถ่ายเทมวลระหว่างผิว slug ที่อยู่ติดกัน, c) การถ่ายเทมวลระหว่าง organic slug กับฟิล์มของ aqueous

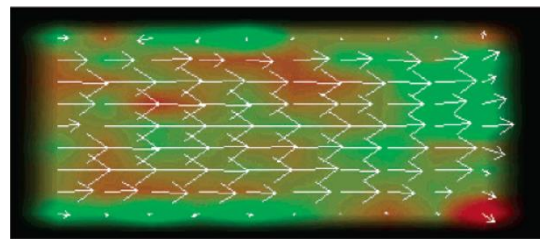
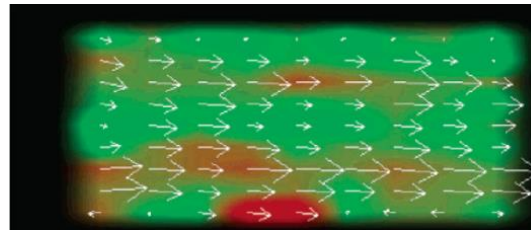
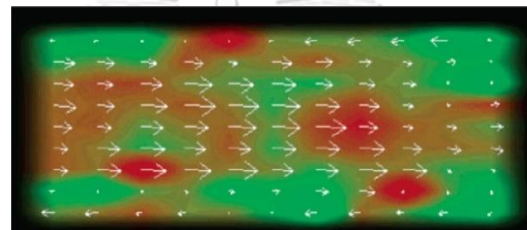
Kashid et al. [11] ได้ทำการศึกษาการหมุนวนภายใน (internal circulation) ที่เกิดขึ้นภายใน slug โดยวิธีต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วการไหลและความยาว slug ที่ส่งผลต่อรูปแบบความเร็วการไหล (velocity profile) และลักษณะการเคลื่อนที่แบบหมุนวนที่เกิดขึ้นภายในการไหลแบบ slug ทั้งที่มีและไม่มีฟิล์มของเหลวที่ผนัง (wall film) ในระบบของการไหลที่ประกอบไปด้วยของเหลว 2 ชนิดที่มีลักษณะการไหลแบบ slug ภายในท่อขนาดเล็ก ดังรูปที่ 2.6a การหมุนวนที่วานี้ถูกแสดงในรูปที่ 2.6b โดยอาจจำแนกออกได้เป็น 2 บริเวณคือ 1.บริเวณที่เกิดการหมุนวน (recirculation zone), และ 2.บริเวณที่อนุภาคของเหลวหยุดนิ่ง (stagnant zone) และยังพบว่าในกรณีที่ทำการศึกษานั้นพบการก่อดำของฟิล์มของเหลว (wall film) ที่เกิดจาก organic phase โดยอยู่ล้อมรอบ aqueous phase ดังแสดงในรูปที่ 2.6c



รูปที่ 2.6 ผลจากการศึกษาการหมุนวนที่เกิดขึ้นภายใน slug, a) ของเหลว 2 ชนิดที่ไม่ละลายเข้าหาที่ไหลในรูปแบบ slug ภายในท่อคาปิลลารีประกอบไปด้วยน้ำ (สีฟ้า) และไซโคลเฮกเซน (ไม่มีสี), b) แผนผังแสดงการหมุนวนภายในน้ำและไซโคลเฮกเซน (cyclohexane) ตามลำดับ, c) การก่อตัวของฟิล์มของน้ำมันพาราฟิน [11]

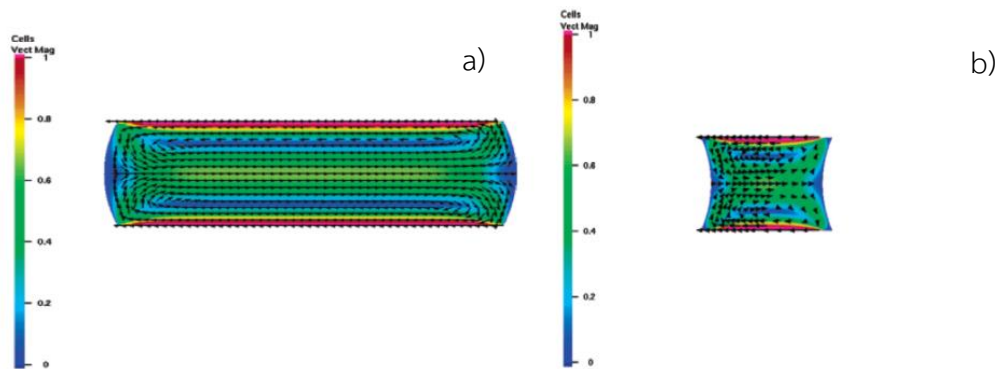
ทั้งนี้ Kashid et al. [11] ได้ทำการศึกษาการหมุนวนภายใน slug โดย

1) กระบวนการ PIV ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาระบบการไหลของน้ำ-น้ำมันพาราฟินในระนาบ 2 มิติ โดยการใส่อนุภาคสำหรับติดตามการไหล (tracer particle) ที่เคลือบด้วยสารเรืองแสง ในของเหลวที่ใช้ทำการทดลอง แล้วใช้สนามแสงพลังงานสูง (แสงเลเซอร์) เพื่อให้เห็นถึงอนุภาคติดตามที่ใส่ลงในของเหลว ทำการบันทึกภาพโดยกล้องวิดีโอความเร็วสูง จากนั้นจึงนำมาปรับให้เป็นภาพนิ่งและเปลี่ยนเป็นภาพขาวดำในรูปแบบของ Bitmap นำรูปที่ได้มาประมวลผลเพื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของเวกเตอร์ความเร็วของแต่ละอนุภาคต่อโดยใช้โปรแกรม Dantec Dynamics Multiphase ePIV ดังในรูปที่ 2.7 แสดงสนามเวกเตอร์การไหลที่ได้จากการทดลอง จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกันระหว่างของอนุภาคของเหลวที่กลาง slug และที่ผนังซึ่งแสดงถึงการเกิดการหมุนวนภายใน

a) $V_{av}=0.031$ m/sb) $V_{av}=0.072$ m/sc) $V_{av}=0.086$ m/s

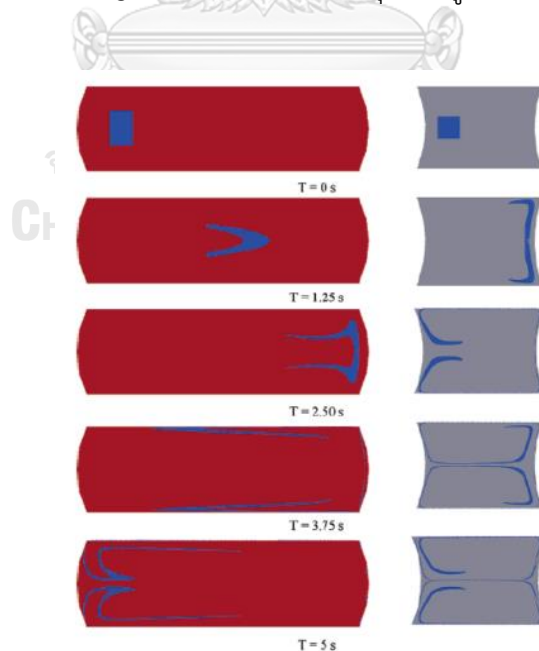
รูปที่ 2.7 การกระจายตัวของเวกเตอร์ความเร็วภายใน slug, a) ความเร็วการไหลเฉลี่ย 0.031 mm/s, b) ความเร็วที่ความเร็วการไหลเฉลี่ย 0.072 mm/s, และ c) ความเร็วการไหลเฉลี่ย 0.086 mm/s ตามลำดับ [11]

2) พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD simulation) โดยผลที่ได้จากการจำลองการไหลแสดงให้เห็นบริเวณที่เกิดการหมุนวนและบริเวณที่ของเหลวไม่เกิดการเคลื่อนที่ (stagnant zone) โดยจากรูปที่ 2.8 จะเห็นถึงขนาดและทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของเหลวภายใน organic และ aqueous phase ซึ่งมีการเคลื่อนที่จากปลายด้านหนึ่งไปยังปลายอีกด้านของ slug ในขณะที่บางส่วนยังคงอยู่ในบริเวณที่ไม่มีการเคลื่อนที่บริเวณปลาย slug ในขณะที่อนุภาคที่เหลือยังคงเคลื่อนที่หมุนวนจากผนังท่อไปยังศูนย์กลางของ slug



รูปที่ 2.8 ภาพแสดงการหมุนวนภายในที่ได้จากการจำลองการไหล a) aqueous slug, b) organic slug [11]

3) CFD Particle Tracing : รูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้ Particle Tracing ที่เวลาต่างๆ กันโดยความเร็วการไหล 5.64 mm/s ซึ่งจะเห็นว่าที่เริ่มต้น ($t=0$) จะเห็นว่ากลุ่มอนุภาคอยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมขนาด 100×100 อยู่ที่ปลายด้านท้ายของ slug เมื่อเวลาผ่านไปอนุภาคจะถูกพัดพาเนื่องจากการไหลของเหลวไปถึงปลายด้านหน้าของ slug และไหลวนไปตามของเหลวภายใน slug ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการหมุนวนที่เกิดขึ้นภายใน slug ในขณะที่เดียวกันเราจะมองเห็นส่วนที่อนุภาคบางส่วนไม่เกิดการเคลื่อนที่ (stagnant zone) โดยจะหยุดนิ่งอยู่ในบริเวณกลางของ slug



รูปที่ 2.9 การหมุนวนภายใน slug ที่ถูกแสดงโดย particle tracing ภายใน aqueous และ organic slugs, $V_{av}=5.64$ mm/s, $d=0.75$ mm [11]

2.3.3 เวลาการหมุนวน

การไหลแบบ slug ถือได้ว่าเป็นรูปแบบการไหลที่ได้รับความนิยมสำหรับนำมาใช้ในกระบวนการต่าง ๆ เนื่องจากความสามารถในการเอาชนะข้อจำกัดเรื่องของการถ่ายเท โดยมีความสามารถในการเพิ่มอัตราการถ่ายเท (มวลและความร้อน) ที่ดีเยี่ยมเมื่อเปรียบเทียบกับ การไหลที่มีรูปแบบการไหลแบบอื่น โดยการถ่ายเทนั้นสามารถเกิดขึ้นผ่าน 2 กระบวนการที่แตกต่างกันคือ 1. การถ่ายเทเนื่องจากการแพร่ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง slug ที่อยู่ติดกันและ 2. การถ่ายเทเนื่องจากการพาภายใน slug โดยได้รับอิทธิพลจากการหมุนวนที่เกิดขึ้นภายใน slug อัตราการถ่ายเทมวลเนื่องจากการพาจะขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการเกิดการหมุนวนภายในแต่ละ slug ซึ่งการหมุนวนนี้ถูกกำหนดโดยเวลาที่เกิดการหมุนวนและรูปแบบการหมุนวน

ความรุนแรงของการหมุนวนนั้นสามารถวัดเป็นปริมาณได้โดยการพิจารณาจากเวลาการหมุนวน (recirculation time) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการไหลของของเหลวที่มีความหนืดที่มีสตรีมไลน์แบบปิด (closed streamline) ซึ่งความเร็วที่ของเหลวเกิดการหมุนวนภายใน slug นั้นมีผลต่อความสามารถในการถ่ายเทมวลและการถ่ายเทความร้อน โดย Shearer [25] ได้กล่าวถึงเวลาการหมุนวนนั้นหมายถึงเวลาที่ของเหลวเคลื่อนที่จากปลายด้านหนึ่งของ slug ไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง เวลาการหมุนวนไร้มิติ (dimensionless recirculation time, τ_{cir}) สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1

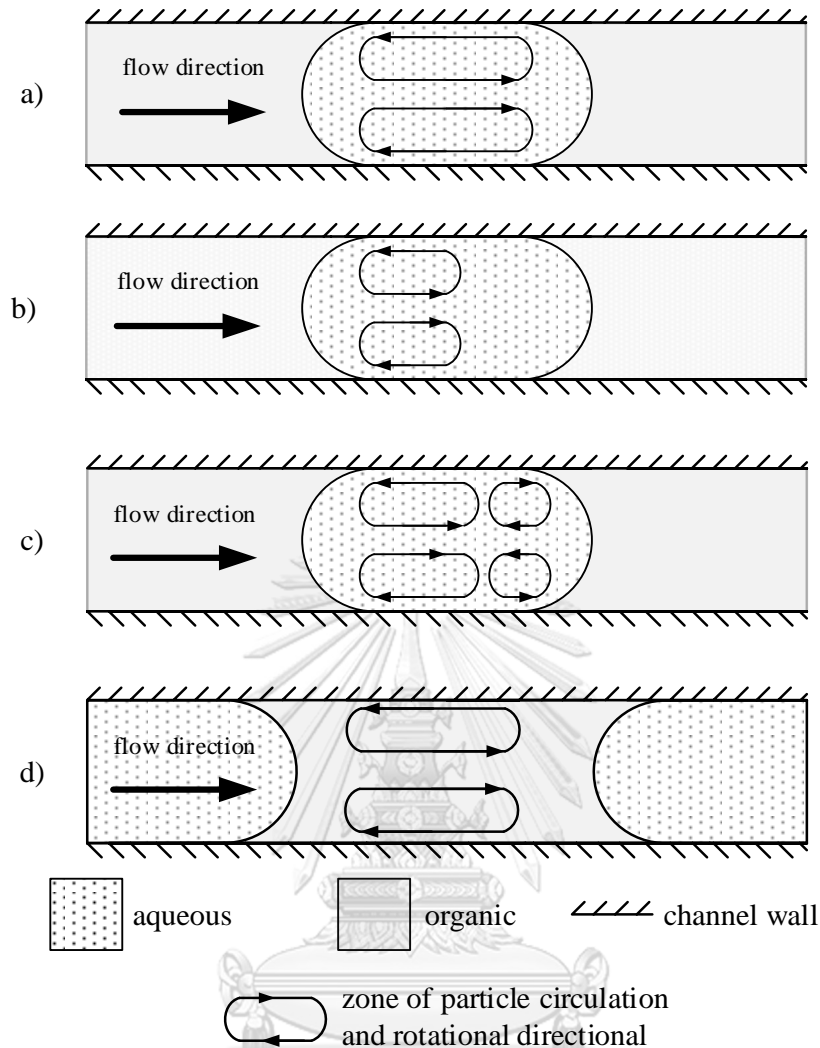
$$\tau_{cir} = \frac{l_s (r^0)^2}{2 \frac{l_s}{U_s} \int_0^{r^0} V(r) r dr} \quad (2.1)$$

เมื่อ l_s คือ ความยาวของ liquid slug, U_s คือ ความเร็วของ slug, r^0 คือระยะทางจากบริเวณของเหลวหยุดนิ่งไปถึงขอบ slug, $V(r)$ คือ รูปแบบความเร็วแบบพาราโบลา (Poiseuille) โดยสำหรับการคำนวณท่อที่มีรูปแบบพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.2 และสมการ 2.3 สำหรับท่อที่มีรูปแบบพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม [26]

$$V(r) = \frac{2U_s}{\psi} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) - U_s \quad (2.2)$$

$$u(x, y) = \frac{3.5568U_s}{\psi} \left[1 - Y^2 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{32(-1)^{n-1} \cosh(C_n X) \cosh(C_n Y)}{[(2n+1)\pi]^3 \cosh(C_n)} \right] \quad (2.3)$$

Ufer et al. [27] ได้ศึกษาการหมุนวนที่เกิดขึ้นภายใน slug ทั้งในระบบของ แก๊ส-ของเหลว และ ของเหลว-ของเหลว โดยติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคของเหลวภายใน slug ด้วยการใส่ อนุภาคเรืองแสง (fluorescent particles) ลงไปในของเหลวที่มีการควบคุมให้เกิดการไหลแบบ slug ซึ่งพบว่าการหมุนวนที่พบในภายใน slug ในระบบของ แก๊ส-ของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.10a การหมุนวนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ครอบคลุมทั้ง slug ในขณะที่การหมุนวนที่พบได้ภายใน slug ของระบบ ที่ประกอบด้วย ของเหลว-ของเหลว นั้นการหมุนวนของเหลวส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณส่วนหน้าของ slug เท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 2.10b รูปแบบการหมุนวนภายใน liquid slug ที่แตกต่างกันนั้น เนื่องมาจากคุณสมบัติของของเหลวทั้งหมดในระบบ เช่น ความหนืด (viscosity) และ แรงตึงผิว (interfacial tension) ทำการศึกษาโดยใช้ระบบที่ประกอบไปด้วย เอทิลอะซิเตท-น้ำ เป็นตัวแทน ของระบบที่มีค่าความหนืดและแรงตึงผิวน้อยจะพบว่ามีสัดส่วนของการผสมกัน (mixed volume fraction) สูงสุดในขณะที่ยากค่าดังกล่าวทั้งสองมีค่ามาก (เช่น บีโตรเลียม) นั้นอนุภาคเรืองแสง ซึ่งจะ ไม่เกิดการเคลื่อนที่ แสดงให้เห็นว่าไม่มีการหมุนวนของอนุภาคของเหลวภายใน slug นอกจากนี้ ความเร็วของ slug ก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดรูปแบบการหมุนวนที่แตกต่างกันภายใน slug โดยที่ความเร็ว slug สูงจะเกิดการหมุนวนที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงข้ามกัน (counter-rotating vortices) ที่บริเวณด้านท้ายของ slug ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเฉือนระหว่างการหมุนวนที่บริเวณ ด้านหน้าของ slug กับบริเวณด้านท้าย slug ที่ของเหลวไม่เกิดการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 2.10c ส่วนการหมุนวนที่พบในอีกวัฏภาคของระบบแสดงในรูปที่ 2.10d



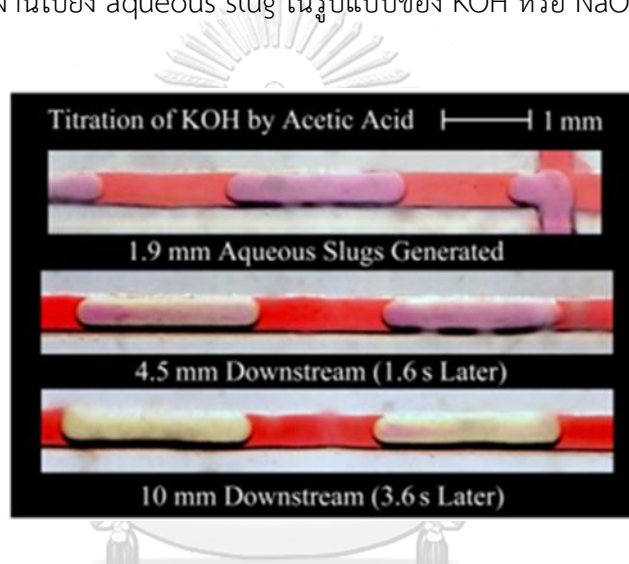
รูปที่ 2.10 รูปแสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใน slug a) การหมุนวนแบบสมมาตร, b) การหมุนวนที่เกิดบริเวณด้านหน้า slug เท่านั้น, c) การหมุนวนแบบสวนทางกันอย่างสมมาตร, และ d) การผสมอย่างสมมาตรภายในภายใน continuous phase [27]

2.4 การถ่ายเทมวล

รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อจุลภาค (micro channel) มีอิทธิพลอย่างมากต่อการพิจารณาอัตราการถ่ายเทในกระบวนการสกัดสารในวัฏภาคของเหลวซึ่งดำเนินการโดยเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาค (micro reactors) และยังมีปัจจัยหลายอีกชนิดที่เกี่ยวข้องกับการการถ่ายเทเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของของเหลว 2 ชนิด ทั้งนี้รูปแบบการไหลที่แตกต่างกันนั้นก่อให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับการแลกเปลี่ยนมวลที่ต่างกันตลอดจนพฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้นภายในที่แตกต่างกันนั้นส่งผลไปยังการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นภายในท่อ โดยทั่วไปแล้วรูปแบบการไหลที่นิยมใช้ศึกษาในเรื่องของ

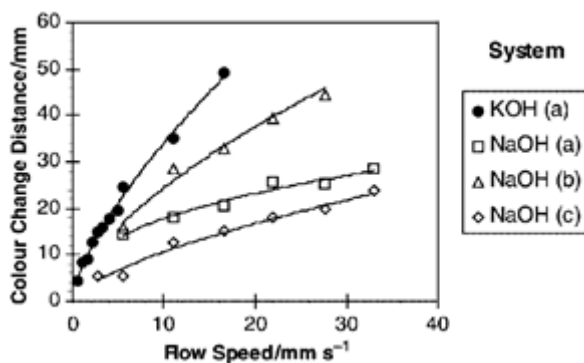
การถ่ายเทมวลนั้นได้แก่รูปแบบการไหลแบบ slug หรือการไหลแบบขนาน (parallel flow) เนื่องจากรูปแบบการไหลทั้งสองรูปแบบนั้นเป็นรูปแบบการไหลที่มีความเสถียร กล่าวคือรูปแบบของการไหลจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อไหลผ่านท่อที่มีความยาวแตกต่างกัน และการที่สามารถควบคุมหรือกำหนดพื้นที่สำหรับการถ่ายโอนมวลได้ก็ทำให้สามารถควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้อีกด้วย

Burns and Ramshaw [21] ได้ทำการศึกษาเพื่อพิจารณาความสามารถในการถ่ายเทมวลจากการสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงของสีเนื่องจากความเป็นกรด-เบสเปรียบเทียบกับค่า pH วิเคราะห์ประสิทธิภาพการไตเตรท (titrate) โดยการวัดระยะทางที่สารใช้ในการเปลี่ยนสี (pH เปลี่ยน) จากค่า pH เริ่มต้นไปยังจุดที่มีค่า pH ที่เท่ากับ 7 การเปลี่ยนแปลงของสีนั้นใช้แสดงถึงโมเลกุลของกรดอะซิติกที่ถูกส่งผ่านไปยัง aqueous slug ในรูปแบบของ KOH หรือ NaOH ดังรูปที่ 2.11

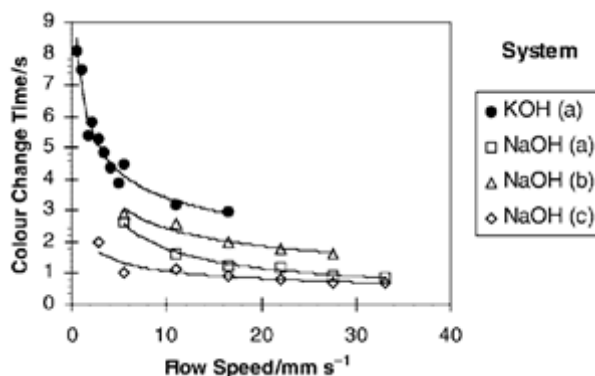


รูปที่ 2.11 การไตเตรทโดยใช้กรดอะซิติกเคลื่อนที่ไปสู่ aqueous phase ที่ประกอบไปด้วย KOH และ ฟีนอลซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวชี้วัด [21]

รูปที่ 2.12 แสดงระยะทางที่ต้องใช้เพื่อให้สีของสารเปลี่ยนแปลงจนเข้าสู่สมดุล เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ใช้ในการทดลอง และรูปที่ 2.13 เป็นการนำผลที่ได้จากรูปที่ 2.12 มาทำการคำนวณให้อยู่ในรูปของเวลาที่เพื่อให้เปลี่ยนสีอย่างสมบูรณ์จากรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่า กรดอะซิติกน้อยที่สุด 62% จะถูกถ่ายเทภายใน 1.6 วินาที ที่ความเร็วการไหล 28 mm/s เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วการไหลที่ 5 mm/s ที่ใช้เวลา 3 วินาทีซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ารูปแบบการไหลแบบ slug นั้นทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลที่ดีกว่าเนื่องจากผลของการหมุนวนภายในเมื่อเปรียบเทียบกับ การไหลแบบขนานที่การถ่ายเทมวลเกิดเนื่องจากการแพร่ที่มาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารเท่านั้น



รูปที่ 2.12 ระยะทางที่ใช้เพื่อให้กระบวนการไตเตรทเข้าสู่สมดุล [21]

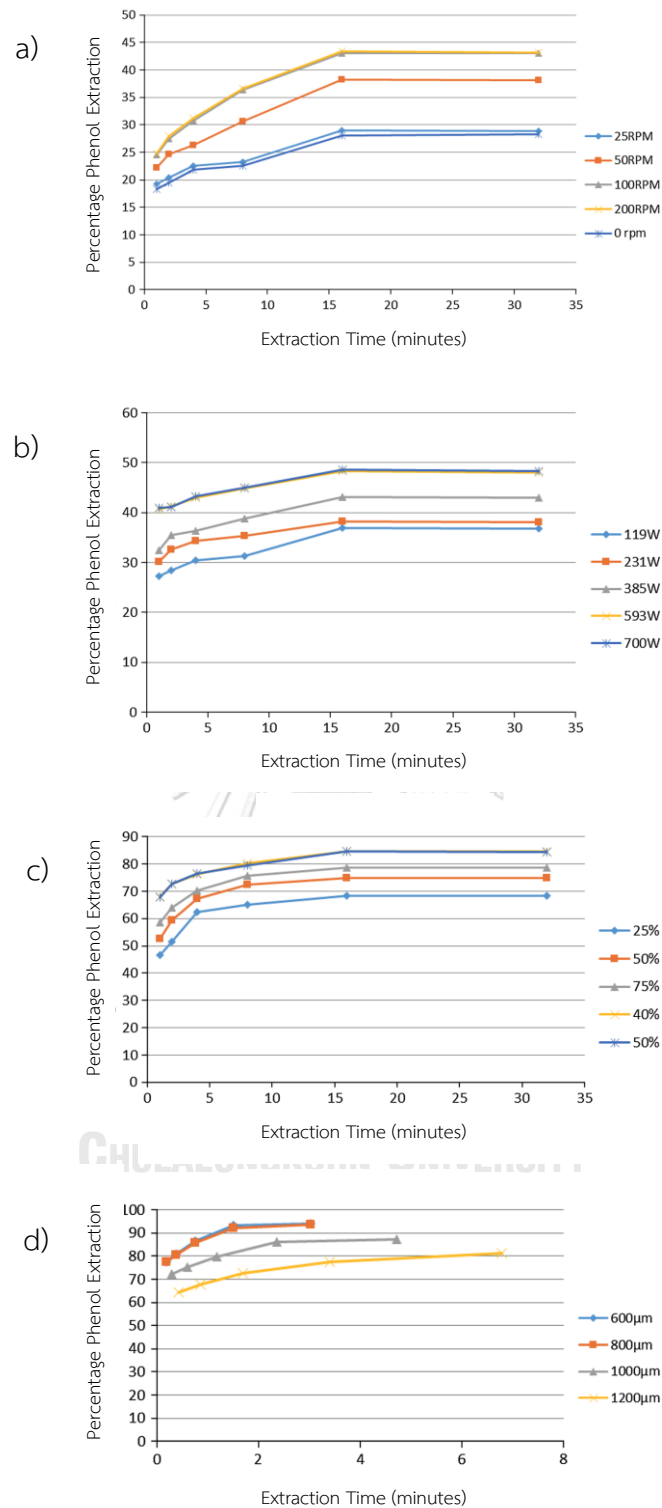


รูปที่ 2.13 ระยะเวลาที่ใช้เพื่อให้กระบวนการไตเตรทเข้าสู่สมดุล [21]

Nandagopal et al. [6] ได้ทำการศึกษาการสกัดสารโรมาติก (ฟีนอล) ในท่อขนาดจุลภาค โดยระบบประกอบไปด้วยโดเดคเคน (dodecane) และน้ำด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อสังเกตประสิทธิภาพในการสกัดสารโดยทำการเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดสารโดยวิธีแบบดั้งเดิม การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการสกัดสารด้วยวิธีการต่าง ๆ ถูกแสดงในรูปที่ 2.14

1. การสกัดโดยใช้ถังกวน (Batch extraction) : ทำการทดลองใน incubator shaker ซึ่งมีความเร็วการเขย่า 30-250 rpm, อุณหภูมิอยู่ในช่วง 30-60 องศาเซลเซียส โดยทดลองทำการสกัดสารในช่วงเวลาที่ต่างกันตั้งแต่ 1, 2, 4, 8, และ 16 นาที และยังมีมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วของการเขย่า (shake) ที่ความเร็วเป็น 0 (ไม่มีการกวนสาร), 25, 50, 100, และ 200 rpm จากนั้นแยกของเหลวสองชนิดออกจากกันแล้วทำการตรวจวัดปริมาณฟีนอลที่ละลายอยู่ในน้ำโดยวิธีการวิเคราะห์โดยใช้ UV spectrophotometer ที่มีความยาวคลื่น 270 nm

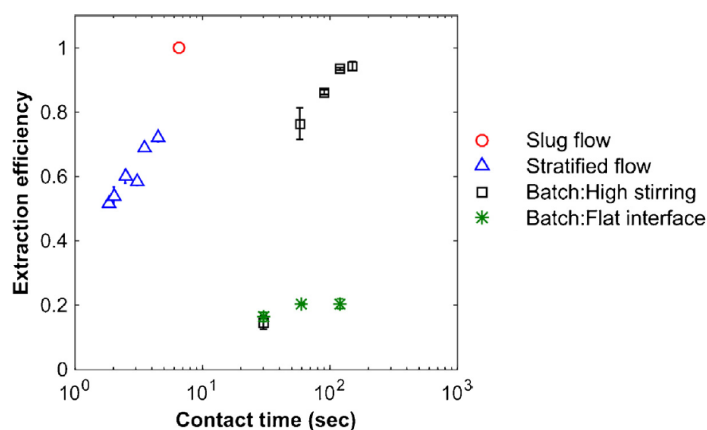
2. การสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟช่วย (Microwave assisted extraction) : สารละลายพีนอล 1000 ppm ที่ละลายใน dedocane ถูกนำไปผสมและถูกปั่นผสมเข้าด้วยกันกับน้ำกลั่นเพื่อทำการแยกสกัดสารโดยอาศัยการกระตุ้นโดยใช้ไมโครเวฟ (Koryo Micowave Oven (KMG 2411)) เป็นตัวช่วยให้เกิดการสกัดได้ดีขึ้น ทำการศึกษาโดยเปลี่ยนแปลงเวลาที่อยู่ไมโครเวฟเป็นเวลา 2, 4, 6, 8, และ 16 นาที และพลังงานของไมโครเวฟที่ใช้เป็น 119, 213, 385, 539 และ 700 W หลังจากนั้นพิจารณาปริมาณของพีนอลที่ถูกสกัดออกมาอยู่ในเฟสของน้ำกลั่น โดยใช้ UV spectrophotometer ที่มีความยาวคลื่น 270 nm เช่นเดียวกับการทดลองโดยวิธีการสกัดโดยใช้ถังกวน
3. การสกัดโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic extraction) : ทำการทดลองการสกัดแยกสารโดยอาศัยความช่วยเหลือจากคลื่นอัลตราโซนิค ที่ความถี่ 20 kHz โดยนำสารละลายพีนอล-dedocane และน้ำกลั่นใส่ลงในชุดการทดลองที่ปริมาตรเท่ากัน 3 มิลลิลิตรทั้งสองชนิด จากนั้นโพรบอัลตราโซนิคจะถูกจุ่มลงไปใของเหลว โดยทำการทดลองที่ Sonicating amplitude 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% โดยเวลาทำการสกัดอยู่ในช่วง 1, 2, 4, 8, 16 และ 32 นาที พิจารณาปริมาณของพีนอลที่ถูกสกัดออกมาอยู่ในเฟสของน้ำกลั่น โดยใช้ UV spectrophotometer ที่มีความยาวคลื่น 270 nm
4. การสกัดสารในท่อจุลภาคที่มีรูปแบบการไหลแบบ slug : ทดลองสกัดสารในท่อขนาดเล็ก (microchannel) ลักษณะของท่อจะเป็นรูปตัว T ซึ่งทำการทดลองที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อต่าง ๆ กัน ที่ 800, 1000 และ 1200 μm ส่วนประกอบของ microchannel สร้างมาจากอีพอกซี (epoxy) ปิ์มที่ใช้ในการทดลองสามารถกำหนดอัตราการไหลอยู่ช่วง 0.5-50 ml/h โดยควบคุมเงื่อนไขการทดลองให้ของเหลวมีลักษณะการไหลแบบ slug flow จากนั้นนำสารที่ผ่านสกัดแล้วไปวิเคราะห์หาความสามารถในการสกัดสาร



รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบร้อยละของฟินอลที่ได้จากการสกัดโดยวิธีการต่าง ๆ, a) การสกัดโดยใช้ถัง กวน, b) การสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟช่วย, c) การสกัดโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกช่วย, และ d) การ สกัดสารในท่อจุลภาค ที่มีรูปแบบการไหลแบบ slug [6]

จากการทดลองเมื่อนำค่าร้อยละของฟินอลที่สกัดได้ร้อยละของการสกัดแยกฟินอลที่ดีที่สุดของแต่ละการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกันกับค่าอ้างอิง (การสกัดสารในถังกวนที่ความเร็วของการเขย่าเป็น 0 rpm หรือไม่มีการเขย่า) พบว่าการสกัดสารโดยการอาศัยคลื่นไมโครเวฟจะทำให้การสกัดสารเพิ่มขึ้น 20%, การสกัดสารโดยใช้คลื่น ultrasonic เพิ่มขึ้น 60%, และการสกัดสารที่เป็นการไหลในรูปแบบของ slug flow พบว่ามีความสามารถในการสกัดสารมากกว่าถึง 70% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง

Sahu et al. [8] ได้ทำการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการสกัดกรดโพรไพโอนิก (propionic acid) จากโทลูอีน (toluene) โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย จากการวิเคราะห์เวลาที่ระบบใช้ในการถ่ายเทมวลเพื่อเข้าภาวะสู่สมดุล โดยเปรียบเทียบระหว่าง การสกัดด้วยตัวทำละลายในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนที่ความเร็วการหมุนสูง 600-1300 rpm และที่ความเร็วการหมุนต่ำ 50 rpm เพื่อเปรียบเทียบกับ การสกัดด้วยตัวทำละลายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาค ทั้งนี้ยังได้ศึกษาความแตกต่างของความสามารถในการถ่ายเทของรูปแบบการไหลแบบ slug และแบบขนาน จากรูปที่ 2.15 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัด จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (K_{la}) ที่ได้จากการทำการสกัดด้วยตัวทำละลายในท่อจุลภาคที่มีรูปแบบการไหลแบบ slug นั้นมีค่ามากกว่า การทำการสกัดสารโดยใช้ถังกวน (batch mode) อยู่ถึง 100 เท่า การสกัดสารในถังกวนซึ่งใช้ความเร็วการกวนสูงจะทำให้ได้ประสิทธิภาพการสกัดอยู่ที่ 90% ภายในเวลา 150 วินาที การสกัดสารในท่อจุลภาคที่มีรูปแบบการไหลแบบขนานมีประสิทธิภาพการสกัดอยู่ที่ 72% ภายในเวลา 5 วินาที และ รูปแบบการไหลแบบ slug จะมีประสิทธิภาพการสกัดอยู่ที่ 100% โดยใช้เวลาเพียง 3.29 วินาที จากผลการทดลองดังกล่าวจึงทำให้เห็นว่าการสกัดสารภายในท่อจุลภาคนั้น รูปแบบการไหลแบบ slug จะทำให้สามารถสกัดสารได้ดีและรวดเร็วกว่าการไหลที่เป็นแบบขนาน (parallel)



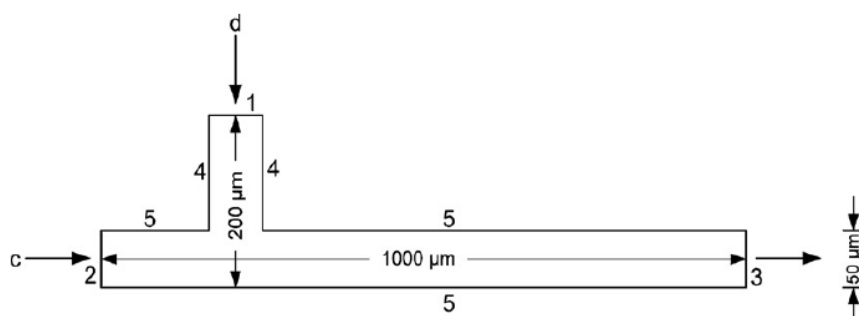
รูปที่ 2.15 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดที่ดำเนินการภายใต้เงื่อนไขการดำเนินการที่แตกต่างกัน 4 แบบ [8]

จากการทำการทดลองที่ผ่านมาจะพบว่า การสกัดสารในวิภูภาคของเหลวที่ทำในท่อจุลภาค (micro-channel) นั้นมีประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลที่ดีกว่าการสกัดสารโดยวิธีแบบอื่น ๆ ที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน และมีความต้องการใช้พลังงานเพื่อดำเนินการต่ำ องค์กรประกอบไม่ซับซ้อน และสามารถแก้ปัญหาที่พบเมื่อทำการสกัดสารโดยวิธีการที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้

2.5 การศึกษาโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

2.5.1 พฤติกรรมการไหลภายในท่อ

เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในของไหลที่ไหลแบบ slug ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาจะพบว่ามีความสามารถในการถ่ายเทมวลมากกว่ารูปแบบการไหลแบบอื่น ได้มีการนำระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาประยุกต์ใช้เพื่อสังเกตพฤติกรรมที่จะเกิดขึ้นภายในการไหล และเพื่อเป็นการลดต้นทุนที่จะเกิดขึ้นจากการทดลองโดย Kashid et al. [24] ได้ทำการศึกษาโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่อจำลองการไหลในท่อที่จะทำให้เกิดรูปแบบ slug โดยได้ผลที่ได้จากการจำลองการไหลนั้นจะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองของ Tice et al. [22] เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองการไหล โดยทำการสร้างแบบจำลองในรูปแบบ 2 มิติ โดยเป็นข้อต่อแบบตัว T ดังรูปที่ 2.16 ใช้ mesh ที่มีรูปแบบโครงสร้างที่เป็นระเบียบ กำหนดให้ความเร็วของสารทั้งสองเป็นการไหลที่มีความเร็วสม่ำเสมอ (uniform flow) และที่ทางออกกำหนดให้เป็นการไหลออกสู่ความดันบรรยากาศ และที่ผนังเป็นเงื่อนไขที่ของไหลไม่เกิดการลื่นไหล (no-slip boundary condition) คุณสมบัติทางกายภาพของสารที่ใช้ในการทดลองและตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองการไหลแสดงในตารางที่ 2.3



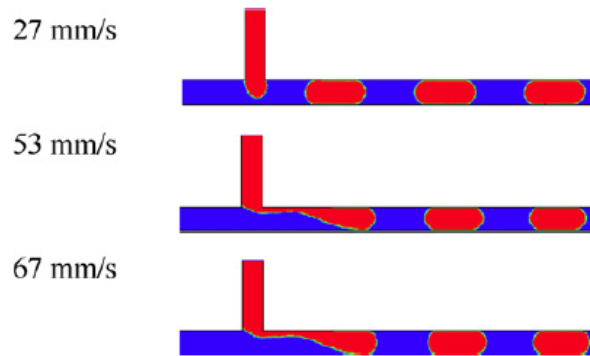
รูปที่ 2.16 แผนผังรูปแบบของแบบจำลองและเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการทดลองโดยที่ c คือ continuous phase, d คือ disperse phase [24]

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของของไหลที่ใช้ในการจำลองการไหล [24]

Property	Parameter	Fluid/value
Density	kg/m ³	Glycerol/water = 998.2 FC-3283/PFO ^a = 780
Dynamic viscosity	kg/m·s	Glycerol/water = 0.002 FC-3283/PFO ^a = 0.018
Interfacial tension	N/m	Glycerol/water vs. FC-3283/PFO ^a = 0.014
Disperse phase fraction	-	0.5
Diameter of MSR	mm	0.05-1
Length of MSR	mm	20xd
Minimum time step	sec	1x10 ⁻⁷
Maximum time step	sec	1x10 ⁻⁵
Mesh size	μm	0.5-2

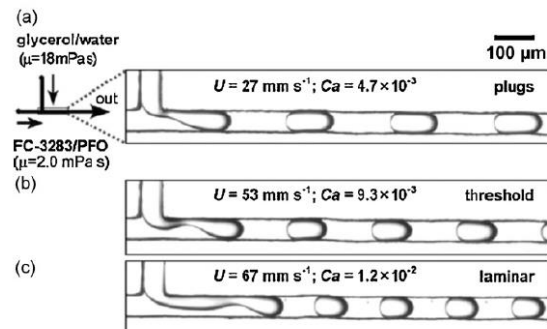
^a 10:1 ส่วนผสมของ 3M fluorinated fluid FC-3238 และ 1H, 1H, 2H, 2H perfluoro-1-octanol (PFO)

รูปที่ 2.17 แสดงการไหลแบบ slug ที่ได้จากการจำลองการไหล โดยเมื่อนำผลจากการจำลองการไหลไปเปรียบเทียบกับกรทดลองในรูปที่ 2.18 ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว สังเกตพบว่าที่ความเร็วการไหลต่ำ ผลที่ได้จะมีลักษณะใกล้เคียงกันมาก เมื่อเพิ่มความเร็วการไหลขึ้นไปจะทำให้รูปแบบการไหลที่พบจากการจำลองการไหลเบี่ยงเบนไปจากการทดลองเล็กน้อย ทั้งนี้คาดว่าเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลสืบเนื่องมาจากขนาดของ mesh ที่ใช้ในการคำนวณซึ่งสามารถกำหนดให้มีความละเอียดมากขึ้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนนี้ได้ อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองดังกล่าวทำให้เห็นว่าการศึกษการไหลแบบ slug โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นสามารถทำนายพฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 2.17 ภาพถ่ายการจำลองการไหลโดยใช้เงื่อนไขการดำเนินการเดียวกันกับการทดลองของ

Tice et al. [24]



รูปที่ 2.18 รูปแบบพฤติกรรมการไหลของของไหลที่มีความหนืดที่ได้จากการสังเกตที่ไหลโดยค่า Capillary number ต่างกันในท่อที่มีขนาดภาพตัดขวางขนาด $50 \times 50 \mu\text{m}$, a) $Ca = 4.7 \times 10^{-3}$ m, b)

$Ca = 4.7 \times 10^{-3}$ m, c) $Ca = 4.7 \times 10^{-3}$ m [22]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.2 พฤติกรรมการถ่ายเทมวล

แม้ว่าจะมีการศึกษาการไหลในท่อจุลภาคโดยใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณอยู่มาก แต่การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทมวลโดยใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นยังคงทำได้ยาก เนื่องจากความแตกต่างในรายละเอียดของกลไกการถ่ายเทในแต่ละระบบ ทำให้ไม่มีแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับทุกระบบการไหลโดย

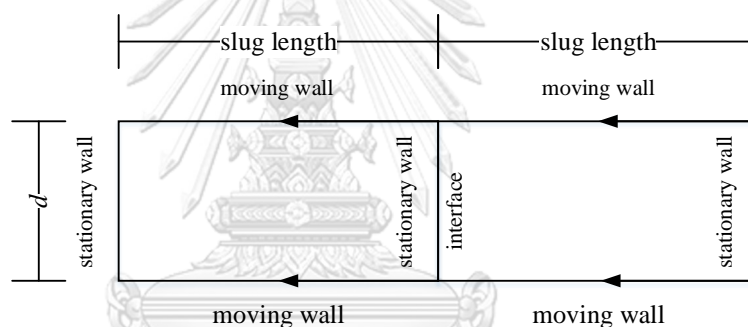
แบบจำลอง volume of fluid เป็นหนึ่งในวิธีการที่เหมาะสมสำหรับใช้เพื่อศึกษาการไหลของของเหลวที่ไม่ละลายเข้าหากันเมื่อต้องการระบุตำแหน่งของผิวสัมผัสระหว่างของเหลว 2 ชนิด แต่ไม่สามารถพิจารณาการถ่ายเท (มวลและความร้อน) บริเวณผิวสัมผัสของ slug ร่วมกับแบบจำลองดังกล่าวได้เนื่องจากสมมุติฐานในการสร้างแบบจำลอง volume of fluid ที่กำหนดว่าไม่มีการถ่ายเทระหว่างผิวสัมผัส อย่างไรก็ตามสามารถทำการจำลองการถ่ายเทมวลระหว่างพื้นผิวได้โดยการพัฒนาโปรแกรม (UDF) เพื่อระบุกลไกและพฤติกรรมการถ่ายเทมวลระหว่าง slug ได้

Zhang et al. [28] ได้อธิบายถึงวิธีการเพื่อจำลองพฤติกรรมการถ่ายเทมวลโดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน

1. ศึกษาพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์จากนั้นเก็บข้อมูลขนาดและความเร็วของ slug โดยใช้แบบจำลอง volume of fluid ร่วมกับ free surface capturing

2. ใช้แบบจำลอง unit cell (รูปที่ 2.19) ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบโดยใช้ข้อมูลของขนาดและความเร็วของ slug ที่ได้จากขั้นตอนแรกโดยผนังด้านบนและด้านล่างของ slug จะกำหนดให้เป็น moving wall ที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วของ slug ผนังด้านข้างกำหนดให้เป็น stationary wall ทำการคำนวณเพื่อสร้างสนามการไหลภายใน

3. สร้างโปรแกรมที่กำหนดโดยผู้ใช้ (user defined function) เพื่อระบุกลไกการถ่ายเทมวลของระบบ เพื่อใส่เป็นเงื่อนไขขอบที่ผนังที่เป็นผิวสัมผัส (interface) ตั้งเวลาการคำนวณใหม่ให้อยู่ที่วินาทีที่ 0 เริ่มทำการคำนวณเพื่อศึกษาการถ่ายเทมวลระหว่าง slug



รูปที่ 2.19 การกำหนดเงื่อนไขขอบในแบบจำลอง unitcell

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

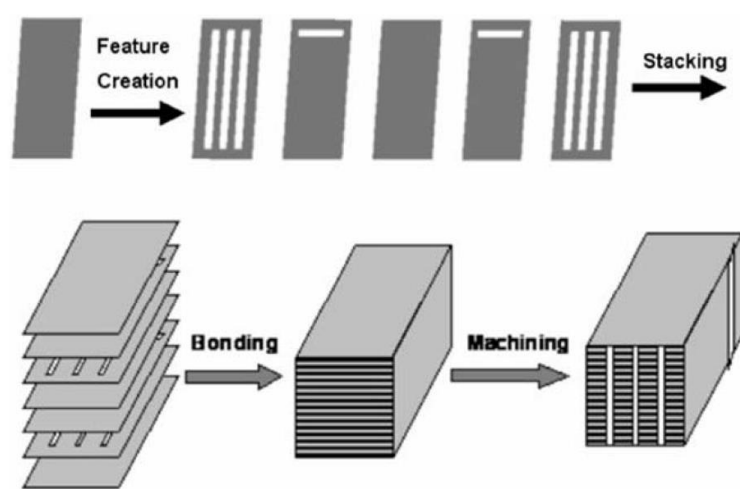
2.6 วิธีการเพิ่มปริมาณผลผลิต

จากการสกัดสารในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคได้รับการศึกษาและยอมรับว่ามีประสิทธิภาพการสกัดสารดีขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับสกัดสารโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไป แต่เนื่องจากการที่เครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคนั้นมีขนาดเล็ก อัตราการไหลเชิงปริมาตรอยู่ในระดับต่ำ จึงได้มีความพยายามในการศึกษาการเพิ่มขนาดเครื่องปฏิกรณ์ โดยวิธีการที่น่าสนใจสามารถสรุปได้ดังนี้

2.6.1 การเพิ่มจำนวนท่อ

เครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคเป็นที่สนใจสำหรับการนำมาใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมเคมี ซึ่งการเพิ่มปริมาณการผลิตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้ได้ปริมาณการผลิตที่เหมาะสมในการใช้งานจริงนั้นยังคงอยู่ในช่วงการศึกษา

Tonkovich et al. [29] ได้ศึกษาการเพิ่มผลผลิตด้วยการเพิ่มจำนวนท่อในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งความสามารถในการสกัดที่เพิ่มขึ้นนั้นมาจากจำนวนท่อที่ใช้เพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.20) ด้วยวิธีการดังกล่าว ทำให้สามารถคงประสิทธิภาพการสกัดโดยเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคไว้ได้ ถึงกระนั้นการออกแบบอุปกรณ์กระจายของไหล (manifold) เพื่อให้การไหลในแต่ละท่อนั้นเหมือนกัน และการสร้างอุปกรณ์ยังเป็นอุปสรรคในการดำเนินการ



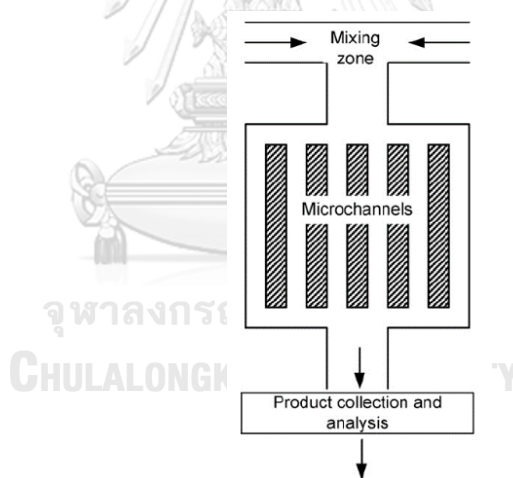
รูปที่ 2.20 ขั้นตอนการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาค [29]

การเพิ่มจำนวนของท่อ (numbering up) เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เพื่อใช้เพิ่มปริมาณผลผลิตที่ได้จากการสกัดสารในท่อจุลภาคเนื่องจากคงประสิทธิภาพที่ได้จากการดำเนินการโดยเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคและความสามารถในการทำงานระดับอุตสาหกรรม ในกรณีของการไหลที่เป็นการไหลของของเหลว 2 ชนิดที่มีรูปแบบการไหลแบบ slug ประเด็นสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาในการเพิ่มจำนวนของท่อนอกจากการกระจายการไหลแล้ว ขนาดของ slug ควรจะมีขนาดที่เท่ากันในทุกท่อ เพราะขนาดของ slug นั้นส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาค การเพิ่มจำนวนท่อนั้นยังสามารถแบ่งออกได้เป็นอีก 2 วิธี ดังต่อไปนี้

2.6.1.1 เพิ่มจำนวนท่อแบบภายใน

รูปแบบของการเพิ่มจำนวนท่อแบบภายในรูปแบบของ internal numbering-up ดังแสดงในรูปที่ 2.21 เป็นการผสมที่ของเหลวทั้งสองชนิดจะไหลมาผสมกันก่อนที่ mixing zone หลังจากผสมเข้าด้วยกันแล้ว slug จะไหลต่อไปยังท่อจุลภาคที่วางตัวขนานกัน ซึ่งจะมีข้อดีก็คือจะใช้จำนวนปั๊มน้อย และจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์นี้มี mixing element เพียงจุดเดียวซึ่งหมายความว่าอุปกรณ์ที่ใช้

เพิ่มปริมาณผลผลิตแบบ Internal numbering-up มีความต้องการใช้ปั๊มเพียงแค่ 2 ตัวเท่านั้น อย่างไรก็ตาม การที่จะรักษารูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นเมื่อของเหลวทั้งสองชนิดไหลมาผสมกันที่ mixing element เป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เนื่องจากจำเป็นต้องควบคุมความดันตกคร่อมให้มีขนาดเท่ากันทุกท่อ ในกรณีที่เป็นการไหลแบบวัฏภาคเดียว (single phase) ความดันตกคร่อมนั้นเกิดจากผลของ venture effect ที่บริเวณทางเข้าหรือทางออกของท่อเท่านั้น ซึ่งช่วยให้การกระจายตัวของของเหลวเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามกรณีที่เกิดการไหลแบบ 2 วัฏภาคนั้น ความดันตกคร่อมจะเกิดจากแรงตึงผิว (surface tension) และความดันลาปลาซ (Laplace pressure) ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของ slug ถ้าหากว่าขนาดของ slug ในท่อใดท่อหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ความดันตกคร่อมในท่อนั้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยซึ่งนำไปสู่การกระจายตัวของสารไหลที่ไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าความดันตกคร่อมจะมีขนาดเท่ากันในทุกท่อจุลภาค แต่ขนาดของ slug ก็อาจจะไม่เท่ากันในทุกท่อ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของแต่ละท่อนั้นไม่เท่ากันเนื่องจากความแตกต่างของพื้นที่ผิวสัมผัส (interfacial area) วิธีการเอาชนะปัญหานี้ที่ได้รับความนิยมก็คือการใช้ท่อพร้อม (manifold) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้ความดันกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอที่ทางเข้าของทุกท่อ

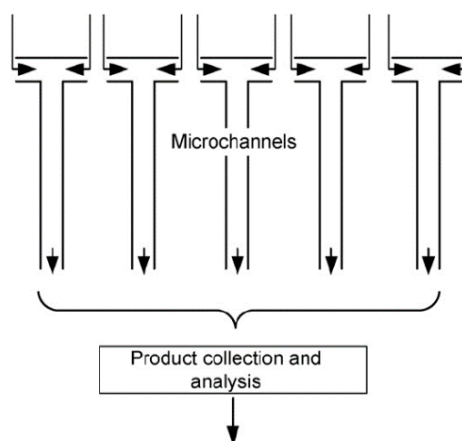


รูปที่ 2.21 เพิ่มจำนวนท่อแบบภายใน [16]

2.6.1.2 เพิ่มจำนวนท่อแบบภายนอก

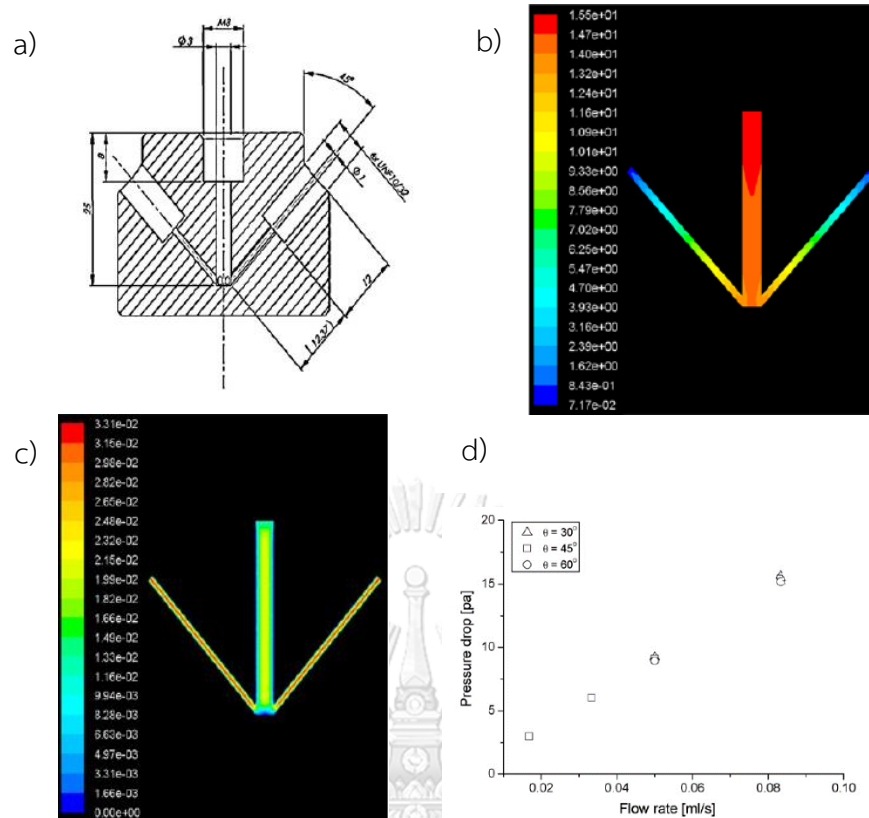
รูปที่ 2.22 แสดงการเพิ่มจำนวนท่อแบบภายนอก โดยของเหลวทั้ง 2 ชนิดจะไหลเข้ามายัง mixing element ของแต่ละท่อจุลภาค ซึ่งข้อดีของวิธีการนี้คือยังคงประสิทธิภาพของการสกัดเหมือนกับที่ได้จากการสกัดสารในท่อเดี่ยวแต่ทำให้ได้ปริมาณผลผลิตรวมเพิ่มมากขึ้น แต่ก็ทำให้มีราคาสูงขึ้นเนื่องจากราคาอุปกรณ์และขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดของวิธีการนี้ จากที่ได้กล่าวใน

ข้างต้น การเพิ่มจำนวนท่อทั้ง 2 แบบนั้นก็จะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งจุดสำคัญที่ต้องพิจารณาคือต้องมีการกระจายตัวของแต่ละวัสดุภาคที่แม่นยำ และต้องรักษาประสิทธิภาพหรือข้อดีที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคให้ได้ หรืออาจกล่าวโดยย่อคือเพิ่มจำนวนของท่อเพื่อให้ได้ผลผลิตเพิ่มขึ้นแต่ยังคงรักษาประสิทธิภาพที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคไว้



รูปที่ 2.22 เพิ่มจำนวนท่อแบบภายนอก [16]

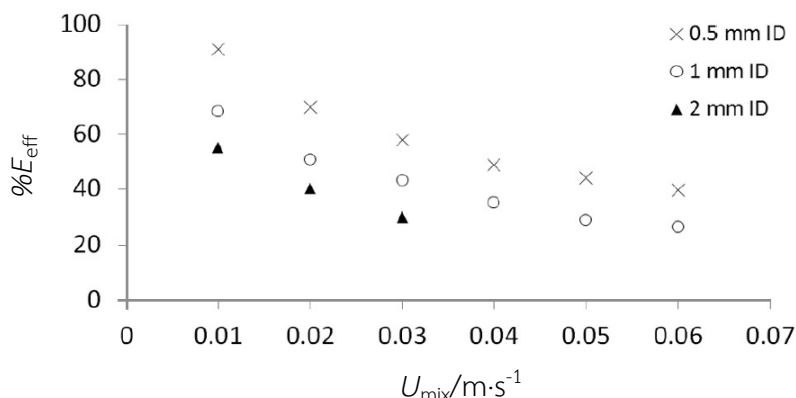
Kashid et al. [16] ได้นำข้อได้เปรียบทั้งสองมาทำการออกแบบหัวจ่ายสำหรับส่งของเหลวแต่ละชนิดเข้าสู่ท่อจุลภาค โดยวัสดุที่นำมาผลิตหัวจ่ายทำมาจาก Teflon[®] โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางเข้าเท่ากับ 3 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อทางออกของของเหลวมีขนาด 1 mm โดยท่อทางออกจะเอียงทำมุม 45 องศาเมื่อเทียบกับท่อทางเข้า โดยที่ไม่ต้องมีอุปกรณ์สำหรับควบคุมการไหลที่ต้องใช้พลังงาน ของเหลวจะถูกส่งเข้าสู่หัวจ่ายโดยปั๊มเข้าสู่หัวจ่ายเพียงท่อเดียวและออกจากหัวจ่ายจำนวน 6 ท่อ จากลักษณะของหัวจ่ายที่ออกแบบและความดันตกคร่อมที่เท่ากันที่ทุกทางออกของท่อจุลภาคทำให้สามารถแบ่งการไหลออกได้เท่ากันดังแสดงในรูปที่ 2.23 พบว่ามีความดันตกคร่อมต่ำและการไหลของของเหลวเท่ากันทุกทางออก นอกจากนั้นยังพบว่าผลของมุมที่ท่อทางออกซึ่งอ้างอิงกับทางเข้าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนความดันตกคร่อม



รูปที่ 2.23 แผนผังแสดงรูปแบบของหัวจ่ายสำหรับการไหล, a) แผนผัง, b) ความดันตกคร่อม, c) ขนาดความเร็ว, d) ความดันตกคร่อมภายในหัวจ่ายที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลสำหรับค่ามุมของทางเข้าเทียบกับทางออกที่ต่างกัน [16]

2.6.2 การขยายขนาดท่อ

เป็นอีกวิธีที่จะใช้เพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิตได้แต่ที่ผ่านมามีการศึกษาการสกัดด้วยตัวทำละลายซึ่งยังคงไม่เป็นที่แพร่หลายนัก [4] ที่ผ่านมามีการศึกษาผลจากการเพิ่มขนาดท่อที่มีต่อความสามารถในการสกัดโดย Tsoulidis and Angeli et al. [30] ได้ศึกษาผลการเพิ่มขนาดท่อที่มีต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลในกระบวนการสกัด $[\text{UO}_2]^{2+}$ ออกจากสารละลายกรดไนตริกที่มีการไหลแบบ slug ในท่อที่มีขนาดตั้งแต่ 0.5-2 mm พบว่าประสิทธิภาพการสกัดเพิ่มขึ้นเมื่อดำเนินการในท่อที่มีขนาดเล็กลงโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเปลี่ยนแปลงในช่วง $0.049-0.29 \text{ s}^{-1}$



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลและความเร็วการไหลในท่อยาว 10.5 cm ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน

จากรูปที่ 2.24 แสดงให้เห็นถึงผลจากความเร็วมวลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลของแต่ละขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่มีความยาวท่อเดียวกัน ($L_{ch}=10.5$ cm) ความเร็วของมวลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการสกัดลดลงเนื่องจาก residence time ที่ต้องใช้ในการถ่ายเทมวลนั้นลดลง และเมื่อพิจารณาของผสมที่มีความเร็วการไหลเท่ากันประสิทธิภาพการสกัดจะเพิ่มขึ้นเสมอเมื่อท่อมีขนาดเล็กลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดของท่อในเครื่องปฏิกรณ์นั้นส่งผลให้ความสามารถในการสกัดนั้นลดลง เพื่อให้เข้าใจถึงผลจากการเพิ่มขนาดท่อที่มีต่อปัจจัยอื่น ๆ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลจากการเพิ่มขนาดท่อต่อพฤติกรรมของของเหลวที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการถ่ายเทมวล เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประกอบการพิจารณาการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างการไหลแบบ slug เพื่อใช้งานในระดับที่ใหญ่ขึ้น

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎี

3.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นเป็นศาสตร์อีกสาขาหนึ่งที่ยิมนำมาใช้เพื่ออธิบายกลศาสตร์ของของไหลโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) โดยทำการพิจารณาแบบจำลองของสมการอนุรักษ์ต่าง ๆ ร่วมกับสมการความสัมพันธ์ (สมการช่วย) และแบบจำลองอื่นที่เกี่ยวข้อง

3.2 แบบจำลองการไหลแบบหลายวัฏภาค

ในการศึกษานี้เลือกใช้แบบจำลอง volume of fluid ในการศึกษาพฤติกรรมของการไหลแบบ slug ภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ถูกขยายขนาด เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่สามารถคำนวณการไหลแบบหลายวัฏภาคได้อย่างแม่นยำ

3.2.1 แบบจำลอง Volume of Fluid

แบบจำลอง volume of fluid (VOF) ออกแบบมาสำหรับการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการไหลที่ประกอบไปด้วยของเหลวตั้งแต่สองชนิดหรือมากกว่านั้น โดยที่ของเหลวนั้นไม่ละลายเข้าหากัน (immiscible fluids) ที่ต้องการความแม่นยำในการระบุตำแหน่งผิวสัมผัส (interface) ระหว่างของไหล และถูกนำมาใช้กับงานวิจัยนี้เนื่องจากเป็นแบบจำลองเพียงชนิดเดียวที่สามารถใช้ในการระบุตำแหน่งของขอบเขตระหว่างของเหลวได้อย่างชัดเจน โดย VOF ถูกนำมาใช้ในการศึกษาติดตามการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของพื้นที่ผิวสัมผัส (surface-tracking) ซึ่งถูกพัฒนาเพื่อแก้ปัญหาจากการติดตามการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผิวสัมผัสระหว่างของเหลวที่ไม่มีความละเอียดเพียงพอของแบบจำลอง Eulerian, การคำนวณของแบบจำลอง VOF ของไหลจะใช้ชุดสมการโมเมนตัมร่วมกันและมีการติดตามสัดส่วนโดยปริมาตร (volume fraction) ของของไหลแต่ละชนิดตลอดทั้งโดเมน โดยจะพิจารณาว่าภายในแต่ละปริมาตรควบคุมสัดส่วนโดยปริมาตรของทุกวัฏภาคเมื่อนำมารวมกันจะต้องมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งตัวแปรและคุณสมบัติสำหรับสารทุกชนิดที่ถูกนำมารวมนั้นจะถูกนำมาใช้ร่วมกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าตัวแปรต่าง ๆ ตลอดจนคุณสมบัติในแต่ละเซลล์ที่นำมาคำนวณอาจแสดงในค่าคุณสมบัติของวัฏภาคใด ๆ หรืออาจอยู่ในรูปของคุณสมบัติของวัฏภาคของสารผสม ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า

ของสัดส่วนโดยปริมาตร หรืออาจกล่าวได้ว่าหาก q^m คือของไหลซึ่งมีสัดส่วนโดยปริมาตรภายใน เซลล์คือ α_q จะมีเงื่อนไขที่เกิดขึ้นได้ 3 อย่างคือ

1. $\alpha_q = 0$ คือ เซลล์ไม่มีของเหลว q อยู่
2. $\alpha_q = 1$ คือ เซลล์มีของเหลว q อยู่เต็ม
3. $0 < \alpha_q < 1$ คือ เซลล์ที่มีผิวสัมผัสระหว่างของเหลว q และวัฏภาคอื่น ๆ

3.2.2 สมการสัดส่วนโดยปริมาตร

การติดตามตำแหน่งของผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคที่ได้จากการแก้ปัญหาของสมการความต่อเนื่องสำหรับสัดส่วนโดยปริมาตร (volume fraction) ของ 1 วัฏภาคหรือมากกว่าซึ่งสมการที่ใช้จะแสดงในสมการ 3.1

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (3.1)$$

เมื่อ

\dot{m}_{qp} คือการถ่ายเทมวลจากของเหลว p ไปยังของเหลว q

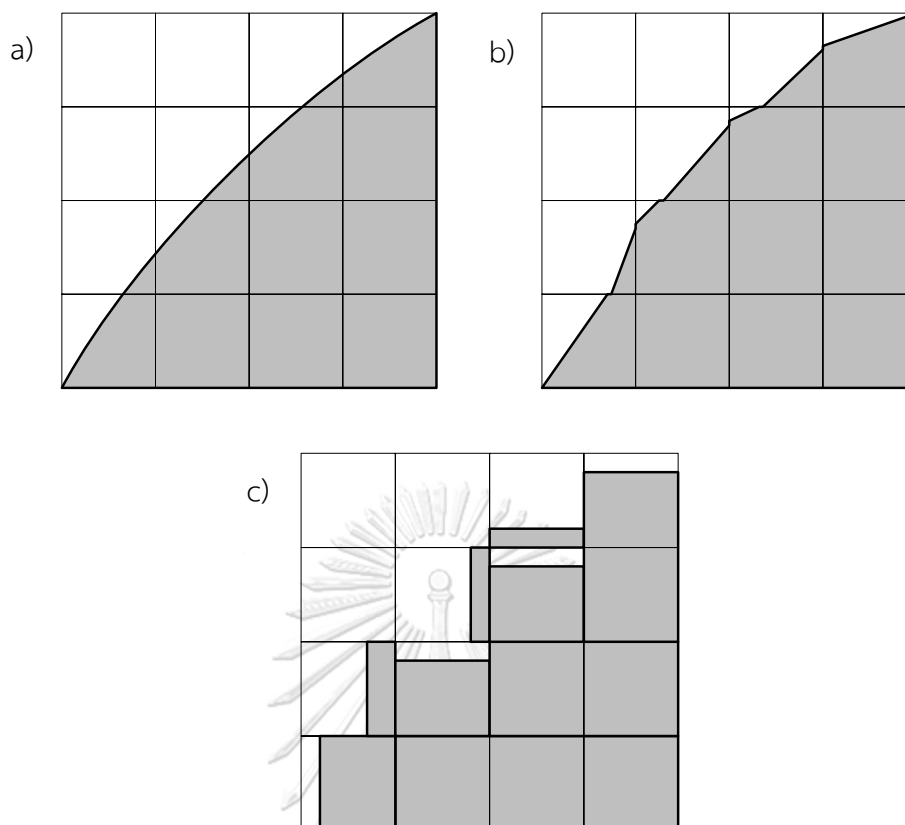
\dot{m}_{pq} คือการถ่ายเทมวลจากของเหลว q ไปยังของเหลว p

เมื่อเริ่มการคำนวณสมการสัดส่วนโดยปริมาตรสำหรับวัฏภาคปฐมภูมิ (primary phase) จะยังไม่ถูกนำมาคำนวณและจะถูกกำหนดให้สัดส่วนโดยปริมาตรของภายในแต่ละปริมาตรควบคุมมีค่าเท่ากับ 1 ดังสมการ 3.2

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (3.2)$$

3.2.3 การประมาณค่าที่ผิว

ในโปรแกรม ANSYS FLUENT 17.2 นั้นต้องการวิธีการประมาณแบบพิเศษสำหรับเซลล์ที่อยู่ใกล้ผิวสัมผัสระหว่างของเหลว 2 วัฏภาคจากรูปที่ 3.1a-c แสดงให้เห็นถึงลักษณะของผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับลักษณะของผิวสัมผัสที่ได้จากการประมาณโดยวิธีการต่าง ๆ



รูปที่ 3.1 รูปแบบของผิวสัมผัสที่ได้จากการประมาณโดยวิธีการต่าง ๆ, a) รูปแบบของผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นจริง, b) รูปแบบของผิวสัมผัสจากวิธี Geometric Reconstruction, c) รูปแบบของผิวสัมผัสจากวิธี Donor-Acceptor [17]

ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้วิธีการประมาณค่าเพื่อหาพื้นผิวที่อยู่ระหว่างของเหลวโดยใช้วิธี Geometric Reconstruction Scheme โดยในขั้นแรกจะทำการคำนวณตำแหน่งของ linear interface โดยเทียบกับจุดศูนย์กลางของแต่ละเซลล์ที่ถูกเติมเต็มเพียงบางส่วน (partially-filled cell) ซึ่งพิจารณาจากสัดส่วนโดยปริมาตร (volume fraction) และอนุพันธ์ภายในเซลล์ ต่อมาทำการคำนวณปริมาณของของไหลที่ถูกพาผ่านแต่ละพื้นผิวโดยใช้การคำนวณผิวสัมผัส (interface) แบบเชิงเส้น (linear interface) และความเร็วที่ไหลแบบตั้งฉากและไหลแบบสัมผัสพื้นผิว ขั้นตอนสุดท้ายคือการคำนวณสัดส่วนปริมาตร (volume fraction) ภายในแต่ละเซลล์โดยอาศัยสมมูลจากการไหลที่ได้จากการคำนวณในขั้นตอนก่อนหน้านี้ โดยคุณสมบัติของของไหลที่ปรากฏในสมการขนส่งนั้นจะปรากฏในรูปแบบขององค์ประกอบในแต่ละปริมาตรควบคุม โดยที่งานวิจัยนี้เป็นระบบที่ประกอบไปด้วยของเหลว 2 ภูมิภาค และมีการติดตามสัดส่วนโดยปริมาตรของภูมิภาคที่ 2 ความหนาแน่นเฉลี่ยภายในแต่ละเซลล์ที่ทำการคำนวณสามารถหาได้จากสมการ 3.3

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (3.3)$$

โดยที่สมการทั่วไปสำหรับใช้ระบบที่ประกอบด้วยของไหล n ภูมิภาค ความหนาแน่นที่เฉลี่ยจากสัดส่วนโดยปริมาตรจะสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.4

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (3.4)$$

3.3 สมการควบคุม

สมการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อน ประกอบไปด้วยสมการการอนุรักษ์มวล, สมการการอนุรักษ์โมเมนตัม, และสมการการอนุรักษ์พลังงานดังนี้

3.3.1 สมการอนุรักษ์มวล

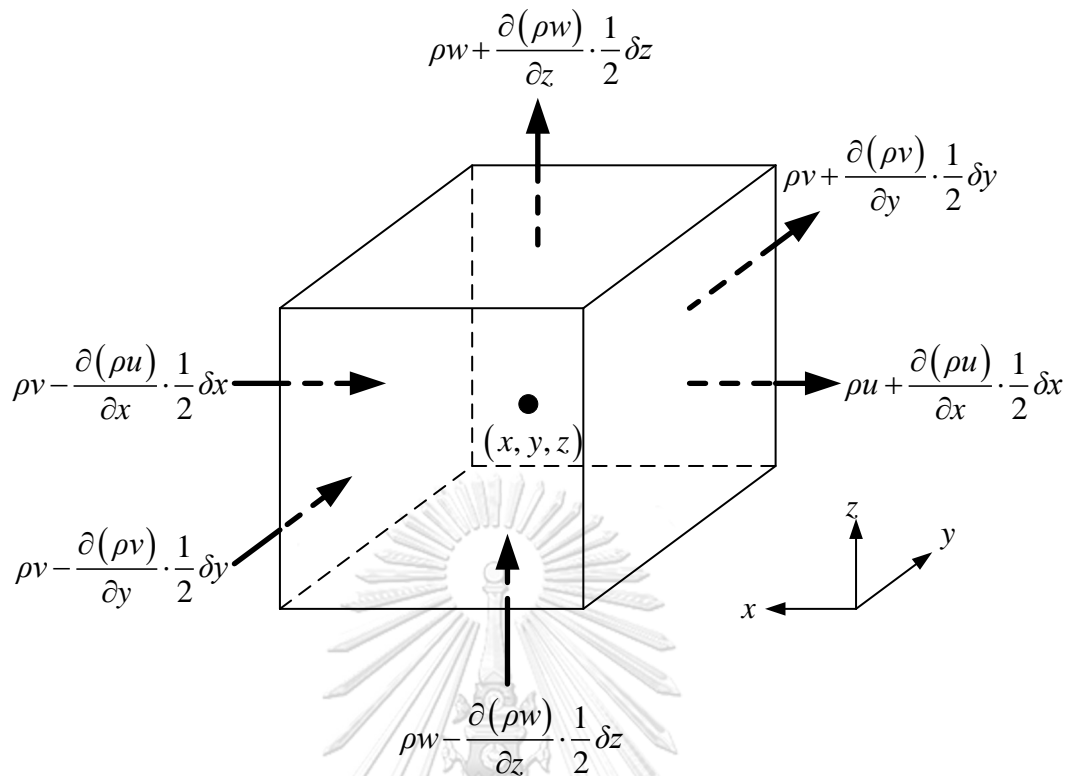
สมการการอนุรักษ์มวลคือการพิจารณาถึงสมดุลระหว่างมวลที่เข้าและออกจากปริมาตรควบคุมหรืออาจกล่าวได้ว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของมวลใน fluid element จะต้องเท่ากับอัตราการไหลสุทธิของมวลที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม การไหลของมวลที่ผ่านเข้าออกจากปริมาตรควบคุมแสดงในรูปที่ 3.2 โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของมวลภายในปริมาตรควบคุมถูกแสดงในสมการ 3.5

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \delta x \delta y \delta z) \quad (3.5)$$

โดยสมการอนุรักษ์มวลหรือที่รู้จักกันในชื่อของ ‘สมการความต่อเนื่อง’ ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบเวกเตอร์ได้ดังสมการ 3.6

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (3.6)$$

สามารถพิจารณาการไหลเข้าและออกของมวลผ่านแต่ละพื้นผิวของปริมาตรควบคุมได้จากผลคูณระหว่างความหนาแน่น, พื้นที่, และองค์ประกอบของความเร็วที่มีทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวโดยที่สมการอนุรักษ์มวลในแกนต่าง ๆ ดังแสดงในสมการ 3.7-3.9



รูปที่ 3.2 มวลที่ไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม

สมการอนุรักษ์มวลในแนวแกน x

$$\left(\rho v - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z \quad (3.7)$$

สมการอนุรักษ์มวลในแนวแกน y

$$\left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \quad (3.8)$$

สมการอนุรักษ์มวลในแนวแกน z

$$\left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \quad (3.9)$$

สมการอนุรักษ์มวลภายในของเหลววิฤภาค q

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \bar{v}_g) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{m,q} \quad (3.10)$$

เมื่อ

\vec{V}_g คือความเร็วของเหลววิภูภาค q (m/s)

\dot{m}_{pq} คือมวลที่ถ่ายเทระหว่างของเหลววิภูภาค p ไปยังของเหลววิภูภาค q ($\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$)

$S_{m,q}$ คือแหล่งที่มาของของเหลวจากวิภูภาค q ($\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$)

3.3.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's second law) ที่กล่าวว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมในอนุภาคของไหลจะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงบนอนุภาคของเหลว ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัมในแนวแกน x -, y -, z - บนปริมาตรควบคุมของอนุภาคของเหลวที่ทำการพิจารณาจะเขียนได้ดังนี้

$\rho \frac{Du}{Dt}$ คือแรงในแนวแกน x

$\rho \frac{Dv}{Dt}$ คือแรงในแนวแกน y

$\rho \frac{Dw}{Dt}$ คือแรงในแนวแกน z

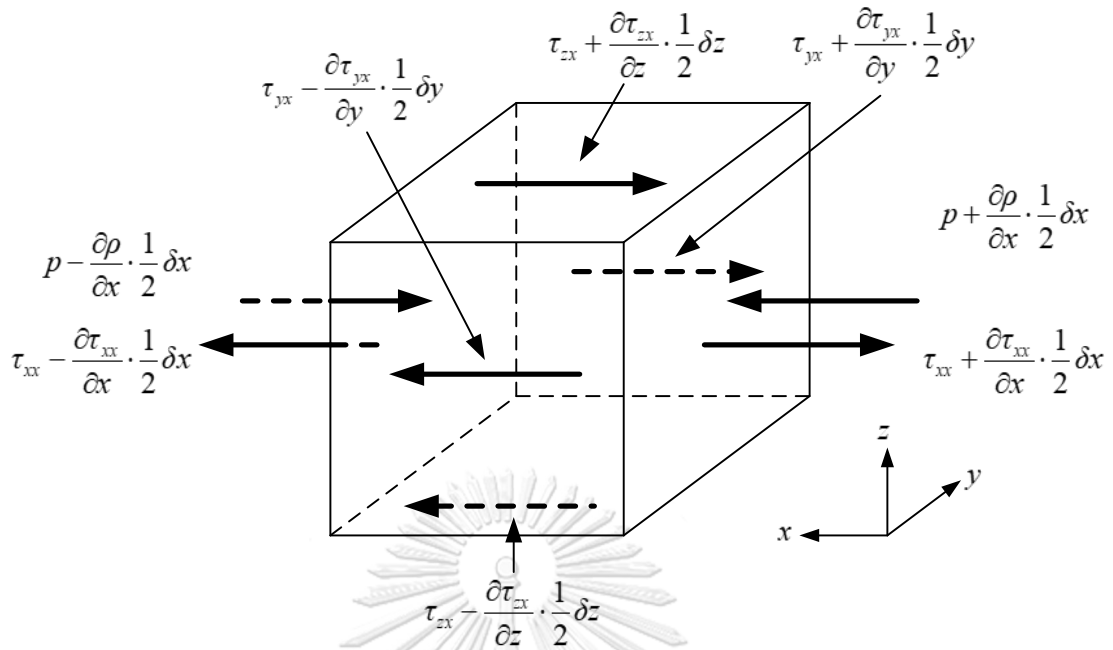
แรงที่กระทำบนอนุภาคของไหลสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ชนิดได้แก่

- 1) แรงที่กระทำพื้นผิวของปริมาตรควบคุม (surface force) เช่น แรงจากความดัน, แรงจากความหนืด, แรงเสียดทานที่ผนัง เป็นต้น
- 2) แรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหลโดยที่ไม่ได้มีการสัมผัสกันโดยตรง (body force) เช่น แรงโน้มถ่วง, แรงหนีศูนย์กลาง, และแรงจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น

เมื่อนำแรงทั้งสองชนิดดังที่กล่าวมารวมเข้าด้วยกันตามกฎของนิวตันจะได้สมการที่ 3.11

$$\rho \frac{Du}{Dt} + \rho \frac{Dv}{Dt} + \rho \frac{Dz}{Dt} = \vec{f}_{surface} + \vec{f}_{body} = \vec{f}_i \quad (3.11)$$

โดยปกติแล้วเพื่อแสดงถึงการกระจายของแรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมจะทำการพิจารณาแรงที่กระทำพื้นผิวของปริมาตรควบคุมเป็นพจน์ในสมการอนุรักษ์โมเมนตัม ส่วนแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหลโดยที่ไม่ได้มีการสัมผัสกันโดยตรงนั้นจะถูกนำไปคิดแยกเป็น source term เมื่อทำการพิจารณาองค์ประกอบของแรงเนื่องจากความดัน (p) และแรงเนื่องจากความเครียด (τ_{ij}) ที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมในทิศทางแกน x ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของความเครียดในทิศทางแกน x

โดยขนาดของแรงที่เป็นผลมาจากความเครียดที่ผิว (surface stress) คือผลคูณระหว่างความเครียดและพื้นที่ ซึ่งแรงลัพธ์ในทิศทางแกน x คือผลรวมองค์ประกอบของแรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมในทิศทางดังกล่าวซึ่งแรงที่กระทำบนผิวต่าง ๆ สามารถเขียนได้ดังสมการ 3.12a-c

องค์ประกอบของแรงดันและความเค้นบนผิวด้าน E และ W ในแนวแกน x

$$\left[\left(p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(\tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z + \left[- \left(p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z = \left(- \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \delta x \delta y \delta z \quad (3.12a)$$

องค์ประกอบของแรงดันและความเค้นบนผิวด้าน N และ S ในแนวแกน y

$$- \left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \quad (3.12b)$$

องค์ประกอบของแรงดันและความเค้นบนผิวด้าน T และ B ในแนวแกน z

$$- \left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (3.12c)$$

เมื่อพิจารณาแรงรวมต่อหน่วยปริมาตรโดยนำสมการ 3.12a-c รวมเข้าด้วยกันแล้วหารด้วยปริมาตร ($\delta x \delta y \delta z$) จะได้สมการที่ 3.13

$$\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (3.13)$$

เนื่องจากก่อนหน้านี้ยังไม่ได้พิจารณาผลเนื่องจากแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหลโดยที่ไม่ได้มีการสัมผัสกันโดยตรง (body force) จึงต้องนำแรงดังกล่าวมารวมโดยกำหนดเป็น source term (S_{M_x}) ของโมเมนตัมในแกน x ต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยเวลาดังสมการ 3.14a-c

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมในทิศทางแกน x

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{M_x} \quad (3.14a)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมในทิศทางแกน y

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{M_y} \quad (3.14b)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมในทิศทางแกน z

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{M_z} \quad (3.14c)$$

จากสมการ 3.14 a-c ผลจากความเค้นที่เกิดขึ้นจากค่าความหนืดในของไหลแบบนิวโตเนียนจะพบว่า ค่าความเครียดนั้นมีความสัมพันธ์แบบแปรผันโดยตรงกันกับอัตราความเครียดเชิงมุม และเนื่องจาก อัตราความเครียดเชิงมุมนั้นเกี่ยวข้องกับอัตราการเปลี่ยนรูปเชิงเส้นและอัตราการเปลี่ยนรูปเชิงปริมาตรสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว u, v, w กับค่าความเค้นและความหนืดได้ จากนั้นทำการกำจัดตัวแปรค่าความเค้นจะได้สมการอนุรักษ์โมเมนตัมสำหรับของไหลไม่อัดตัวตามแนวแกนต่างๆ ดังแสดงในสมการ 3.15a-c

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมในทิศทางแกน x

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vu) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wu) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (3.15a)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมในทิศทางแกน y

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wv) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \quad (3.15b)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมในทิศทางแกน z

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho ww) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (3.15c)$$

หรือเขียนในรูปเวกเตอร์อย่างง่ายได้ดังสมการ 3.16

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.16)$$

ในสมการอนุรักษ์โมเมนตัมที่ถูกนำมาใช้คำนวณภายในโดเมนและของเหลวทั้งสองภูมิภาค ใช้สนามความเร็ว (velocity field) ร่วมกัน โดยสมการอนุรักษ์โมเมนตัมที่ขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยปริมาตร (volume fraction) ของทุกภูมิภาคที่ถูกกำหนดโดยค่าคุณสมบัติของของเหลวคือ ความหนาแน่น (ρ), และความหนืด (μ) สามารถเขียนได้ดังสมการ 3.17

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.17)$$

3.3.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

สมการพลังงานนั้นมาจากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ (first law of thermodynamics) ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานในอนุภาคของไหลมีค่าเท่ากับอัตราของพลังงานที่เข้ามาในอนุภาคของไหลรวมกับอัตราของงานที่เกิดขึ้นบนอนุภาคของไหล การอนุรักษ์พลังงานภายในอนุภาคของไหล คือสมการอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอนุภาคของไหลรวมกับอัตรางานสุทธิที่ทำบนอนุภาคของไหล (อัตราพลังงานที่ป้อนเข้าสู่อนุภาคของไหล) และอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานเนื่องจาก source, S_E

สมการ 3.18 แสดงอัตรางานสุทธิบนอนุภาคของไหล

$$\begin{aligned} [-div(pu)] + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \right. \\ \left. + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (3.18)$$

สมการ 3.19 แสดงอัตราพลังงานที่ป้อนเข้าสู่อนุภาคของไหล

$$-divq = div(kgradT) \quad (3.19)$$

สมการ 3.20 แสดงการอนุรักษ์พลังงานภายในอนุภาคของไหล

$$\begin{aligned} \rho \frac{DE}{Dt} = [-div(pu)] + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} \right. \\ \left. + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + div(kgradT) + S_E \end{aligned} \quad (3.20)$$

โดยสามารถเขียนในรูปสมการอนุรักษ์พลังงานที่มีอุณหภูมิเป็นตัวแปรตามได้ดังสมการ 3.21

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u c_p T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v c_p T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w c_p T) \\ = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q'' \end{aligned} \quad (3.21)$$

สมการอนุรักษ์พลังงานที่ถูกนำมาใช้คำนวณในแบบจำลอง VOF ซึ่งถูกใช้ร่วมกันโดยของไหลทั้งสองวัฏภาคสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + s_n \quad (3.22)$$

3.4 กระบวนการหาผลเฉลย

เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการคำนวณเพื่อหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ (differential equation) โดยเปลี่ยนรูปสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบของสมการพีชคณิต (algebraic equation) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการแก้ปัญหาต่าง ๆ โดยทั่วไปวิธีการ discretization นิยมทำโดยวิธีต่าง ๆ 3 อย่างด้วยกัน เช่น finite difference method

(FDM), finite element method (FEM), และ finite volume method (FVM) ซึ่ง FVM นั้นเป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้แก้ปัญหาของพลศาสตร์ของไหล และยังเป็นวิธีที่ถูกเลือกมาใช้สำหรับงานวิจัยนี้

3.4.1 การหาผลเฉลยของความดัน

PRESTO! ถูกใช้เพื่อการกระจายเทอมของสมการโมเมนตัม ซึ่งจำเป็นจะต้องทราบค่าความดันบนผิวของปริมาตรควบคุม standard pressure discretization interpolates ความดันบนผิวของปริมาตรควบคุมโดยใช้ค่าจากกึ่งกลางเซลล์ (cell center value) ซึ่ง PRESTO! เป็นวิธีหนึ่งของการ discretization สำหรับการคำนวณหาความดันที่แท้จริงบนผิวของปริมาตรควบคุม ที่สามารถใช้ได้กับ staggered grids เมื่อค่าตัวแปรของความเร็วและความดันไม่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน การใช้ PRESTO! จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้นเนื่องจากไม่ต้องทำการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนและการสมมุติความแตกต่างของความดันบนขอบเขตของโดเมน

3.4.2 การหาผลเฉลยของโมเมนตัม

วิธีการ Second Order Upwind เป็นการประมาณค่าที่ขอบจาก cell ที่ทิศทางการไหลนั้นไหลผ่านมาโดยให้ขอบของปริมาตรควบคุมที่พิจารณาจากจุดกึ่งกลางของปริมาตรควบคุมที่ไหลผ่านก่อนหน้าจำนวน 2 ตำแหน่งจากรูปที่ 3.4, 3.5 แสดงให้เห็นถึงวิธีการประมาณค่าเมื่อความเร็วเป็นบวกและลบ



รูปที่ 3.4 ทิศทางของความเร็วแนวแกน x ที่เป็นบวกหรือลบ

กรณีที่ 1

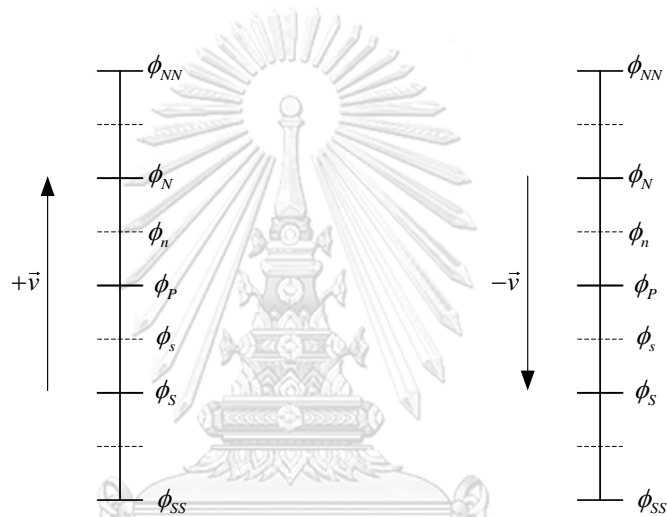
$F_e \geq 0$ และ $F_w \geq 0$ ($\rho u \geq 0$) จะได้ว่า

$$\phi_w = \phi_w + \frac{1}{2}(\phi_w - \phi_{ww}), \quad \phi_e = \phi_P + \frac{1}{2}(\phi_P - \phi_w) \quad (3.23)$$

กรณีที่ 2

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

$$\phi_e = \phi_E + \frac{1}{2}(\phi_E - \phi_{EE}), \quad \phi_w = \phi_P + \frac{1}{2}(\phi_P - \phi_E) \quad (3.24)$$



รูปที่ 3.5 ทิศทางของความเร็วแนวแกน y ที่เป็นบวกหรือลบ

กรณีที่ 1

$F_n \geq 0$ และ $F_s \geq 0$ ($\rho v \geq 0$) จะได้

$$\phi_s = \phi_S + \frac{1}{2}(\phi_S - \phi_{SS}), \quad \phi_n = \phi_P + \frac{1}{2}(\phi_P - \phi_S) \quad (3.25)$$

กรณีที่ 2

$F_n \leq 0$ และ $F_s \leq 0$ ($\rho v \leq 0$) จะได้

$$\phi_s = \phi_P + \frac{1}{2}(\phi_P - \phi_N), \quad \phi_n = \phi_N + \frac{1}{2}(\phi_N - \phi_{NN}) \quad (3.26)$$

นำค่า ϕ_i^* ทั้งหมดแทนค่าลงใน $\bar{S} = S_c + S_p \phi_p$ แล้วเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการพีชคณิตใน $\bar{S} = S_c + S_p \phi_p$ จะได้ว่า

$$a_p \phi_p = a_e \phi_e + a_w \phi_w + a_n \phi_n + a_s \phi_s + S_c \Delta V \quad (3.27)$$

$$a_e = D_e + [[-F_e, 0]] \quad (3.28)$$

$$a_w = D_w + [[F_w, 0]] \quad (3.29)$$

$$a_n = D_n + [[-F_n, 0]] \quad (3.30)$$

$$a_s = D_s + [[F_s, 0]] \quad (3.31)$$

$$a_p = D_e + [[-F_e, 0]] + D_w + [[F_w, 0]] + D_n + [[-F_n, 0]] + D_s + [[F_s, 0]] \quad (3.32)$$

$[[F, 0]]$ จะเลือกค่าที่มีค่ามากที่สุดที่อยู่ในวงเล็บแต่ละกรณีเช่น
กรณีที่ $F > 0$ จะได้ว่า $[[F, 0]] = F$
กรณีที่ $F < 0$ จะได้ว่า $[[F, 0]] = 0$

3.4.3 การเชื่อมโยงความเร็วและความดัน

Pressure Implicit with Splitting of Operators (PISO) [31] เป็นวิธีการคำนวณความเร็วและความดันที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการคำนวณ non-iterative computation ของการไหลแบบอัดตัวได้ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา (unsteady compressible flows) ซึ่งได้มีการปรับปรุงจนสามารถใช้สำหรับการคำนวณ iterative solution สำหรับการแก้ปัญหาที่ไม่ขึ้นกับเวลา (steady state) โดย PISO นั้นประกอบไปด้วยกระบวนการทำนาย (predictor step) และกระบวนการปรับปรุงค่าที่ได้ให้ถูกต้อง (corrector step) ซึ่งอาจจะมองได้ว่าเป็นส่วนขยายของการคำนวณโดยขั้นตอน SIMPLE [32] ดังนี้

ขั้นตอนการทำนาย (predictor step)

เริ่มต้นจากการคำนวณสมการ Discretised momentum สมการ 3.33 และ 3.34 โดยการเดาค่า p^* แทนลงไปเพื่อคำนวณหาค่า v^* และ u^* โดยใช้วิธีเดียวกันกับ SIMPLE algorithm

$$a_{i,j} u_{i,j}^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + (p_{i-1,j}^* - p_{1,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (3.33)$$

$$a_{1,j} v_{1,j}^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + (p_{1,j-1}^* - p_{1,j}^*) A_{1,j} + b_{1,j} \quad (3.34)$$

การปรับแก้ครั้งที่ 1 (Corrector step 1)

ค่า v^* และ u^* ที่ได้จากการคำนวณครั้งแรกจะไม่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง เนื่องจากค่า p^* ที่ใช้แทนค่าลงไปนั้นไม่ถูกต้อง โดยขั้นตอนการปรับแก้ครั้งที่ 1 ใช้วิธีการแบบเดียวกันกับขั้นตอนวิธี SIMPLE ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดสนามความเร็ว (v^{**}, u^{**}) ซึ่งสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ทำให้ได้สมการเดียวกันกับสมการปรับแก้ความเร็ว 3.35, 3.36 จากขั้นตอนวิธีแบบ SIMPLE

$$u'_{i,j} = d_{i,j} (p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (3.35)$$

$$v'_{i,j} = d_{i,j} (p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (3.36)$$

เมื่อ

$$d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}}, d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}}$$

แต่เนื่องจากระเบียบวิธีแบบ PISO นั้นมีขั้นตอนการปรับแก้ 2 ขั้นตอนจึงทำการกำหนดสัญลักษณ์เป็น

$$p^{**} = p^* + p' \quad (3.37)$$

$$u^{**} = u^* + u' \quad (3.38)$$

$$v^{**} = v^* + v' \quad (3.39)$$

โดยใช้สมการ 3.40, 3.41 เพื่อระบุค่าความเร็วที่ถูกต้อง (v^{**}, u^{**})

$$u^{**}_{i,j} = u^*_{i,j} + d_{i,j} (p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (3.40)$$

$$v^{**}_{i,j} = v^*_{i,j} + d_{i,j} (p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (3.41)$$

เช่นเดียวกับกับระเบียบวิธี SIMPLE สมการ 3.40 และ 3.41 ถูกนำมาแทนค่าลงในสมการ discretized continuity (สมการ 3.42) เพื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์และ source term ลงในสมการปรับแก้ความดัน (สมการ 3.43)

$$[(\rho u A)_{i+1,j} - (\rho u A)_{i,j}] + [(\rho v A)_{i,j+1} - (\rho v A)_{i,j-1}] = 0 \quad (3.42)$$

$$a_{i,j} p'_{i,j} = a_{i+1,j} p'_{i+1,j} + a_{i-1,j} p'_{i-1,j} + a_{i,j+1} p'_{i,j+1} + a_{i,j-1} p'_{i,j-1} + b'_{i,j} \quad (3.43)$$

ซึ่งในบริบทของระเบียบวิธี PISO สมการปรับแก้ความดันโดยจะเรียกว่าสมการปรับแก้ความดันขั้นปฐมภูมิ (first pressure correction equation) ซึ่งทำให้ได้ค่าความดันแก้ไขขั้นปฐมภูมิ (p') ซึ่งนำไปสู่การได้มาซึ่งองค์ประกอบของความเร็วจากสมการ 3.37, 3.38

การปรับแก้ครั้งที่ 2 (Corrector step 2)

ทำการ discretized สมการโมเมนตัมสำหรับ u^{**}, v^{**}

$$a_{i,j}u_{i,j}^{**} = \sum a_{nb}u_{nb}^* + (p_{I-1,j}^{**} - p_{I,j}^{**})A_{i,j} + b_{i,j} \quad (3.41)$$

$$a_{i,j}v_{I,j}^{**} = \sum a_{nb}v_{nb}^* + (p_{I,j-1}^{**} - p_{I,j}^{**})A_{I,j} + b_{I,j} \quad (3.42)$$

คำนวณค่าปรับแก้ครั้งที่ 2 ของสนามความเร็ว (v^{***}, u^{***}) โดยการคำนวณสมการโมเมนตัมอีกครั้ง

$$a_{i,j}u_{i,j}^{***} = \sum a_{nb}u_{nb}^{**} + (p_{I-1,j}^{***} - p_{I,j}^{***})A_{i,j} + b_{i,j} \quad (3.43)$$

$$a_{i,j}v_{I,j}^{***} = \sum a_{nb}v_{nb}^{**} + (p_{I,j-1}^{***} - p_{I,j}^{***})A_{I,j} + b_{I,j} \quad (3.44)$$

จากนั้นทำการรวมพจน์โดยการคำนวณค่าความเร็ว u^{***} และ v^{***} จากขั้นตอนที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ทำการลบสมการ 3.31 ออกจากสมการ 3.43 และลบสมการ 3.32 ออกจากสมการ 3.44 จะได้

$$u_{i,j}^{***} = u_{i,j}^{**} + \frac{\sum a_{nb}u_{nb}^{**} - u_{nb}^*}{a_{i,j}} + d_{i,j}(p_{I-1,j}'' - p_{I,j}'') \quad (3.45)$$

$$v_{I,j}^{***} = v_{I,j}^{**} + \frac{\sum a_{nb}v_{nb}^{**} - v_{nb}^*}{a_{I,j}} + d_{I,j}(p_{I,j-1}'' - p_{I,j}'') \quad (3.46)$$

เมื่อ p'' คือค่าปรับแก้ความดันครั้งที่ 2 ซึ่งจะสามารถหาค่า p^{***} ได้จากสมการ 3.47

$$p^{***} = p^{**} + p'' \quad (3.47)$$

แทนค่า u^{***} และ v^{***} ในเทอมการกระจายของสมการโมเมนตัม 3.46 จะได้

$$a_{i,j}p_{I,j}'' = a_{I+1,j}''p_{I+1,j}'' + a_{I-1,j}''p_{I-1,j}'' + a_{I,j+1}''p_{I,j+1}'' + a_{I,j-1}''p_{I,j-1}'' + b_{i,j}'' \quad (3.48)$$

เมื่อ

$$a_{I+1,J} = (\rho dA)_{i+1,J}$$

$$a_{I-1,J} = (\rho dA)_{i,J}$$

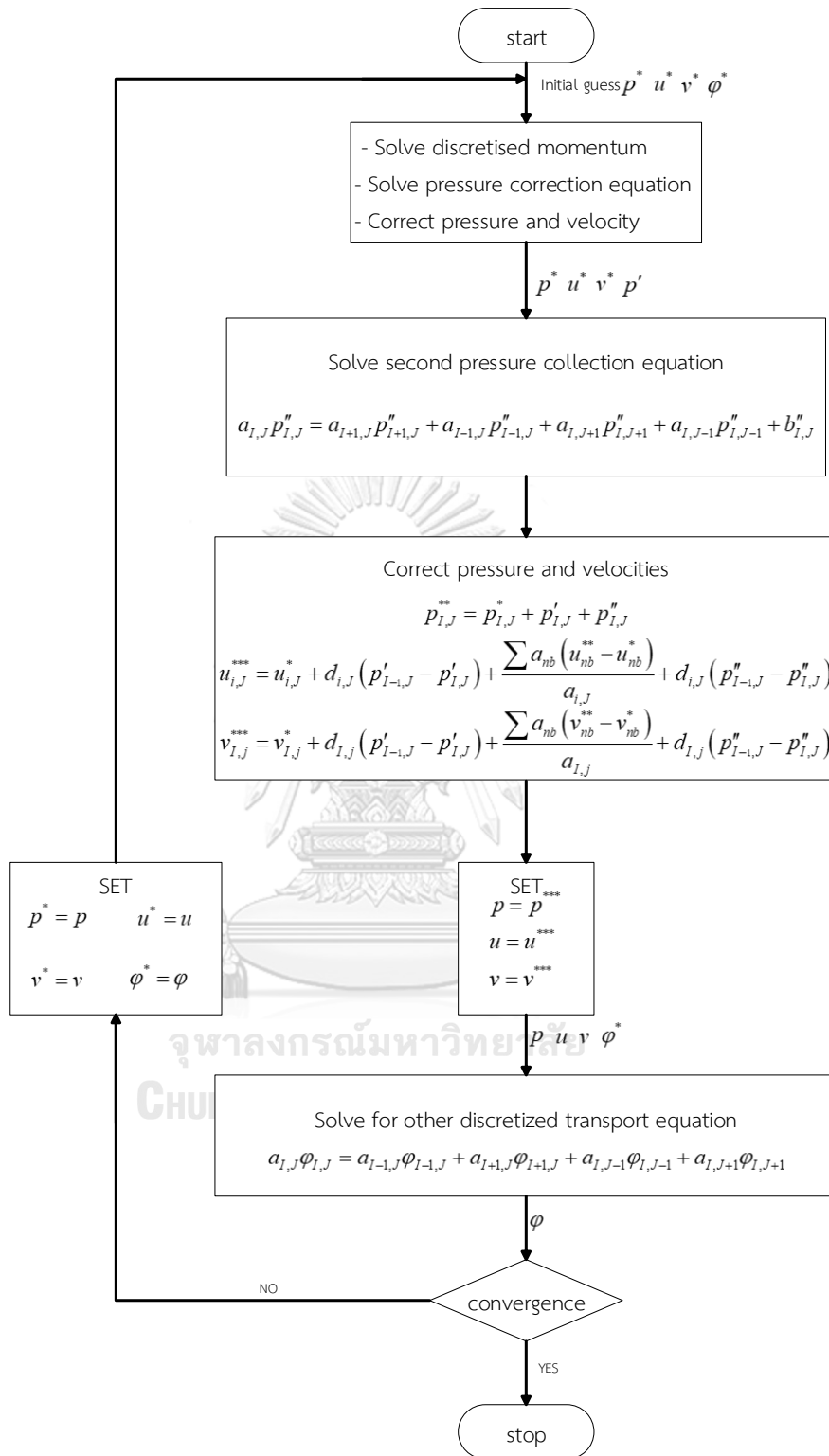
$$a_{I,J+1} = (\rho dA)_{I,j+1}$$

$$a_{I,J-1} = (\rho dA)_{I,j-1}$$

และ

$$b_{I,J} = \left[\left(\frac{\rho A}{a} \right)_{i,J} \sum a_{nb} (u_{nb}^{**} - u_{nb}^*) - \left(\frac{\rho A}{a} \right)_{i+1,J} \sum a_{nb} (u_{nb}^{**} - u_{nb}^*) \right. \\ \left. + \left(\frac{\rho A}{a} \right)_{I,j} \sum a_{nb} (v_{nb}^{**} - v_{nb}^*) - \left(\frac{\rho A}{a} \right)_{I,j+1} \sum a_{nb} (v_{nb}^{**} - v_{nb}^*) \right]$$

จากขั้นตอนทั้งหมดสามารถสรุปออกมาเป็นแผนผังการคำนวณได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 PISO algorithm

บทที่ 4

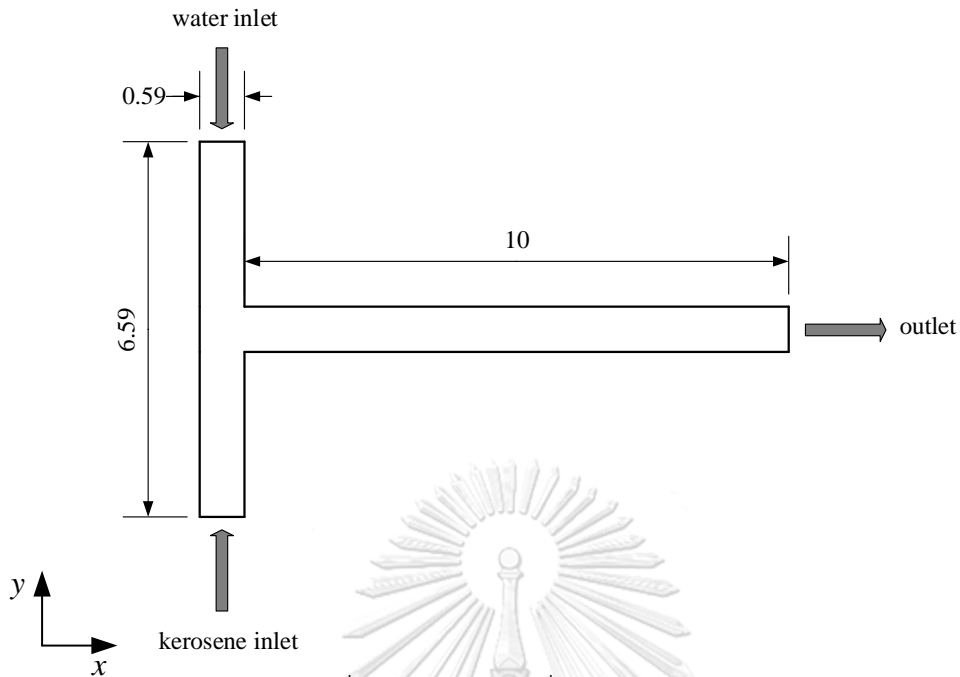
ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณและการวิเคราะห์

4.1 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่จะใช้ในการศึกษาโดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 17.2 กระทำโดยเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยที่มีอยู่ก่อนหน้าเพื่อเป็นการสร้างความมั่นใจและเพื่อแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้มีความน่าเชื่อถือพอและสามารถนำไปใช้ศึกษาปัญหาที่สนใจได้ ในการตรวจสอบแบบจำลองที่จะใช้ในการศึกษานี้จะทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Cherlo et al. [26] เพื่อพิจารณารูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการดำเนินการภายในที่มีรูปแบบพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมขนาด $500 \times 590 \mu\text{m}$ ซึ่งทำมาจาก Perspex (PMMA) ที่ขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคการ CNC และวัดขนาดของ slug โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพ

4.1.1 ลักษณะของแบบจำลอง

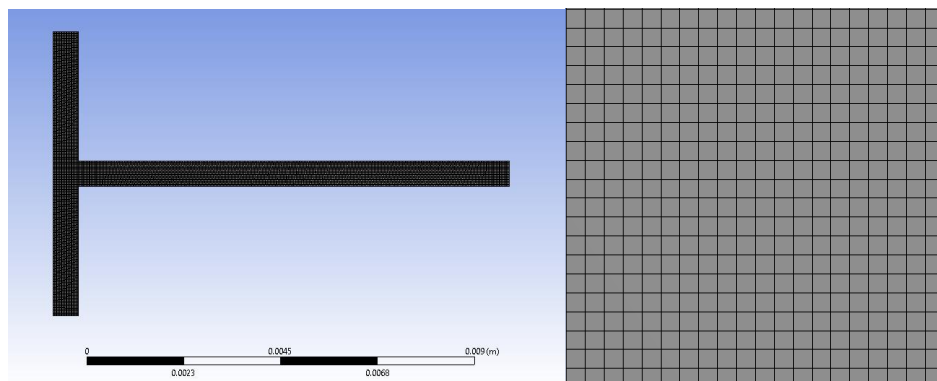
ทำการศึกษาการจำลองการไหลภายในท่อขนาดเล็กที่มีรูปแบบการไหลแบบ slug ผ่านแบบจำลอง 2 มิติดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งมีลักษณะของข้อต่อเป็นรูปตัว T โดยกำหนดให้ของเหลว 2 ชนิดที่ไม่ละลายเข้ากัน ประกอบด้วยน้ำและเคโรซีน คุณสมบัติทางกายภาพที่ใช้ในการจำลองการไหลแสดงดังตารางที่ 4.1 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เคโรซีนจะถูกกำหนดให้เป็นวัฏภาคปฐมภูมิ (primary phase) ซึ่งไหลเข้าสู่ระบบทางปลายท่อด้านล่าง ในขณะที่น้ำจะเป็นวัฏภาคทุติยภูมิ (secondary phase) ที่ไหลเข้าสู่ระบบทางปลายท่อด้านบน โดยเลือกใช้แบบจำลอง VOF และใช้โครงร่างตาข่าย (mesh) แบบสี่เหลี่ยมที่มีการจัดเรียงแบบเป็นระเบียบขนาด $30 \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 4.2 แล้วทำการจำลองการไหลโดยใช้เงื่อนไขการดำเนินการเดียวกับการทดลองของ Cherlo et al. [26]



รูปที่ 4.1 แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองการไหล

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวที่ใช้ในการตรวจสอบ [26]

Property/parameter	Fluid/value
Density (kg/m^3)	Water = 998 Kerosene = 780
Dynamic viscosity ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)	Water = 0.001 Kerosene = 0.001
Interfacial tension (n/m)	Water-kerosene = 0.045



รูปที่ 4.2 โครงร่างตาข่าย (mesh) ที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

4.1.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบ

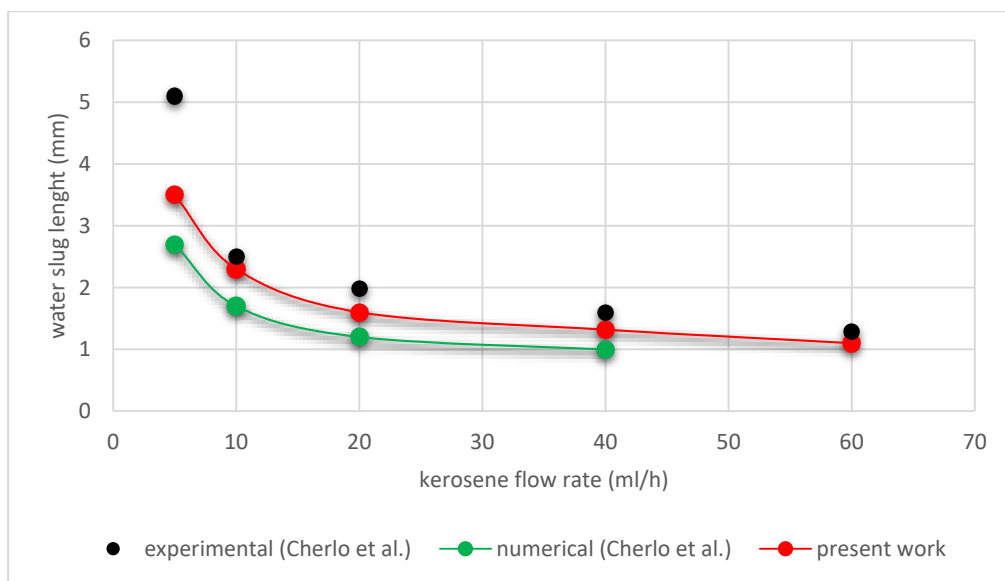
การศึกษาการไหลโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) นั้นจำเป็นต้องมีการกำหนดเงื่อนไขขอบ ซึ่งแตกต่างกันไปสำหรับแต่ละปัญหาที่ทำการพิจารณา ในกรณีนี้เงื่อนไขขอบที่บริเวณทางเข้าของแบบจำลองจะถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ทางโดยกำหนดให้ทางเข้าด้านบนของแบบจำลองนั้นเป็นทางเข้าของน้ำและทางเข้าด้านล่างของแบบจำลองนั้นเป็นทางเข้าของเคโรซีน กำหนดความเร็วขาเข้าเป็นการไหลแบบเต็มพื้นที่หน้าตัดที่ความเร็วแตกต่างกันโดยให้ความเร็วขาเข้าของการไหลของน้ำมีค่าคงที่ความเร็วการไหล 0.009322 m/s โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการไหลระหว่างน้ำและเคโรซีน 0.5, 1, 2, 4, และ 6 ตามลำดับ ที่ทางออกกำหนดเป็น outflow เพื่อให้มั่นใจว่ามวลของของเหลวที่ไหลเข้าระบบจะเท่ากับของเหลวที่ไหลผ่านทางออกของท่อ เงื่อนไขขอบบริเวณผนังท่อจะถูกกำหนดให้เป็นผนังที่อยู่นิ่ง (stationary wall) ความเร็วของเหลวที่บริเวณขอบของผนังมีค่าเป็น 0 ($u=0, v=0$) และของเหลวที่ไหลภายในท่อนั้นมีค่ามุมสัมผัส (contact angle) 180 องศา (รูปที่ 4.3)



รูปที่ 4.3 ภาพแสดงมุมสัมผัส

4.1.3 สรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

เปรียบเทียบความยาว slug ของน้ำเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของเคโรซีนจากการจำลองการไหลเทียบกับการทดลองของ Cherlo et al. [26] จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าความยาว slug ของน้ำที่ได้จากการจำลองการไหลและค่าที่ได้จากการทดลองนั้นมีขนาดใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ซึ่งทำให้แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณนั้นมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ในงานได้



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงความยาวของ water slug เมื่ออัตราการไหลของน้ำคองที่และเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของเคโรซีน

เมื่อได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสำหรับใช้ในการศึกษานี้โดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองของการไหลที่มีลักษณะการไหลแบบเดียวกัน พบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือเพียงพอ จึงได้นำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้ศึกษาผลเนื่องจากการเพิ่มขนาดท่อที่มีต่อปัจจัยที่ส่งเสริมการเกิดการถ่ายเทมวล ต่อความรุนแรงของการหมุนวนภายในรูปแบบการไหลแบบ slug

4.2 ลักษณะของปัญหา

กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญที่ใช้ในกระบวนการแยกสารและกระบวนการทำให้สารนั้นบริสุทธิ์ซึ่งพบได้มากในอุตสาหกรรมเคมี เทคโนโลยีของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคถูกนำมาศึกษาและแสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพการสกัดสูงกว่าการสกัดด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน จากความสามารถในการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสที่ใช้เพื่อการถ่ายเทได้ แต่ระบบการไหลนั้นที่ประกอบไปด้วยของเหลวที่ไม่ละลายเข้าหากันจึงทำให้เกิดรูปแบบการไหลที่แตกต่างกันออกไปหลายรูปแบบ โดยที่การไหลแบบ slug นั้นเป็นรูปแบบการไหลที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเท (transfer performance) ที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการไหลแบบอื่น ๆ เนื่องจากการหมุนวนภายใน slug และความสามารถในการรักษารูปแบบการไหลให้คงที่ตลอดความ

ยาวท่อทำให้สามารถควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้ เนื่องจากเป็นการดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคทำให้ผลผลิตสุทธิมีปริมาณน้อยซึ่งไม่เหมาะสมกับการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม

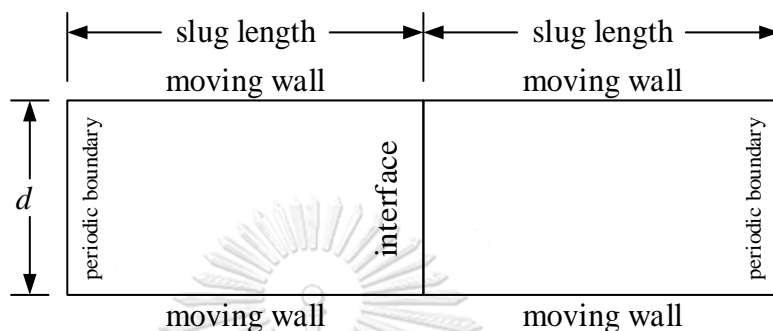
งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลจากการเพิ่มขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลของการไหลแบบ slug ซึ่งในจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะความรุนแรงของการหมุนวนภายใน slug โดยได้ทำการศึกษาผ่านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของท่อที่มีลักษณะพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัดคงที่ตลอดความยาวท่อและทำการศึกษานาฬิกาของท่อที่มีต่อการเกิดของรูปแบบการไหลแบบ slug ผ่านแบบจำลอง free surface capture ในระนาบ 2 มิติ (2D) โดยมีบริเวณที่เกิดการผสม (mixing element) เป็นข้อต่อรูปตัว T ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดท่อ (d_h) ในช่วง 1, 2, 4, 6, และ 10 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยที่ความยาวของทางเข้า (L_e) ที่ต้องการสำหรับอัตราการไหลต่าง ๆ เพื่อให้ของเหลวทั้งสองชนิดเกิดการไหลที่พัฒนาเต็มที่ (fully develop flow) ก่อนจะเข้าสู่บริเวณที่เกิดการผสม (mixing zone) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 4.1

$$\frac{L_e}{d_h} = 0.379 \exp(-0.148 \text{Re}) + 0.055 \text{Re} + 0.26 \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.5 แผนภาพของท่อที่ใช้ในการจำลองการไหลโดยใช้แบบจำลอง free surface capturing

ทำการศึกษาผลของการขยายขนาดท่อที่มีต่อความรุนแรงของการหมุนวนภายใน slug ที่เปลี่ยนแปลงไปโดยใช้แบบจำลอง unit cell ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยใช้ขนาดของ slug และความเร็วที่ผนังที่ได้มาจากการจำลองการไหลโดยใช้แบบจำลอง free surface capture ซึ่งคุณสมบัติของสารที่ใช้ในการศึกษามีรายละเอียดดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.6 แผนภาพที่ใช้ในการจำลองการไหลโดยใช้แบบจำลอง unit cell

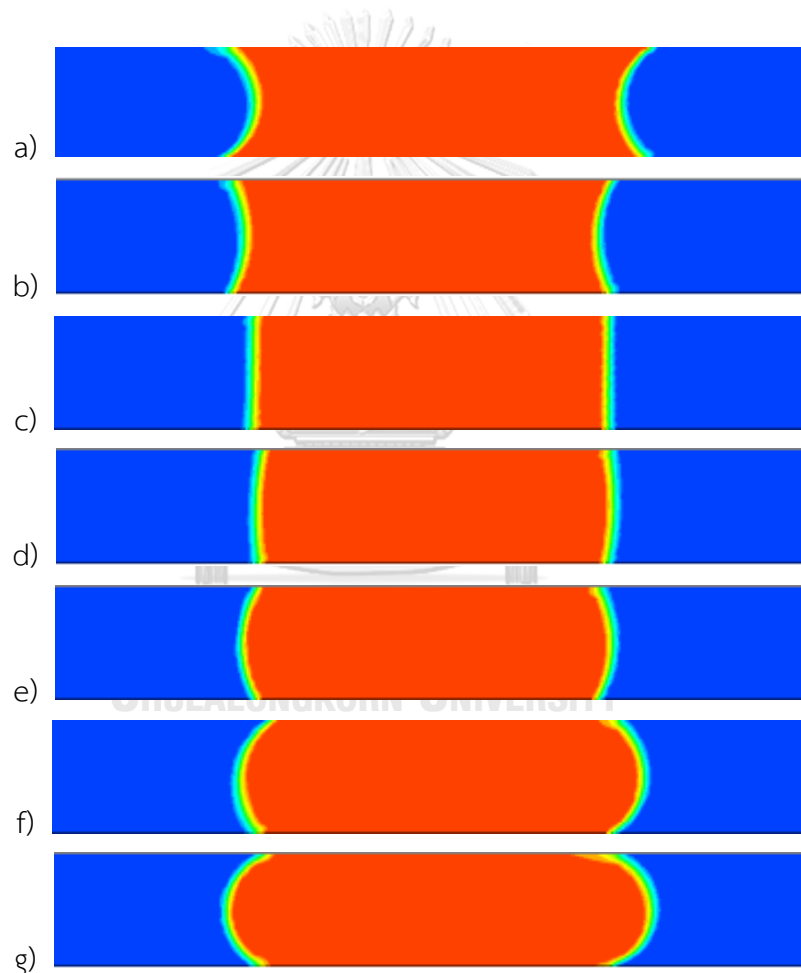
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการศึกษานี้

Properties/parameters	value
Density	Water=998 kg/m ³ Kerosene=780 kg/m ³
Dynamic viscosity	Water=0.001 Pa·S Kerosene=0.001 Pa·S
Interfacial tension	0.045 N/m
Contact angle	180°
Channel size	1-10 (mm)
Weber number	0.001-0.02

4.3 ผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าของมุมสัมผัส

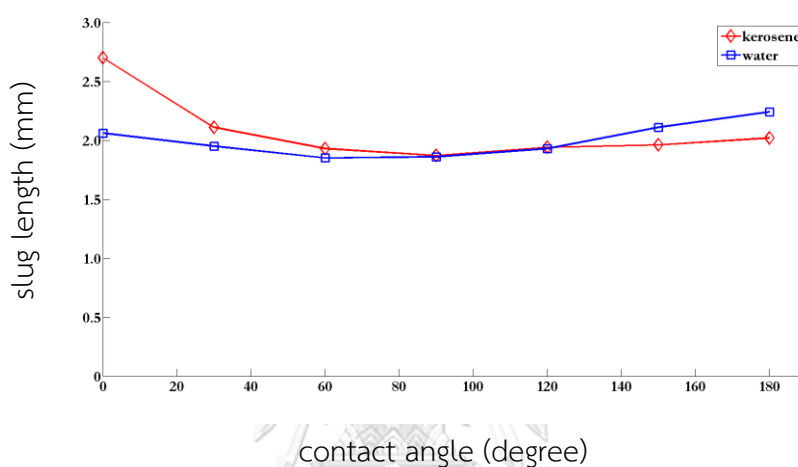
ค่ามุมสัมผัส (contact angle) เป็นตัวแปรที่แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเกิดปฏิสัมพันธ์กันระหว่างของเหลวที่ไหลภายในท่อและวัสดุที่นำมาใช้ผลิตท่อซึ่งมีผลต่อการเกิดรูปแบบการไหลแบบ slug ที่ไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาค ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสัมผัส (contact angle) ที่ส่งผลต่อรูปร่างของ slug โดยใช้แบบจำลอง Continuum Surface Force (CSF) ซึ่งได้ถูกนำเสนอโดย Brackbill et al. [33] ในโปรแกรมจำลอง

การไหล โดยการระบุค่าของสัมประสิทธิ์แรงตึงผิว (surface tension coefficients), และค่ามุมสัมผัส (contact angle) ทำการศึกษาที่ความเร็วการไหลของน้ำที่ 0.009322 m/s และความเร็วการไหลของเคโรซีน 0.009322 m/s ทำการเปลี่ยนแปลงค่ามุมสัมผัสอยู่ในช่วง 0-180 องศาซึ่งผลที่ได้การจำลองการไหลแสดงดังรูปที่ 4.7 จากรูปจะพบว่าเมื่อค่ามุมสัมผัสมีขนาด 0 องศา รูปร่างของผิวสัมผัสของ water slug จะมีลักษณะเป็นโค้งเว้าเข้าข้างใน (concave) มากที่สุดและการโค้งเว้าเข้าด้านในนั้นน้อยลงเมื่อค่ามุมสัมผัสเพิ่มมากขึ้นจนมีลักษณะเส้นตรงตั้งฉากกับผนังท่อที่ค่ามุมสัมผัส 60 องศา เมื่อเพิ่มค่ามุมสัมผัสมากขึ้นไปอีกผิวสัมผัสจะมีลักษณะของการเว้าออก (convex) มากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีค่ามากที่สุดที่ค่ามุมสัมผัส 180 องศา



รูปที่ 4.7 ผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่ามุมสัมผัสที่มีต่อรูปร่างของ water slug (สีแดง) ใน kerosene (สีน้ำเงิน) a) 0°, b) 30°, c) 60°, d) 90°, e) 120°, f) 150°, g) 180°

ผลที่ได้จากการจำลองการไหลจะพบว่าในระบบที่ทำการศึกษานั้นไม่มีการก่อตัวของฟิล์มของเหลว ล้อมรอบ water slug ที่ทุกค่ามุมสัมผัสที่ศึกษา รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงผลของการเปลี่ยนแปลงค่า มุมสัมผัสที่มีต่อขนาดและรูปร่างของของ slug โดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสัมผัสนั้นส่งผล ต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวของ slug เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยที่ค่ามุมสัมผัส 0 องศา ความยาว ของ water slug และ kerosene slug จะมีค่าเท่ากับ 2.06 mm และ 2.7 mm ตามลำดับ ในขณะที่ เมื่อค่าของมุมสัมผัสเท่ากับ 180 องศาความยาวของ water slug และ kerosene slug จะมีค่าเท่ากับ 2.24 mm และ 2.02 mm ตามลำดับ



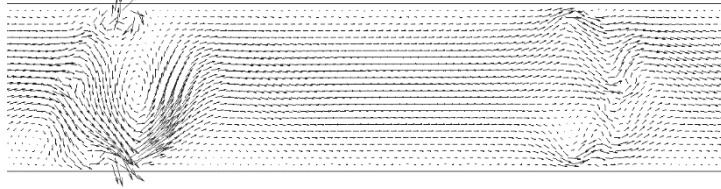
รูปที่ 4.8 ผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของ slug ที่ค่ามุมสัมผัสที่ต่างกัน

4.4 ผลเนื่องจากการขยายขนาดท่อต่อรูปแบบการไหลแบบ slug

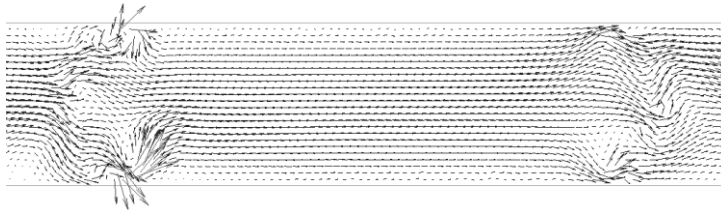
ในการศึกษาผลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงต่อการเกิดรูปแบบการไหลภายในท่อที่ทำการเพิ่มขนาด จะใช้การจำลองการไหลโดยใช้แบบจำลอง free surface capture (รูปที่ 4.5) การไหลภายในท่อนั้น มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องหลายตัวซึ่งมีความสำคัญต่อการเกิดรูปแบบการไหล เช่น ความหนืดของสาร, แรงตึงผิว, แรงโน้มถ่วง เป็นต้น โดยได้ทำการศึกษาที่ท่อขนาดต่างกันโดยมีขนาด 1, 2, 4, 6, และ 10 mm โดยในแต่ละขนาดท่อนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่า Weber number ที่ 0.002, 0.006, 0.01, 0.015, และ 0.02 ทั้งนี้สำหรับท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_h) อยู่ในช่วง 1-3 mm จะยังไม่ทำการพิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วงที่จะกระทำต่อของเหลวที่ไหลในท่อขนาดดังกล่าว เนื่องจากผลจากแรงภายนอกนั้นจะมีอิทธิพลต่อการไหลน้อยมาก ซึ่งผลจากการจำลองการไหลในกรณีต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้ ทั้งนี้ได้มีการศึกษาผลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของการไหลในท่อขนาด 1-3 mm ในกรณีที่มีการติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ในแนวตั้ง พบว่าแรงโน้มถ่วงนั้นไม่มีผลต่อการเกิดรูปแบบการไหลใน

ท่อที่มีขนาดน้อยกว่า 3 mm โดยขนาดของ slug และพฤติกรรมไหลภายใน (เวกเตอร์ความเร็ว) เหมือนกับการไหลในกรณีที่ไม่พิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วงดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10

a)

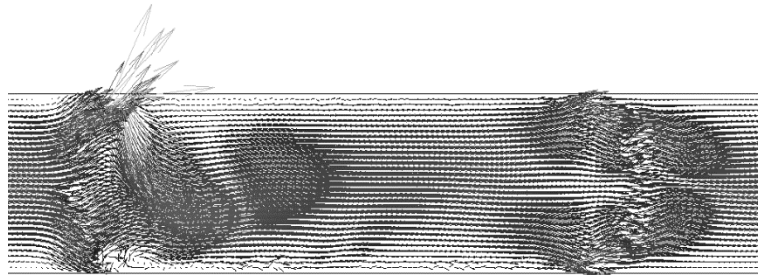


b)

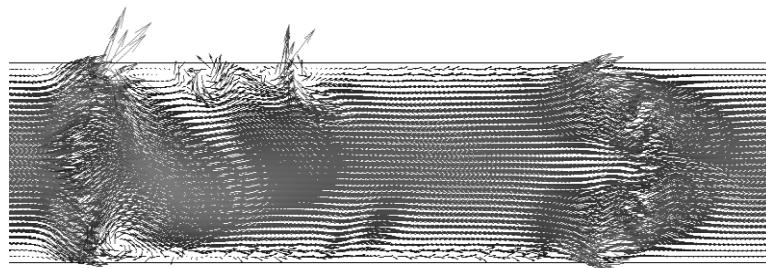


รูปที่ 4.9 เวกเตอร์ความเร็วภายใน water slug ที่ไหลในท่อขนาด 1 mm, a) ไม่พิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วง, b) พิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วง

a)

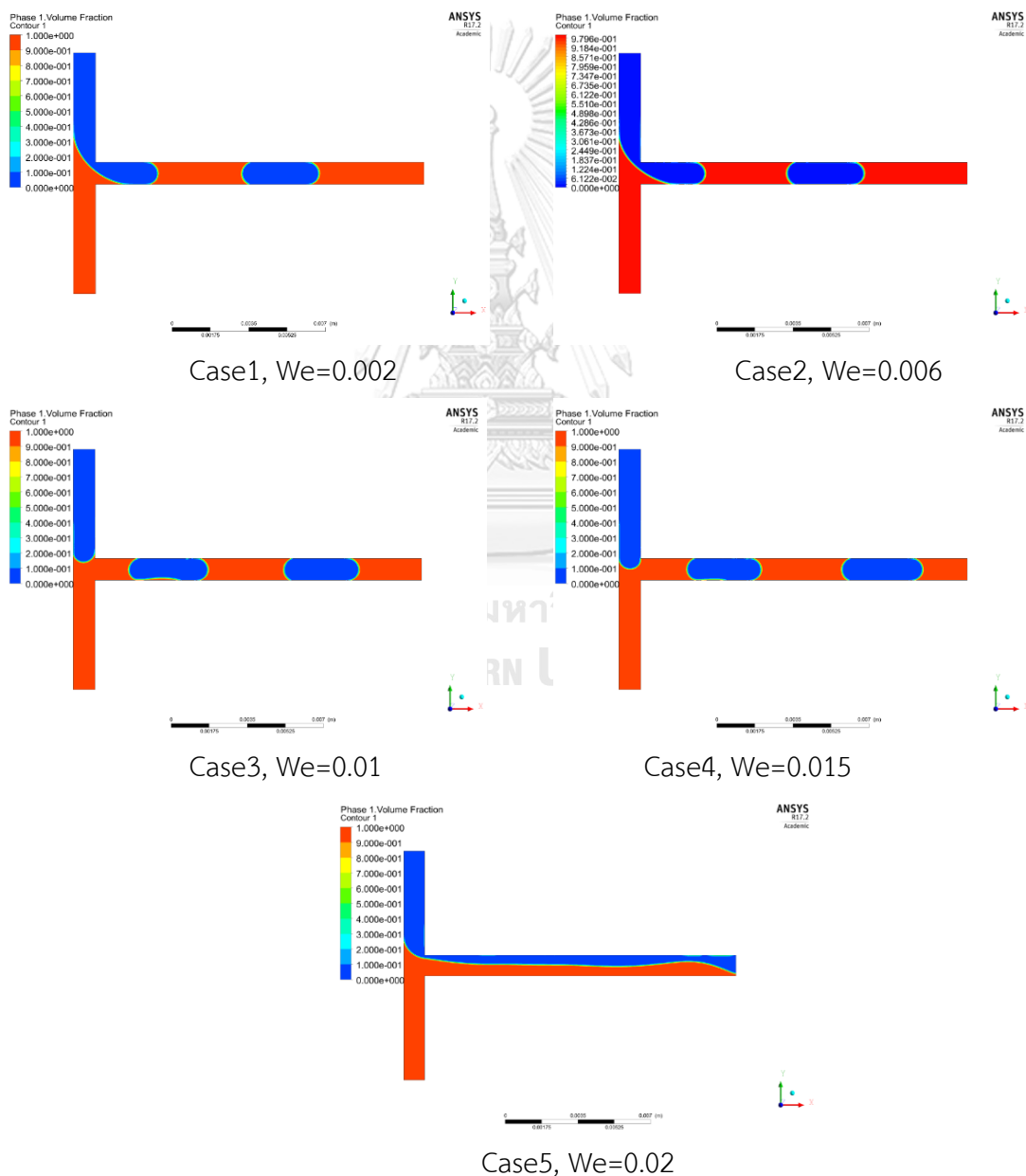


b)



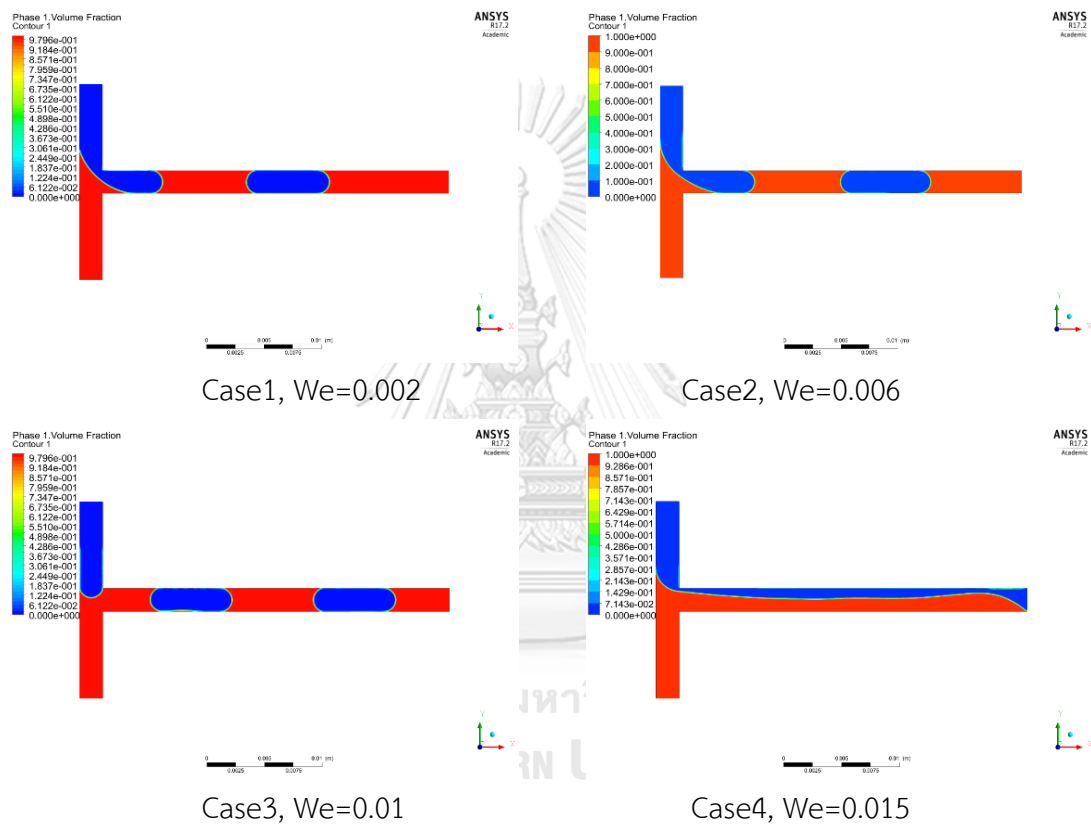
รูปที่ 4.10 เวกเตอร์ความเร็วภายใน water slug ที่ไหลในท่อขนาด 2 mm, a) ไม่พิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วง, b) พิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วง

รูปที่ 4.11 แสดงผลการคำนวณที่เกิดจากการไหลในท่อขนาด 1 mm ที่ค่า Weber number (We) ต่างกันในช่วง 0.002-0.02 โดยพบว่า การไหลในท่อที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm นั้น รูปแบบการไหลแบบ slug จะเกิดขึ้นได้ที่ค่า $We=0.002, 0.006, 0.01,$ และ 0.015 ซึ่งความยาวของ slug นั้นมีขนาดใกล้เคียงกันทั้งน้ำและเคโรซีนโดยมีขนาด 3.50-3.55 mm อย่างไรก็ตามเมื่อ $We=0.02$ จะพบว่าของเหลวในท่อที่มีรูปแบบการไหลแบบขนาน โดยที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวทั้งสองวิฎภาคมีลักษณะเป็นคลื่นเนื่องจากความเร็วการไหลนั้นมีค่ามากขึ้นจนกระทั่งแรงตึงผิวของของเหลวไม่สามารถรักษารูปแบบการไหลแบบ slug เอาไว้ได้อีกต่อไป นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของ mixing zone ถูกครอบครองโดยเคโรซีน



รูปที่ 4.11 รูปแบบการไหลที่เกิดภายในท่อขนาด 1 mm

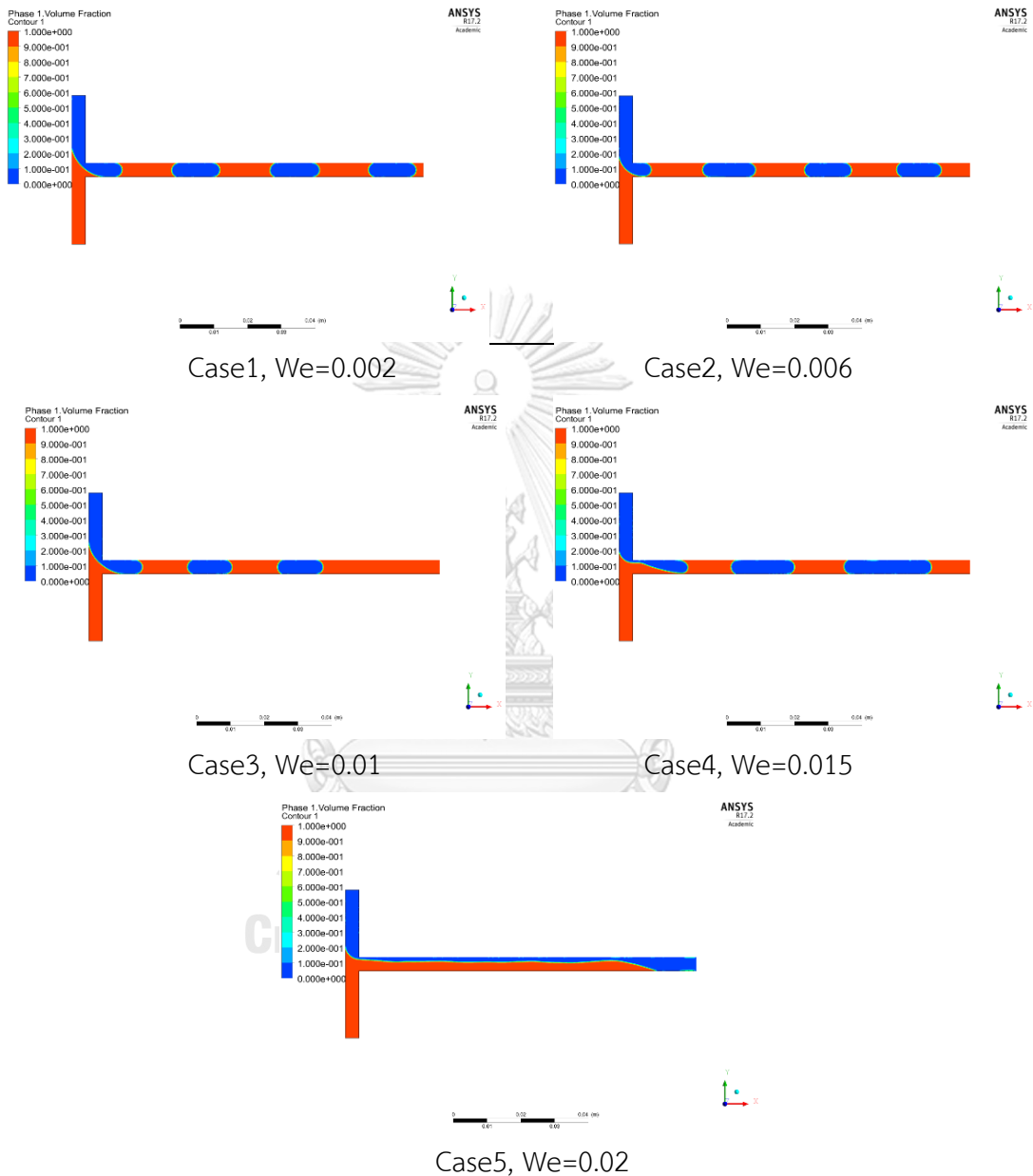
รูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นถึงผลจากการจำลองการไหลเมื่อท่อถูกเพิ่มขนาดขึ้นเป็น 2 mm และความเร็วของการไหลถูกควบคุมโดยค่า Weber number ที่แตกต่างกันในช่วง 0.002-0.015 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการไหลแบบ slug ในท่อขนาดดังกล่าวนั้นจะเกิดได้ที่ $We=0.002$, 0.006, และ 0.01 โดยที่ความยาวของ water slug และ kerosene slug นั้นจะมีขนาดเท่ากับ 7 mm และเมื่อค่า $We=0.015$ จะเห็นว่ารูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นจะเป็นการไหลแบบขนานที่มีลักษณะผิวสัมผัสระหว่างของเหลวแบบไม่คงที่และพื้นที่ส่วนใหญ่จะถูกครอบครองโดยเคโรซีน



รูปที่ 4.12 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อขนาด 2 mm

ผลจากการศึกษารูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm แสดงในรูปที่ 4.13 ที่ค่า Weber number ต่างกันในช่วง 0.002-0.015 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการไหลในท่อที่มีขนาด 4 mm นั้นรูปแบบการไหลแบบ slug จะเกิดได้ตั้งแต่ $We=0.002-0.02$ โดยขนาดของ slug ที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดที่ใกล้เคียงกันที่ 13 mm ทั้ง water และ kerosene ในขณะที่ $We=0.015$ แม้ว่าการไหลยังเป็นแบบ slug แต่จากรูปที่ 4.13 (case 4) จะพบว่าเป็นการไหลแบบ slug ที่ไม่มีความเสถียรโดยความยาวของ slug ที่เกิดขึ้นนั้นจะมีขนาดที่แตกต่างกันตั้งแต่ 17-20 mm ในของเหลวทั้ง 2 วัสดุ นอกจากนั้นจะพบว่าเป็นการไหลแบบขนานที่มีลักษณะพื้นที่ผิวสัมผัสที่ไม่คงที่เมื่อ

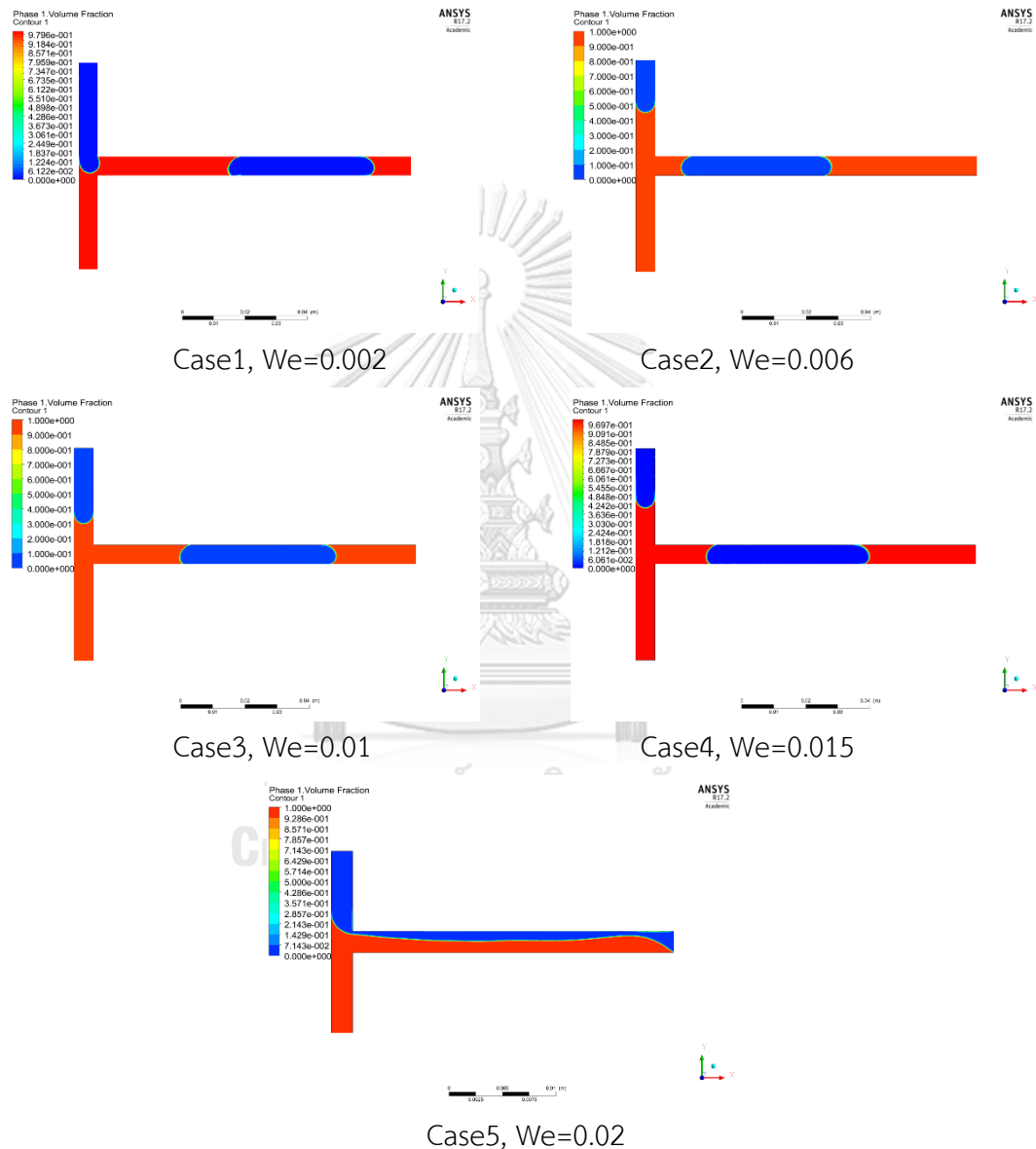
$We=0.02$ โดยที่ในบริเวณ mixing zone เนื่องจากความเร็วการไหลนั้นมีค่ามากแรงภายในของเหลวไม่อาจรักษารูปแบบการไหลแบบ slug เอาไว้ได้จึงไม่ปรากฏการไหลแบบ slug อีก



รูปที่ 4.13 รูปแบบการไหลที่เกิดภายในท่อขนาด 4 mm

รูปที่ 4.14 แสดงผลที่ได้จากการจำลองการไหลในท่อที่มีขนาดขนาด 6 mm ที่ค่า Weber number ต่างกันในช่วง 0.002-0.02 จะเห็นได้ว่ารูปแบบการไหลแบบ slug นั้นเกิดขึ้นในทุกกรณีที่ทำการศึกษา โดยมีขนาดความยาวของ slug ที่ 50 mm ซึ่งมากกว่าผลจากการจำลองการไหลกรณีอื่น ๆ ค่อนข้างมากและที่ $We=0.02$ จะพบการไหลแบบขนานที่มีลักษณะผิวสัมผัสระหว่างของเหลว

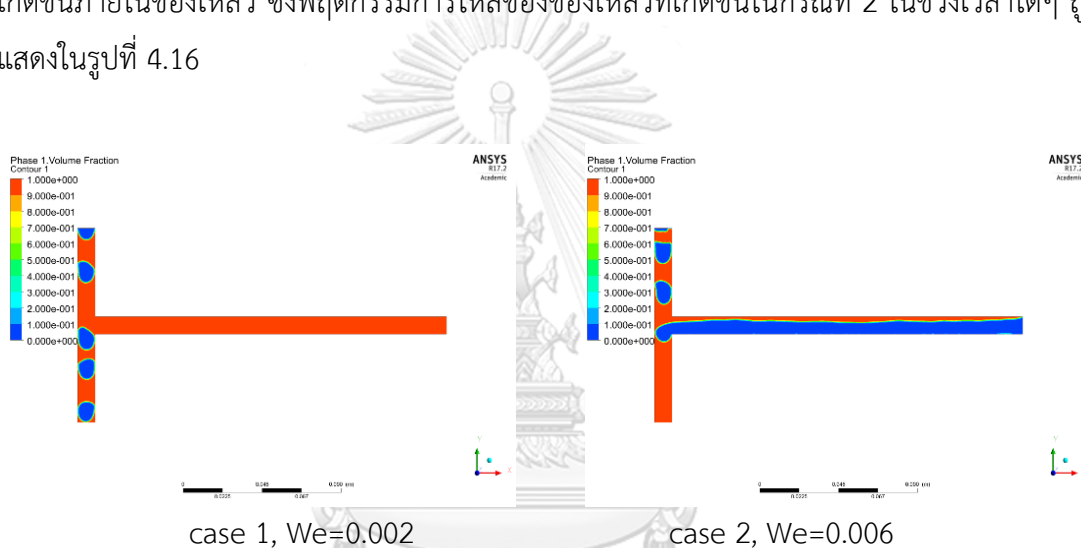
ทั้งสองชนิดแบบไม่คงที่ และที่ $We=0.02$ จะเป็นลักษณะการไหลแบบขนานเนื่องจากความเร็วการไหลของของเหลวที่เพิ่มขึ้นและเนื่องจากการไหลในท่อที่มีขนาดใหญ่ ($d_h \geq 3$) ผลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงจึงมีอิทธิพลมากกว่าผลเนื่องจากแรงภายในของเหลวจึงทำให้การไหล slug ไม่สามารถเกิดขึ้นได้อีกต่อไป



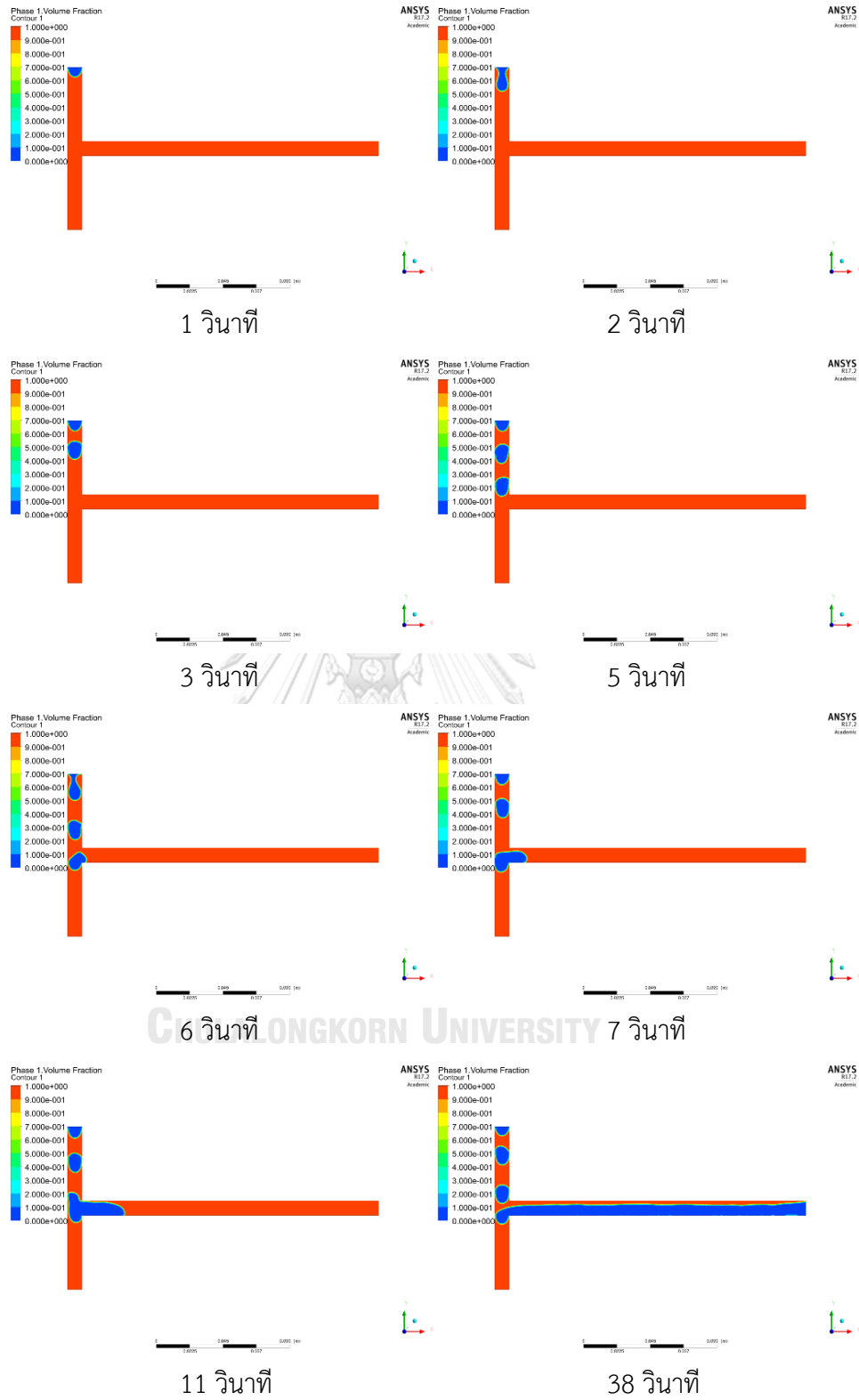
รูปที่ 4.14 รูปแบบการไหลที่เกิดภายในท่อขนาด 6 mm

ผลจากการจำลองการไหลในท่อที่มีขนาด 10 mm ถูกแสดงในรูปที่ 4.15 ที่ค่า We ต่างกันในช่วง 0.002-0.02 เมื่อพิจารณาผลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อของเหลวภายในท่อนั้น ในทิศทาง y จะเห็นได้ว่าการไหลในท่อที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ไม่สามารถทำให้เกิดการ

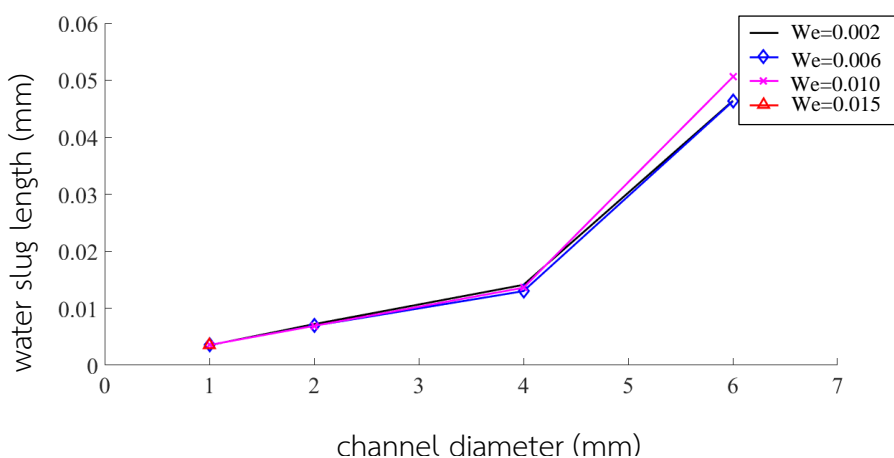
ไหลแบบ slug ได้ในทุกค่า We ที่ทำการศึกษา โดยเมื่อน้ำซึ่งเป็น dispersed phase ไหลเข้ามาสู่ท่อแล้วจะเกิดการขาดเป็นหยด (droplet) ทันทีตั้งแต่บริเวณทางเข้า ซึ่งเมื่อพิจารณากรณีที่ 1 ที่ค่า $We=0.002$ continuous phase ที่ขาดเป็นหยดจะไหลลงด้านล่างอย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการไหลเข้าสู่บริเวณ mixing zone แต่ที่ $We=0.006$ เมื่อความเร็วการไหลของของเหลวทั้งสองชนิดเพิ่มมากขึ้นหยดของ disperse phase ที่ลงมาจากท่อด้านบนนั้นจะมาหยุดอยู่ที่บริเวณ T-junction และเมื่อหยดของ disperse phase ที่ไหลลงมาจากด้านบนทำให้เกิดการรวมตัวกันของของเหลวที่บริเวณ junction และเกิดการขยายตัวไปตามแนวของ mixing zone โดยไม่เกิดการไหลเป็นการขยายตัวไปเรื่อย ๆ ตามแนวแกน x และเคลื่อนตัวผ่านไปในลักษณะการไหลแบบขนานโดยไม่พบการหมุนวนเกิดขึ้นภายในของเหลว ซึ่งพฤติกรรมไหลของของเหลวที่เกิดขึ้นในกรณีที่ 2 ในช่วงเวลาใดๆ ถูกแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 รูปแบบการไหลที่เกิดภายในท่อขนาด 10 mm



รูปที่ 4.16 พฤติกรรมการไหลที่ค่า $We=0.006$ ภายในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ในช่วงเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงความยาวของ slug ในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_h) ของแต่ละค่า Weber number คงที่

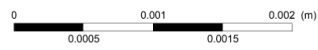
จากการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดท่อที่มีต่อรูปแบบการไหล โดยทำการพิจารณาในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันตั้งแต่ 1-10 mm เมื่อนำผลที่ได้จากการศึกษามาทำการเปรียบเทียบความยาวของ water slug เทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ที่ค่า We เดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวของ slug การเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนั้นส่งผลให้ slug มีความยาวเพิ่มมากขึ้น เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนั้นเพิ่มขึ้นในช่วง 1-4 mm ขนาดของ slug จะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ อย่างไรก็ตามความยาวของ slug จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเพิ่มขึ้นเป็น 6 mm เนื่องจากการที่ขนาดเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่ขึ้นจึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของเหลวลดลงอย่างมาก ทั้งนี้ขนาดของ slug ที่สั้นกว่าจะส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล เนื่องจากพื้นที่การถ่ายเทมวลมากขึ้น นอกจากนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ลดลงนั้นยังส่งผลให้ circulation part สั้นลงซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทมวลด้วยเช่นกัน

4.5 ผลเนื่องจากการขยายขนาดท่อต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน slug

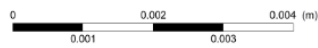
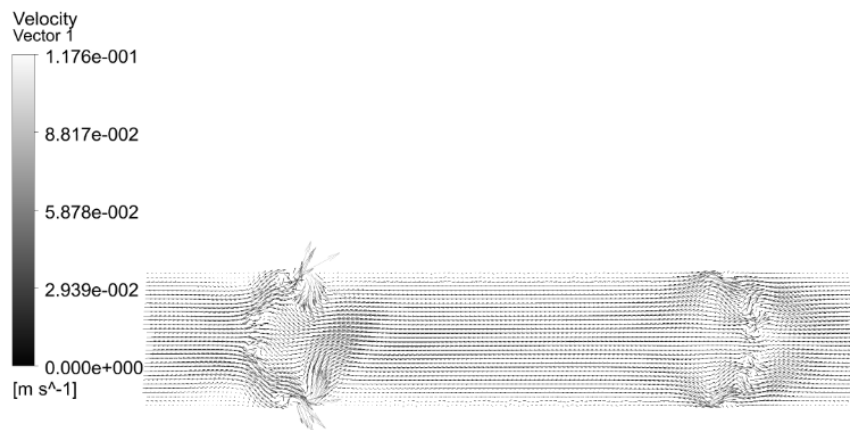
ลักษณะการหมุนวนที่เกิดขึ้นภายใน slug นั้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการถ่ายเทต่าง ๆ โดยจากผลการศึกษาพบว่าที่การไหลในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 3 mm ซึ่งไม่พิจารณาถึงผลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเนื่องจากการไหลที่เกิดในท่อที่มีขนาดเล็ก นั้นผลเนื่องจากแรงตึงผิว ความหนืดของสาร และ inertia effect มีอิทธิพลต่อการกำหนดการไหลมากกว่าผลเนื่องจากแรงโน้มถ่วง รูปที่ 4.18 แสดงตัวอย่างสนามการไหลโดยรวม (total velocity

field) ภายใน water slug ที่เวลาใด ๆ เมื่อทำการศึกษาที่เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d_h) ขนาดต่าง ๆ รูปที่ 4.18a และ b แสดงรูปแบบของเวกเตอร์ความเร็วของ water slug ที่ไหลในท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm และ 2 mm ตามลำดับ พบว่าองค์ประกอบของความเร็วตามแนวอนมิตีพลาอย่างมากที่สุดกำหนดทิศทางการไหลของของเหลวตามแนวแกน x ทั้งนี้เมื่อการไหลเกิดขึ้นในท่อขนาดเล็ก แรงโน้มถ่วงมีผลต่อการกำหนดรูปแบบการไหลน้อยมาก

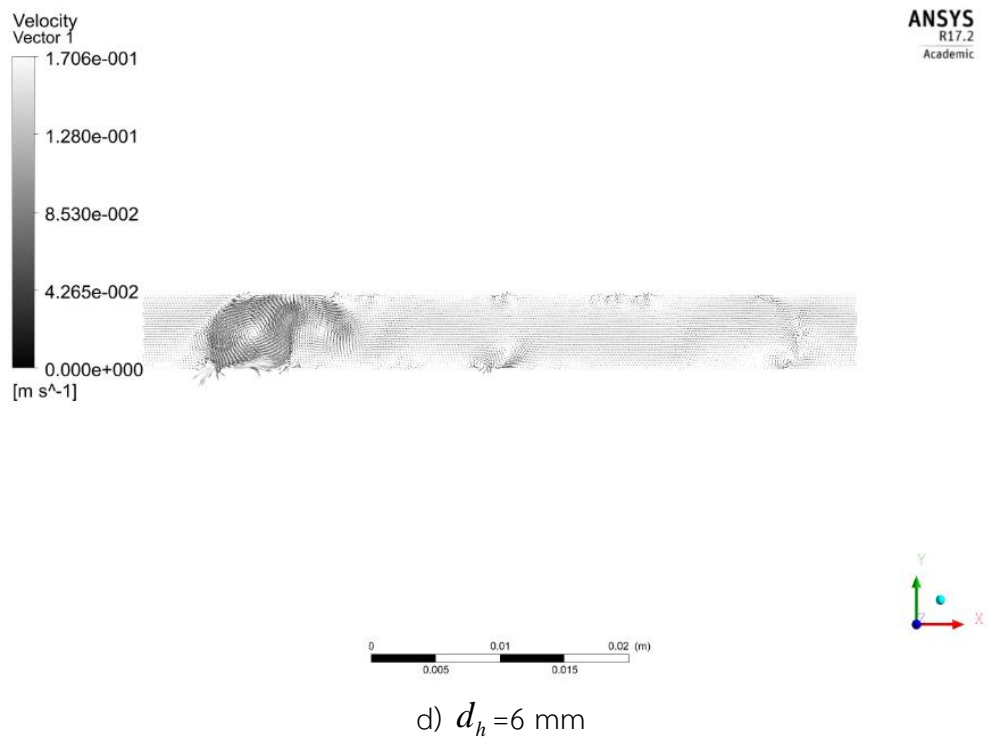
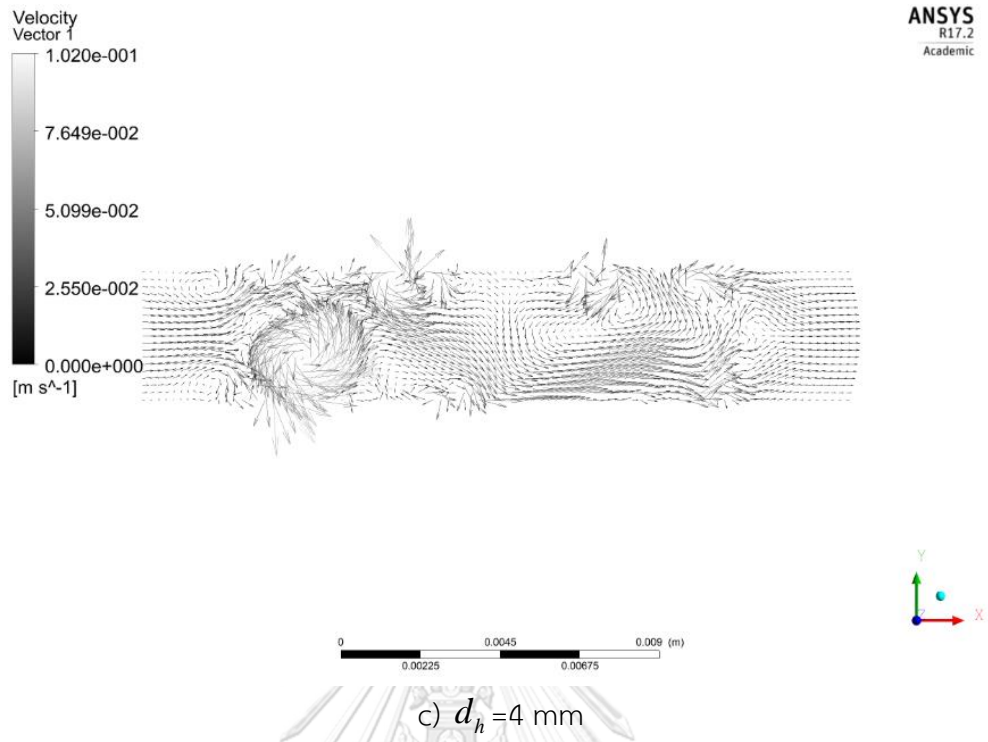
รูปที่ 4.18c แสดงรูปแบบของ velocity vector ของ water slug ที่ไหลในท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm จากผลจากการศึกษาจะเห็นว่าองค์ประกอบของความเร็วตามแนวอนมิตีพลาอย่างมากที่สุดกำหนดทิศทางการไหลของของเหลวตามแนวแกน x เช่นเดียวกันกับการไหลภายในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-2 mm และจะพบว่าเวกเตอร์ความเร็วที่มีความปั่นป่วนและมีความรุนแรงของการหมุนวนที่บริเวณขอบด้านหัวและท้ายของ slug รูปที่ 4.18d แสดงเวกเตอร์ความเร็วของ water slug ที่ไหลในท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm พบว่าลักษณะเวกเตอร์ความเร็วที่ปรากฏภายใต้เงื่อนไขการดำเนินการนี้จะมี ความปั่นป่วนมากกว่าการไหลที่ขนาดท่ออื่น (1-4 mm) โดยที่บริเวณขอบด้านท้าย (ซ้าย) ของ slug ของเหลวจะเกิดการหมุนวนอยู่ในบริเวณแคบ ๆ อย่างรุนแรง ในขณะที่ขอบที่บริเวณด้านหน้า slug นั้น (ขวา) จะเห็นว่ายังคงมีความปั่นป่วนเกิดขึ้นแต่จะเกิดน้อยกว่าด้านท้ายของ slug และนอกจากนั้นยังพบว่ามี การก่อตัวของการหมุนวนขนาดเล็กที่บริเวณขอบด้านที่ติดกับผนังท่อการหมุนวนที่เกิดขึ้นภายใน slug จะไม่สามารถสังเกตเห็นเมื่อจำลองการไหลโดยใช้กรอบอ้างอิงที่หยุดนิ่ง (stationary reference frame)



a) $d_h = 1$ mm



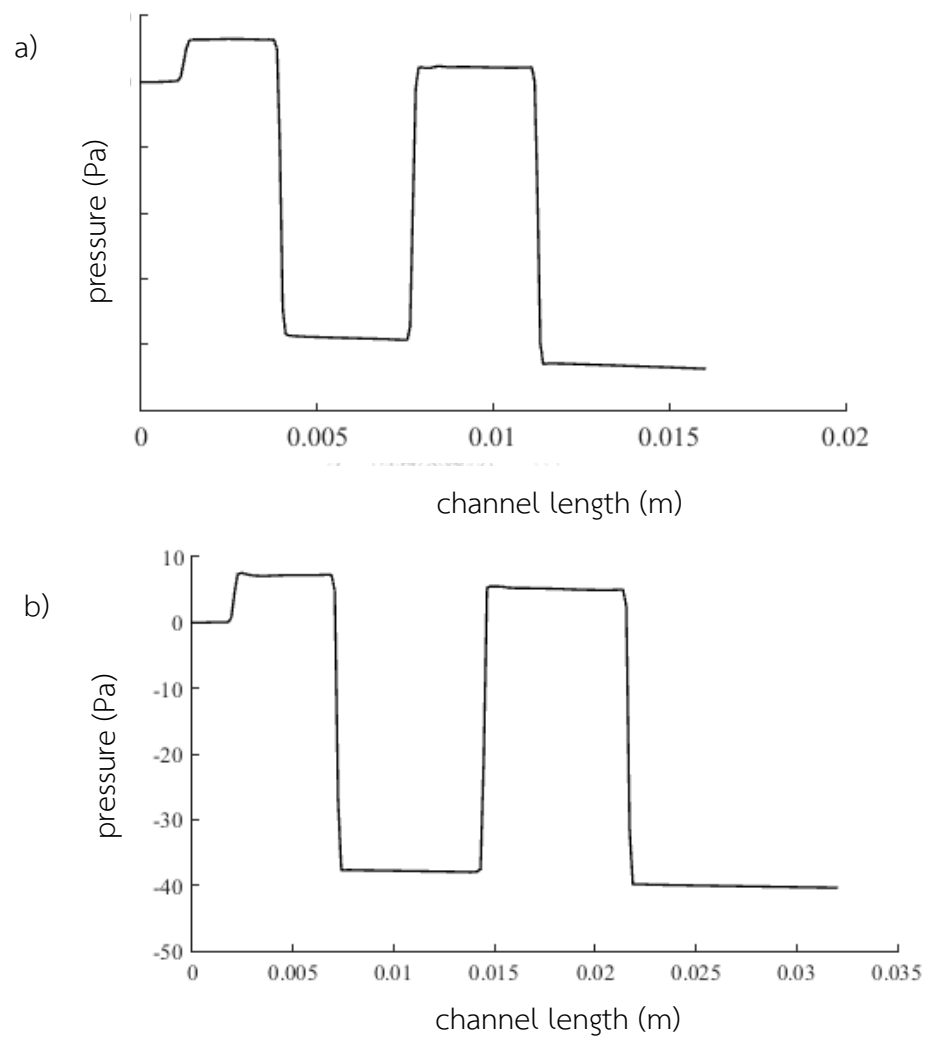
b) $d_h = 2$ mm



รูปที่ 4.18 เวกเตอร์ความเร็วใน water slug ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อขนาดต่างๆ, $We=0.002$

4.6 รูปแบบการกระจายตัวของความดัน

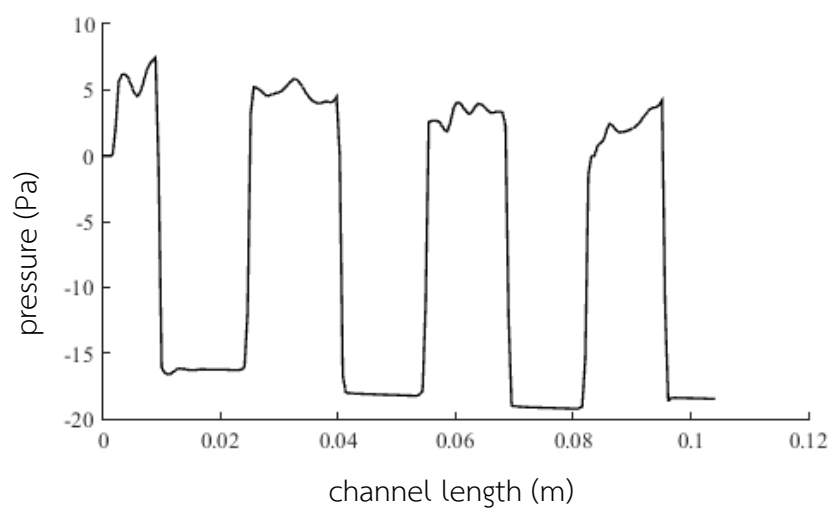
รูปที่ 4.19 แสดงพฤติกรรมของการกระจายตัวของความดันตามแนว centerline ของท่อขนาด 1-2 mm ภายในบริเวณ mixing zone โดยจากการจำลองการไหลพบว่ามี การกระจายตัวของความดันอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งความดันภายใน dispersed phase จะมีค่าสูงกว่ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การกระจายตัวของความดันภายใน continuous phase



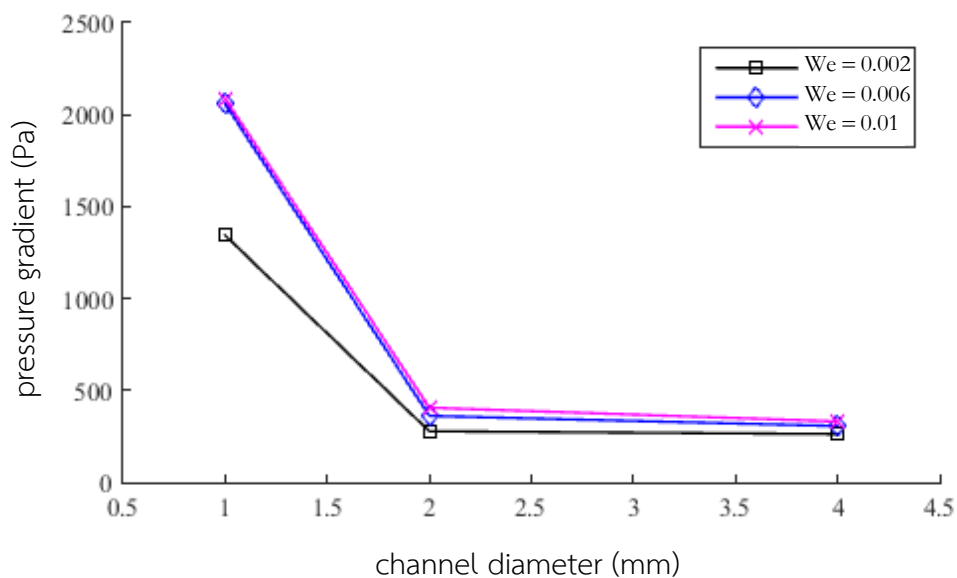
รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของความดันตามแนว centerline a) ท่อขนาด 1 mm, b) ท่อขนาด 2 mm

รูปที่ 4.20 แสดงพฤติกรรมของการกระจายตัวของความดันตามแนว centerline ของการไหลในท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d_h) 4 mm และ 6 mm ซึ่งแรงโน้มถ่วงจะเข้ามามีผลต่อพฤติกรรมของการไหล

ของของเหลว โดยทำการเก็บข้อมูลในบริเวณ mixing zone โดยพบว่ามีลักษณะบางประการที่คล้ายกับการไหลในท่อขนาดเล็กที่ผลจากแรงโน้มถ่วงน้อยมากจนไม่ถูกนำมาพิจารณา ซึ่งคือการศึกษาความดันภายใน dispersed phase นั้นจะมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความดันภายใน continuous phase อย่างไรก็ตามเมื่อการไหลนั้นพิจารณาผลจากแรงโน้มถ่วงจะพบว่าการกระจายตัวของความดันภายใน dispersed phase นั้นพบว่าการแกว่งของความดันในขณะที่การกระจายตัวของความดันภายใน continuous phase ยังคงเป็นแบบราบเรียบ



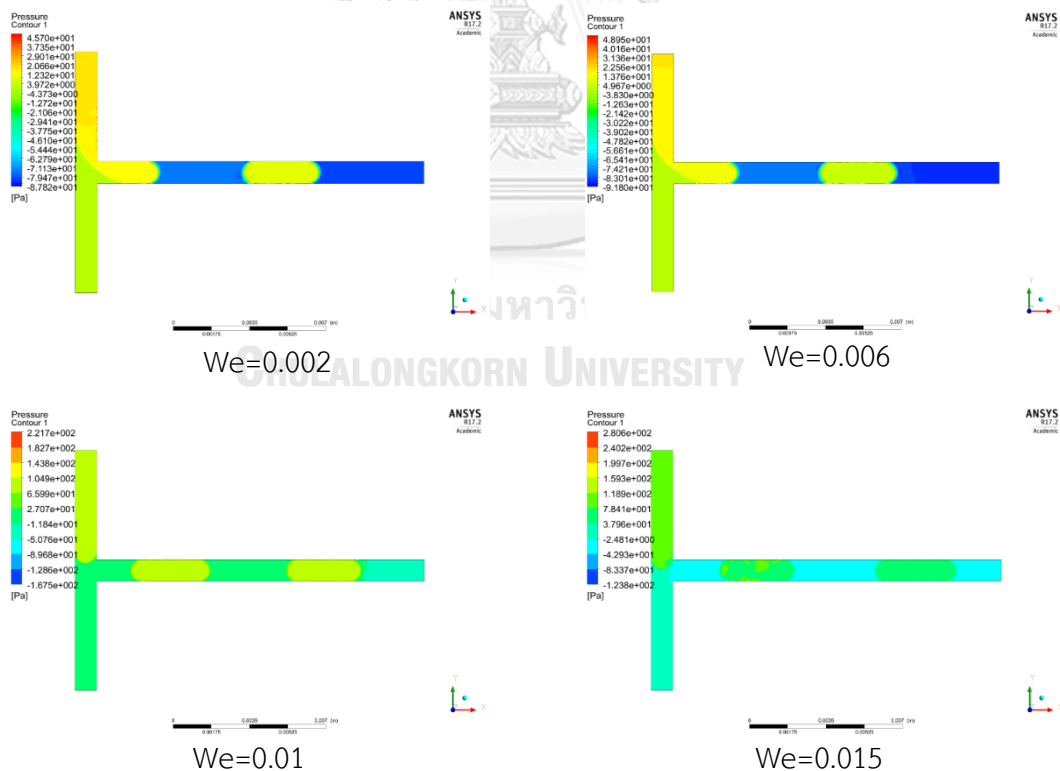
รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของความดันตามแนว centerline ของท่อขนาด 4 mm



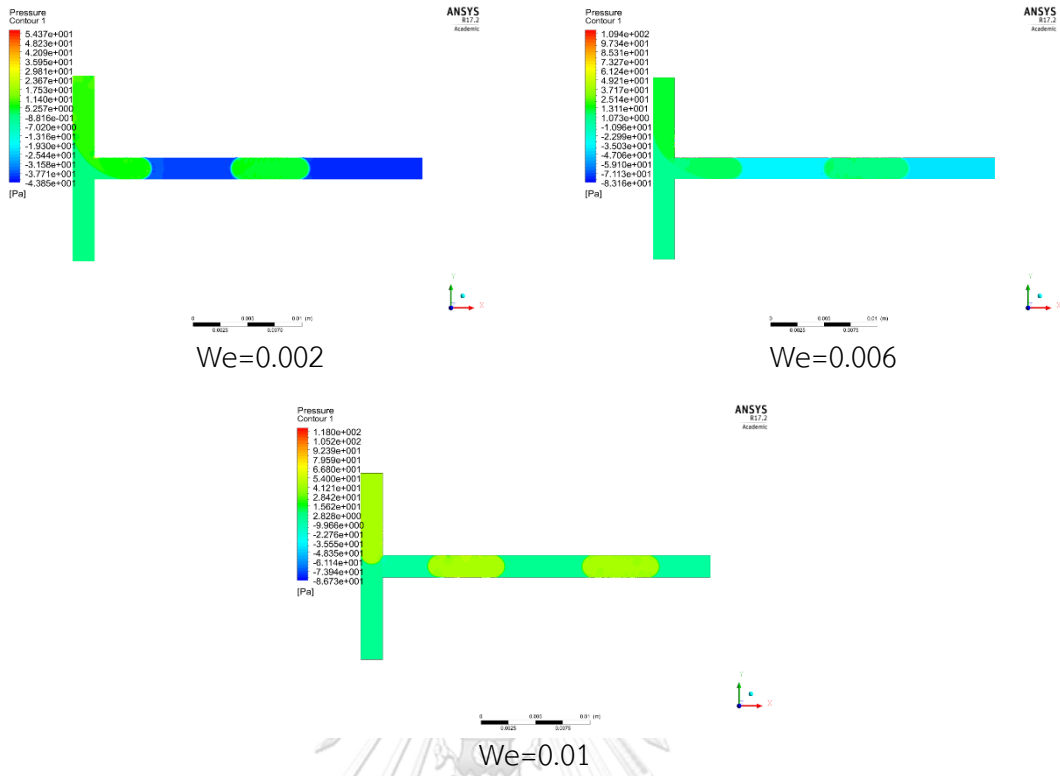
รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงของความดันตกคร่อม slug เมื่อไหลผ่านท่อที่มีขนาดต่างกัน

ทำการพิจารณาผลของการขยายขนาดท่อที่มีต่อความดันตกคร่อมของ water slug ที่เกิดในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1-4 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยจากรูปจะเห็นว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อขนาด 1 mm ความดันตกคร่อม water slug จะมีค่าประมาณ 1300 Pa ที่ค่า $We=0.002$ และ 0.006 ความดันตกคร่อม water slug จะมีค่าประมาณ 2100 Pa และเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมีเป็นขนาด 2 mm และ 4 mm ความดันตกคร่อม water slug จะมีค่าประมาณ 500 Pa ที่ค่า $We=0.001$ ถึง 0.006 ทั้งคู่ โดยจะเห็นได้ว่าความดันตกคร่อมลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเกิดการไหลแบบ slug ในท่อที่มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถลดขนาดปั๊มที่จะใช้กับเครื่องปฏิกรณ์เพื่อลดการใช้พลังงานในการดำเนินการได้

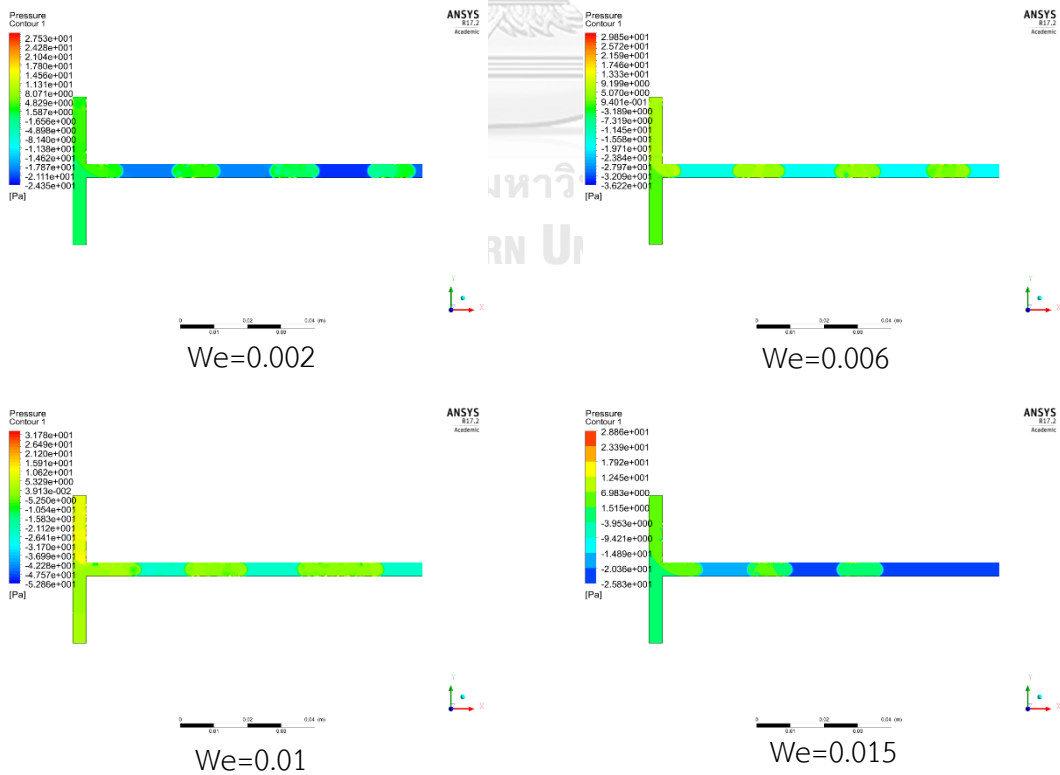
รูปแบบการกระจายตัวของความดันภายใน slug ที่ไหลในท่อทำการขยายขนาดดังแสดงในรูปที่ 4.22-4.25 จากผลการศึกษาค้นคว้าจะพบว่าความดันในของเหลวแต่ละวัฏภาคมีรูปแบบการกระจายตัวแบบราบเรียบและเมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของความดันที่ค่า We เดียวกัน เมื่อการไหลนั้นเกิดในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_h) เพิ่มมากขึ้น จะสังเกตเห็นว่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่าลดลง



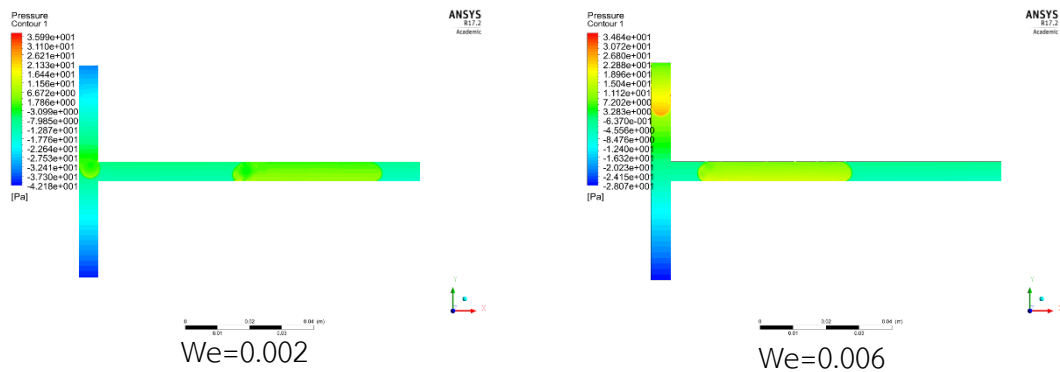
รูปที่ 4.22 รูปทรงความดันภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_h) 1 mm



รูปที่ 4.23 รูปทรงความดันภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_h) 2 mm



รูปที่ 4.24 รูปทรงความดันภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_h) 4 mm



รูปที่ 4.25 รูปทรงความดันภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_h) 6 mm

4.7 การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทมวล

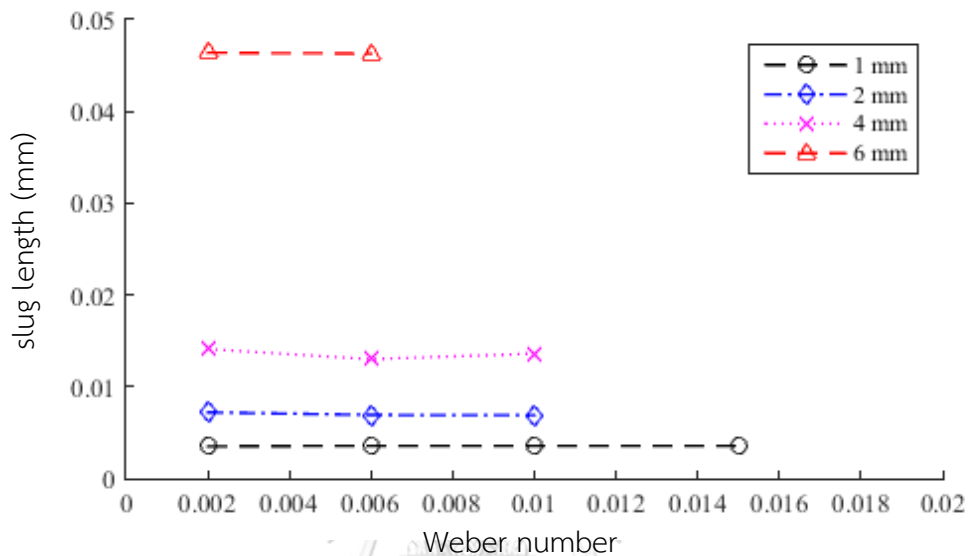
การสกัดด้วยตัวทำละลายที่มีรูปแบบการไหลแบบ slug ที่ดำเนินการโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดจุลภาคเป็นที่ยอมรับว่ามีความสามารถในการสกัดที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์แบบอื่น ๆ อย่างไรก็ตามเครื่องปฏิกรณ์แบบจุลภาคนั้นมีขนาดเล็กทำให้ผลผลิตโดยรวมถือว่ามึปริมาณน้อย การเพิ่มปริมาณผลผลิตโดยการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ (scaled-up) จึงเป็นอีกทางเลือกที่ถูกนำมาใช้ อย่างไรก็ตามการที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อภายในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการไหลและพฤติกรรมของของเหลว ในงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาถึงปัจจัยที่ส่งผลถึงความสามารถในการถ่ายเทมวล อาทิเช่น อัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตร, ความเร็ว slug, และเวลาการหมุนวน

4.7.1 การเปลี่ยนแปลงขนาดและอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร

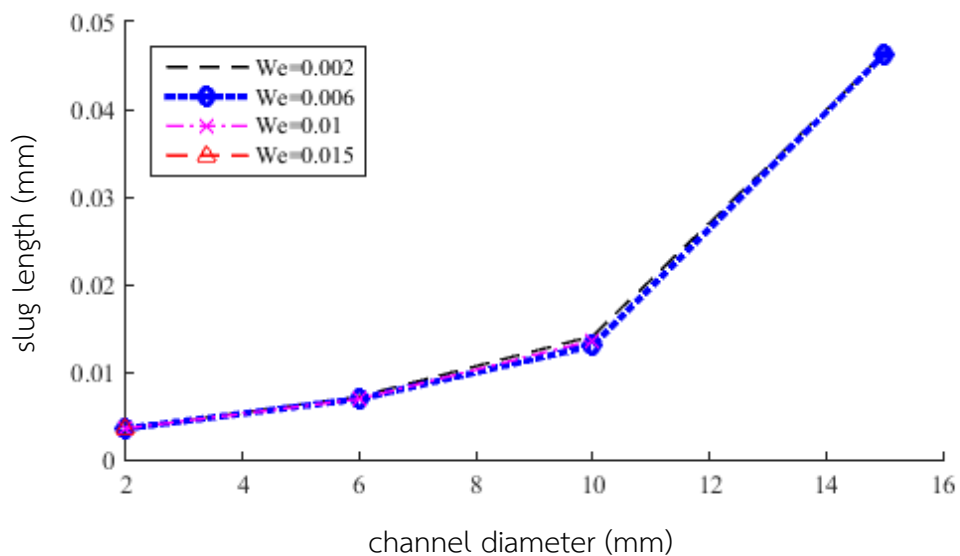
การเปลี่ยนแปลงความยาวของ slug ส่งผลต่อความสามารถในการถ่ายเทมวลเช่นกัน โดยเมื่อพิจารณา slug ที่มีความยาวมากขึ้น เวลาที่อนุภาคของเหลวใช้เพื่อเคลื่อนที่จากปลายด้านหนึ่งไปยังปลายอีกด้านหนึ่งของ slug นั้นเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ภายใน slug ที่มีความยาวน้อยกว่านั้นอนุภาคของเหลวจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่น้อยกว่าจึงทำให้สามารถเคลื่อนที่ไปรับสารละลายที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและกระจายความเข้มข้นไปยังของเหลวที่อยู่ในบริเวณที่ไม่เกิดการเคลื่อนที่ (stagnant zone) บริเวณกลางของ slug ได้

จากผลการศึกษาพบว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d_h) เดียวกันความเร็วของ slug ที่แต่ละค่า Weber number นั้นมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยจนอาจอนุมานได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาด slug ทั้งนี้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการศึกษาอื่นที่ว่าความเร็วการไหลนั้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด slug ดังแสดงรูปที่ 4.26 ซึ่งจากผลการจำลองการไหลจะพบว่าขนาดของ slug

นั่นจะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อไหลในท่อที่มีขนาด 1-2 mm ในทุกค่า Weber number ที่ทำการศึกษา ในขณะที่ขนาดของ slug มีความยาวเพิ่มขึ้นเมื่อทำการศึกษาในท่อที่มีขนาด (d_h) 4 mm โดยมีความยาวกว่า slug ที่ไหลในท่อขนาด 1-2 mm เล็กน้อยอย่างไรก็ตามพบว่า slug มีการเปลี่ยนแปลงความยาวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อทำการศึกษาในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.27

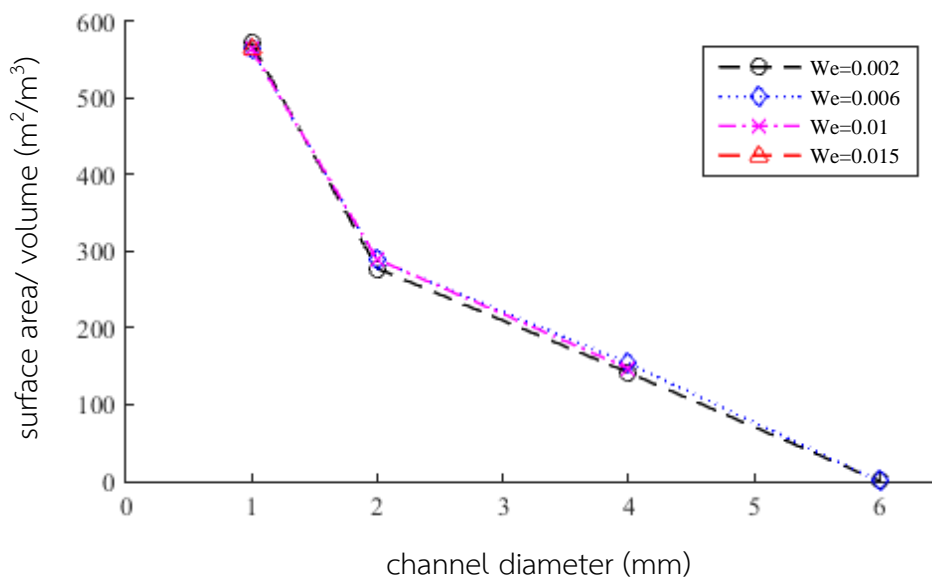


รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงความยาว slug ที่ค่า Weber number ต่าง ๆ



รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงความยาว slug ที่ไหลด้วยค่า Weber number ต่าง ๆ ในท่อที่ทำการขยายขนาด

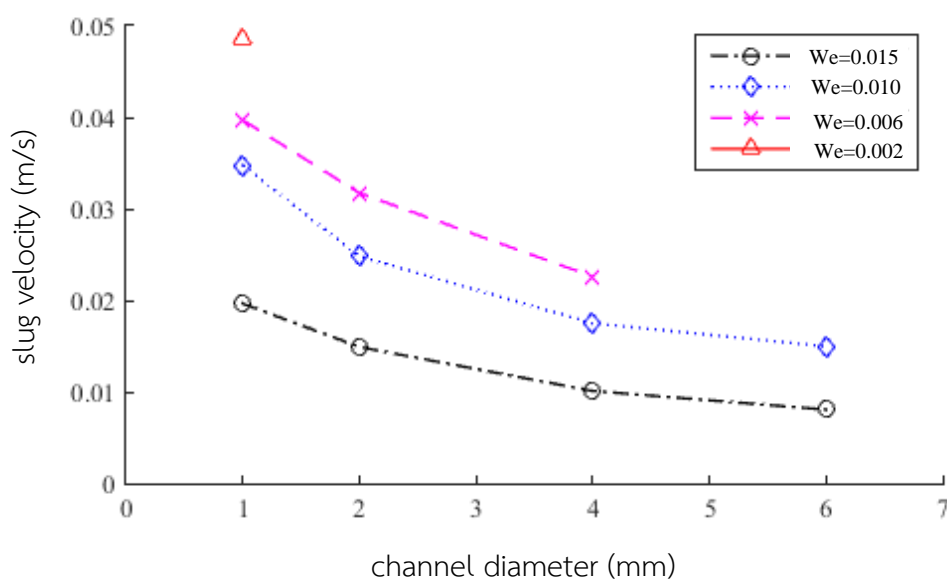
การเปรียบเทียบผลจากการเพิ่มขนาดท่อที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรแสดงในรูปที่ 4.28 ซึ่งจากการจำลองการไหลจะพบว่าขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรจะมีขนาดลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมีขนาดเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการไหลในท่อที่มีขนาดเล็กกว่าทำให้มีพื้นที่สำหรับการถ่ายเทมากกว่า โดยที่ค่า $We=0.002$ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1 mm จะให้ค่าขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรอยู่ที่ $571.429 \text{ m}^2/\text{m}^3$, ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 2 mm จะให้ค่าขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรอยู่ที่ $277.778 \text{ m}^2/\text{m}^3$, ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 4 mm จะให้ค่าขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรอยู่ที่ $141.844 \text{ m}^2/\text{m}^3$ และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 6 mm จะให้ค่าขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรอยู่ที่ $0.023 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบขนาดของพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 2, 4, และ 6 mm จะพบว่าอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรมีค่าลดลง 51.38%, 75.18%, และ 99.99% ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

4.7.2 ความเร็ว slug

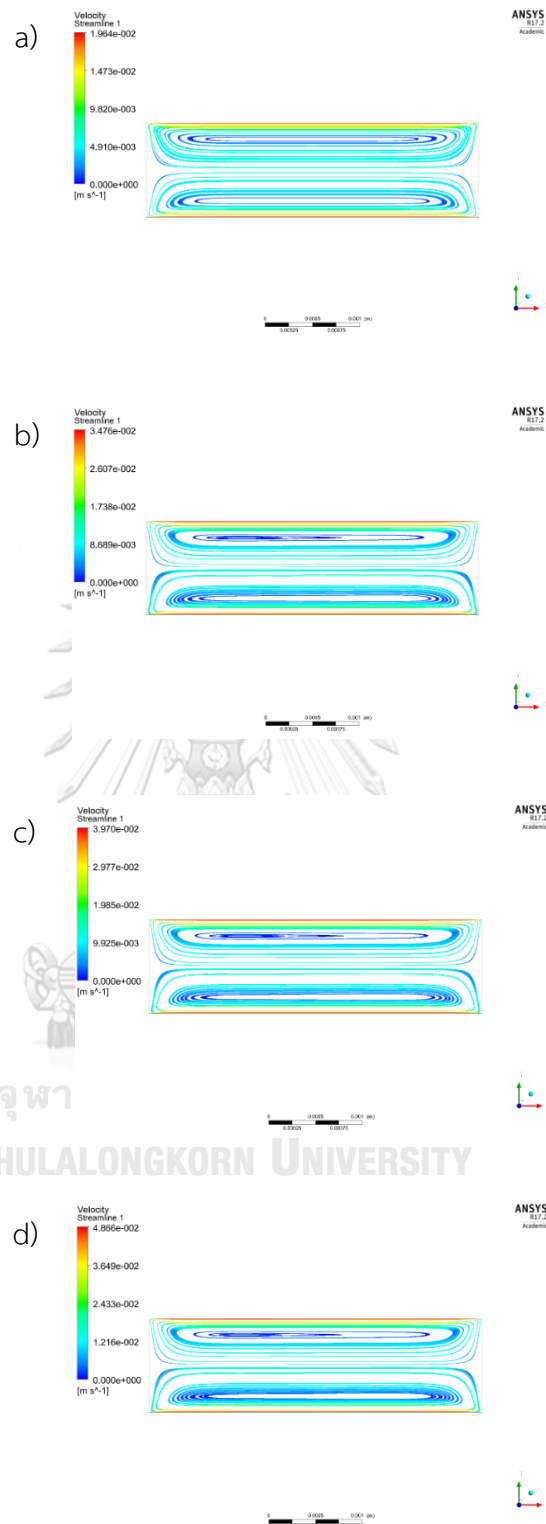
รูปที่ 4.29 แสดงผลเนื่องจากการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d_h) ต่อความเร็วการไหลของ slug ที่ได้จากการจำลองการไหลที่ค่า Weber number เดียวกัน จะเห็นได้ว่าเมื่อของเหลวไหลที่ Weber number เดียวกันความเร็วของ slug จะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อไหลในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d_h) เพิ่มมากขึ้น



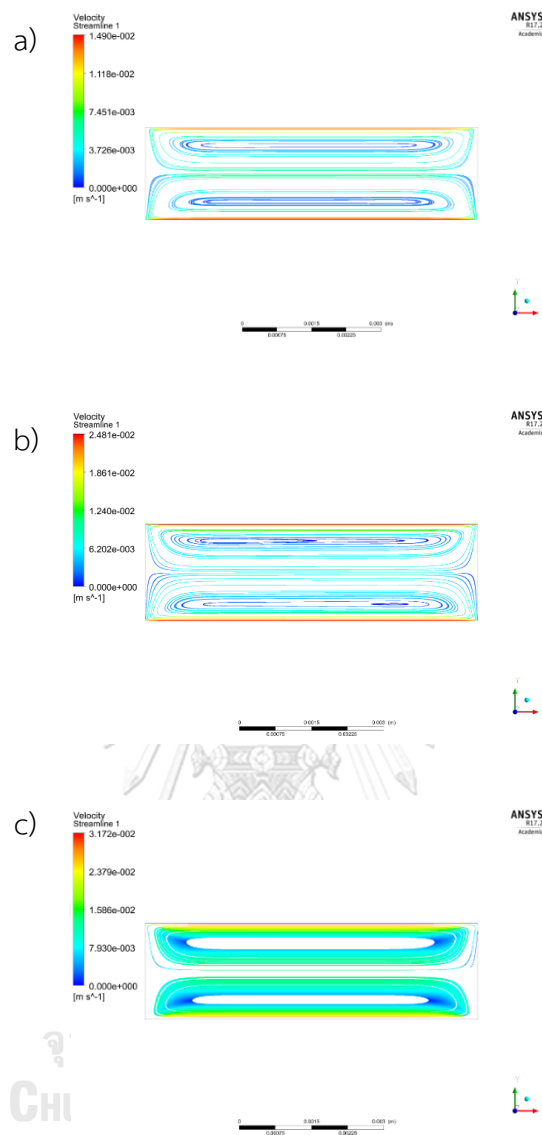
รูปที่ 4.29 ความเร็วการไหลของ slug เมื่อไหลในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ

4.7.3 เวลาการหมุนวน

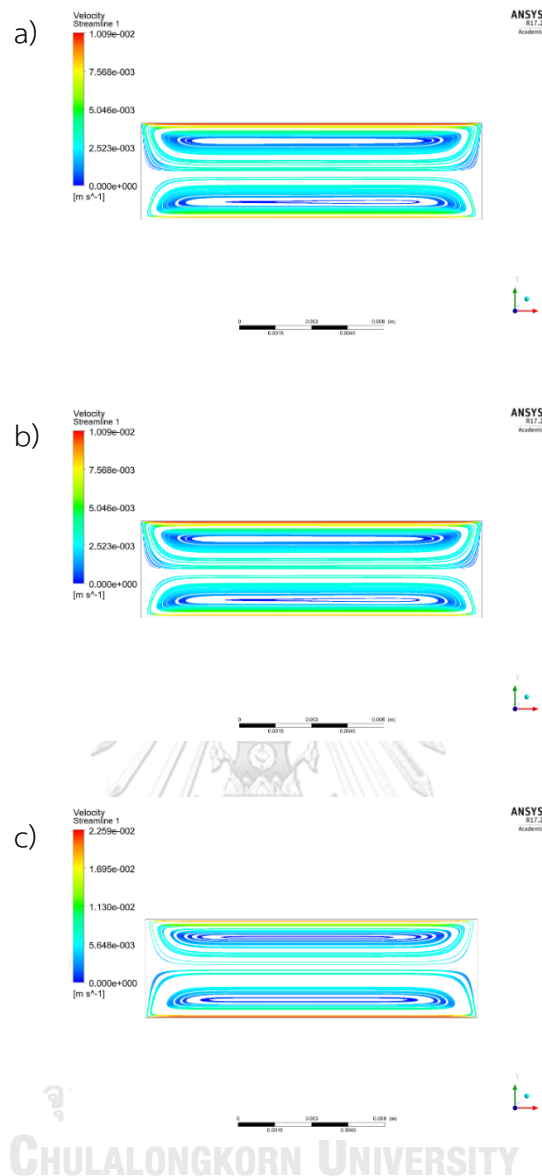
เนื่องจากการจำลองการไหลโดยใช้กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง (stationary reference frame) ไม่สามารถแสดงรูปแบบการหมุนวนที่เกิดขึ้นภายใน slug ที่ส่งผลไปยังความเร็วของอัตราการผสมได้ จึงทำการศึกษารูปแบบการหมุนวนของของเหลวภายใน slug โดยใช้แบบจำลอง unit cell โดยเมื่อของเหลว 2 ชนิดที่ไม่ละลายเข้าหากันไหลภายในท่อโดยมีรูปแบบการไหลแบบ slug, liquid slug จะเคลื่อนที่ไปยังทางออกของท่อด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง และของเหลวที่อยู่ภายใน slug จะเกิดการหมุนวนอยู่ภายในในทิศทางตรงข้ามกับการไหล ด้วย streamline แบบปิด และลักษณะการหมุนวนจะสมมาตรกับแกนท่อ (channel axis) ดังแสดงในรูปที่ 4.30-4.32 อย่างไรก็ตาม อัตราการผสม (mixing rate) นั้นจะพิจารณาได้จากเวลาการหมุนวนที่เกิดขึ้นภายใน slug ซึ่งการหมุนวนจะถูกกำหนดให้เป็นเวลาที่ของเหลวใช้ในการเคลื่อนที่จากปลายด้านหนึ่งของ slug ไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง



รูปที่ 4.30 streamline ภายใน slug ที่ไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_h) 1 mm,
 a) $We=0.002$, b) $We=0.006$, c) $We=0.01$, และ d) $We=0.015$



รูปที่ 4.31 streamline ภายใน slug ที่ไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_h) 2 mm,
 a) $We=0.002$, b) $We=0.006$, c) $We=0.01$, และ d) $We=0.015$

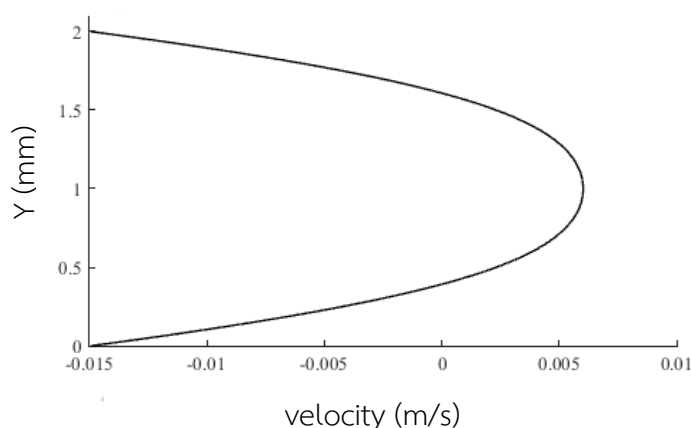


รูปที่ 4.32 streamline ภายใน slug ที่ไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_h) 4 mm,

a) $We=0.002$, b) $We=0.006$, c) $We=0.01$, และ d) $We=0.015$

ผลการจำลองการไหลได้แสดงให้เห็นว่ารูปแบบของการหมุนวนนั้นจะมีลักษณะคล้ายกันสำหรับทุกกรณีที่ทำการศึกษา โดยที่การหมุนวนนั้นสมมาตรกับแกน slug (แกน x) ภายในการหมุนวนแต่ละรูปจะพบว่าบริเวณที่ของเหลวหยุดนิ่ง (stagnant zone) อยู่บริเวณศูนย์กลางของการหมุนวนซึ่งไม่มีการเคลื่อนที่เข้าหรือออกจากศูนย์กลาง เนื่องจากทุกการศึกษานี้ไม่พบการก่อดัวของฟิล์มของ continuous phase และความเร็วสูงสุดสามารถพบได้ที่ของเหลวซึ่งอยู่ในบริเวณที่อยู่ติดกับผนังท่อ และจากรูปแบบการกระจายตัวของความเร็วดังแสดงในรูปที่ 4.33 ซึ่งมีลักษณะเดียวกันในทุกกรณีที่ทำการศึกษา แสดงให้เห็นว่าเกิดการหมุนวนภายใน slug โดยที่ของเหลวที่อยู่บริเวณแกน slug จะมี

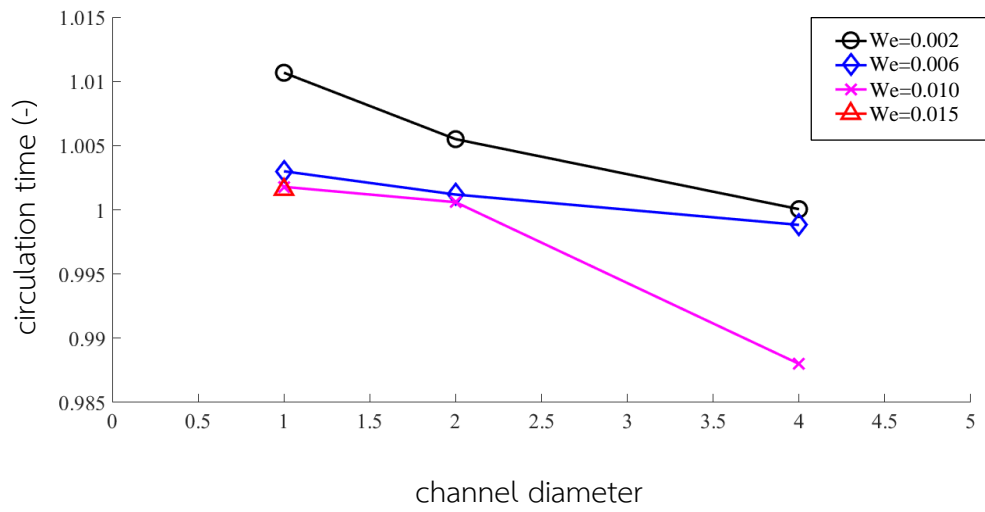
เครื่องหมายเป็นบวก (+) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าของเหลวเคลื่อนที่ไปทางด้านขวาและมีความเร็วเป็น 0 ที่บริเวณ stagnant zone ในขณะที่การไหลจะเริ่มมีทิศทางการไหลในทิศตรงกันข้ามโดยความเร็วจะมีค่าเป็นลบ (-) เมื่อระยะห่างนั้นเลื่อนออกไปจาก stagnant zone ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการไหลที่มีทิศทางการตรงกันข้าม อันเป็นเหตุให้การไหลที่เกิดภายใน slug นั้นเกิดการหมุนวนภายใน โดยลักษณะของการหมุนวนนั้นมีรูปแบบที่คล้ายกันสำหรับทุกกรณีที่ทำการศึกษา



รูปที่ 4.33 velocity profile เมื่อวัดจากศูนย์กลางของ slug ที่ได้จากการจำลองการไหลโดยใช้แบบจำลอง unit cell ในท่อขนาด 2 mm, $We=0.002$

ความเร็วสูงสุดของการหมุนวนจะเปลี่ยนแปลงตาม Weber number จากรูปที่ 4.32a-c แสดงเวลาการหมุนวนของของเหลวภายใน slug ที่ไหลในท่อขนาดต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 1-4 mm โดยจากผลการจำลองการไหลพบว่าเวลาการหมุนวนจะลดลงเมื่อไหลในท่อที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

รูปที่ 4.34 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเวลาการหมุนวนของการไหลในท่อที่ขยายขนาด เมื่อพิจารณาที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเดียวกันจะพบว่าเวลาการหมุนวนจะลดลงเมื่อ Weber number มีค่ามากขึ้น และจากรูปจะเห็นว่าผลจากการเพิ่มขนาดท่อนั้นทำให้เวลาการหมุนวนลดลง โดยที่ค่า $We=0.002$ เมื่อขนาดท่อเป็น 1 mm เวลาการหมุนวนจะมีค่า 0.0107 และลดลง 0.51% และ 0.54% เมื่อขนาดท่อเพิ่มขึ้นเป็น 2 และ 4 mm ตามลำดับ และที่ค่า $We=0.006$ เวลาการหมุนวนจะมีค่า 1.003 เมื่อไหลในท่อขนาด 1 mm และลดลง 0.18%, 0.23% ตามลำดับเมื่อขนาดท่อเพิ่มขึ้นเป็น 2 และ 4 mm เช่นเดียวกันกับการไหลที่ค่า $We=0.010$ เวลาการหมุนวนลดลง 0.11% และ 1.25% เมื่อเปรียบเทียบกับการไหลในท่อขนาด 1 mm ที่มีเวลาการหมุนวนเป็น 1.0017 จากการศึกษาจะพบว่า การไหลในท่อที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้เวลาการหมุนวนนั้นสั้นลง ทั้งนี้เนื่องจากการพิจารณาที่ค่า We เดียวกันทำให้ความเร็วการไหลในท่อที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีค่ามากกว่าเช่นกัน



รูปที่ 4.34 เวลาในการหมุนวนที่เปลี่ยนไปเมื่อไหลในท่อที่ทำการขยายขนาด

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งไปที่การศึกษาผลเนื่องจากการไหลในท่อที่มีการเพิ่มขนาดที่ต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะการหมุนวนที่เกิดขึ้นภายใน slug โดยในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษากับของเหลว 2 ชนิดคือน้ำและโครซีนโดยมีค่า We อยู่ในช่วง 0.002-0.02 ในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัด (cross-section) เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส, ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d_n) ตั้งแต่ 1-10 mm พิจารณาการไหลเป็นแบบ 2 มิติ และได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้สำหรับการศึกษานี้กับผลจากการทดลองก่อนหน้าดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 ซึ่งพบว่าแบบจำลองมีความถูกต้อง และมีความน่าเชื่อถือเพียงพอ

ทำการพิจารณาเงื่อนไขการดำเนินการที่สามารถรักษารูปแบบการไหลแบบ slug ได้เมื่อการไหลนั้นเกิดขึ้นในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน และเป็นการไหลที่มีความเสถียรกล่าวคือขนาดของ slug นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดความยาวของท่อ แล้วทำการเก็บข้อมูลจากการจำลองรูปแบบการไหลเพื่อนำไปใช้ในการศึกษารูปแบบการหมุนวนภายใน slug รวมทั้งปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการผสม

5.1 ผลเนื่องจากการขยายขนาดท่อ

5.1.1 การเกิดการไหลแบบ slug

เมื่อเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมากขึ้นการไหลแบบ slug จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วการไหลต่ำ โดยค่า Weber number มากสุดที่พบการไหลแบบ slug จะเป็น 0.015, 0.010, และ 0.06 เมื่อพิจารณาการไหลในท่อขนาด 2, 4, และ 6 mm ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีท่อที่มีขนาด 10 mm จะไม่พบการไหลแบบ slug อีกต่อไปในทุกค่า Weber number ที่ได้ทำการศึกษานอกจากนั้นแรงโน้มถ่วงจะไม่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลในท่อที่มีขนาดน้อยกว่า 3 mm แม้ว่าจะเป็นการติดตั้งท่อในแนวตั้ง

5.1.2 ขนาดของ slug และอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร

การเปลี่ยนแปลงของความเร็วการไหลไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของ slug ในขณะที่การเพิ่มขนาดเครื่องปฏิกรณ์ทำให้ขนาดของ slug นั้นมีความยาวเพิ่มมากขึ้นเมื่อพิจารณาที่ค่า Weber number เดียวกัน โดยการเปลี่ยนแปลงความยาวของ slug นั้นจะเปลี่ยนอย่างช้าๆ เมื่อขนาดของท่อเพิ่มขึ้นจาก 1 mm เป็น 4 mm และขนาดของ slug เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในท่อขนาด 6

mm แสดงให้เห็นว่าการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์นั้นทำให้อัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรสำหรับการถ่ายเทโดยการแพร่ นั้นลดลงด้วย

5.1.3 รูปแบบการกระจายตัวของความดัน

รูปแบบการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเมื่อเป็นการไหลในท่อที่มีขนาดน้อยกว่า 3 mm ทั้งภายใน water slug และ kerosene slug โดยที่ความดันภายใน water slug จะสูงกว่า kerosene slug ในทุกกรณี การไหลในท่อที่มีขนาดมากกว่า 3 mm พบว่าการกระจายตัวของความดันภายใน water slug มีลักษณะไม่คงที่ ในขณะที่ใน kerosene slug นั้นการกระจายตัวของความดันแบบสม่ำเสมอ และความดันตกคร่อม water slug ที่พบจะมีค่าลดลง 80.458%, 85.121%, 84.136% ตามลำดับเมื่อเทียบกับการไหลในท่อที่มีขนาด 1 mm

5.1.4 เวลาการหมุนวน

เวลาการหมุนวนที่เกิดขึ้นภายใน slug ในการศึกษานี้จะทำการพิจารณาเฉพาะกรณีของการไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1, 2, และ 4 mm เนื่องจากเป็นการไหลที่ slug ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดความยาวท่อ เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อพิจารณาการไหลที่ Weber number เดียวกันจะพบว่าเมื่อขนาดของท่อเปลี่ยนแปลงจาก 1 mm เป็น 4 mm ที่ $We=0.002, 0.06,$ และ 0.01 เวลาการหมุนวนนั้นจะมีค่าลดลง 1.05%, 1.25% , และ 1.39% ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

- 1) ควรจำลองการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ถูกขยายขนาด โดยในกรณีที่ทำการศึกษาโดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT อาจใช้การสร้าง user define function เพื่อกำหนดกลไกการแพร่ของสารผ่านผิวสัมผัสร่วมกับแบบจำลอง unit cell
- 2) ควรพิจารณาประสิทธิภาพของการสกัดด้วยตัวทำละลายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ขยายขนาดโดยคำนึงถึงผลจากปฏิกิริยาเคมีและกลไกการแพร่ในกรณีเปลี่ยนแปลงชนิดของสารที่ใช้ในการศึกษา

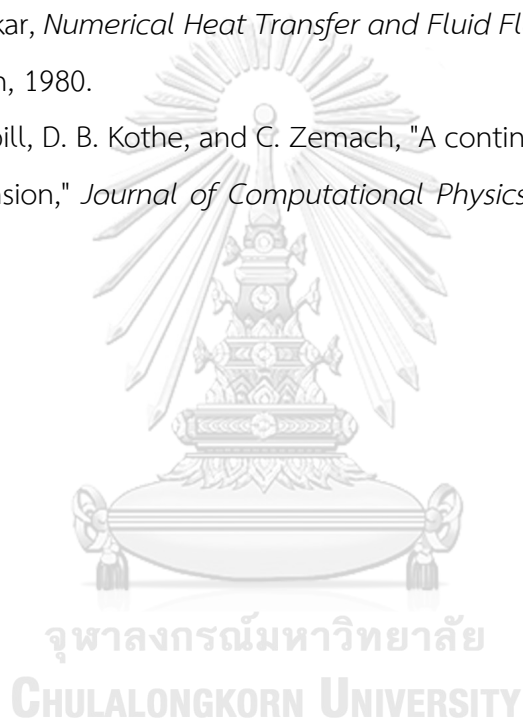
รายการอ้างอิง

- [1] T. Bieringer, S. Buchholz, and N. Kockmann, "Future Production Concepts in the Chemical Industry: Modular – Small-Scale – Continuous," *Chemical Engineering & Technology*, vol. 36, no. 6, pp. 900-910, 2013.
- [2] V. Hessel, I. Vural Gürsel, Q. Wang, T. Noël, and J. Lang, "Potential Analysis of Smart Flow Processing and Micro Process Technology for Fastening Process Development: Use of Chemistry and Process Design as Intensification Fields," *Chemical Engineering & Technology*, vol. 35, no. 7, pp. 1184-1204, 2012.
- [3] P. C. Wankat, *Separation Process Engineering : Includes Mass Transfer Analysis*, 4 ed. Prentice Hall, 2012.
- [4] M. N. Kashid and L. Kiwi-Minsker, "Microstructured Reactors for Multiphase Reactions: State of the Art," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 48, no. 14, pp. 6465-6485, 2009.
- [5] J. R. Burns and C. Ramshaw, "Development of a Microreactor for Chemical Production," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 77, no. 3, pp. 206-211, 1999.
- [6] M. S. G. Nandagopal, R. Antony, and N. Selvaraju, "Comparative study of liquid–liquid extraction in miniaturized channels over other conventional extraction methods," *Microsystem Technologies*, journal article vol. 22, no. 2, pp. 349-356, 2016.
- [7] J. H. Xu, J. Tan, S. W. Li, and G. S. Luo, "Enhancement of mass transfer performance of liquid–liquid system by droplet flow in microchannels," *Chemical Engineering Journal*, vol. 141, no. 1–3, pp. 242-249, 2008.
- [8] A. Sahu, A. B. Vir, L. N. S. Molleti, S. Ramji, and S. Pushpavanam, "Comparison of liquid-liquid extraction in batch systems and micro-channels," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 104, pp. 190-200, 2016.
- [9] M. N. Kashid, A. Renken, and L. Kiwi-Minsker, "Influence of Flow Regime on Mass Transfer in Different Types of Microchannels," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 50, no. 11, pp. 6906-6914, 2011.

- [10] M. Sattari-Najafabadi and M. N. Nasr Esfahany, "Intensification of liquid-liquid mass transfer in a circular microchannel in the presence of sodium dodecyl sulfate," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 117, pp. 9-17, 2017.
- [11] M. N. Kashid, I. Gerlach, S. Goetz, J. Franzke, J. F. Acker, F. Platte, D. W. Agar, and S. Turek., "Internal Circulation within the Liquid Slugs of a Liquid-Liquid Slug-Flow Capillary Microreactor," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 44, no. 14, pp. 5003-5010, 2005.
- [12] A.-L. Dessimoz, L. Cavin, A. Renken, and L. Kiwi-Minsker, "Liquid-liquid two-phase flow patterns and mass transfer characteristics in rectangular glass microreactors," *Chemical Engineering Science*, vol. 63, no. 16, pp. 4035-4044, 2008.
- [13] B. Xu, W. Cai, X. Liu, and X. Zhang, "Mass transfer behavior of liquid-liquid slug flow in circular cross-section microchannel," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 91, no. 7, pp. 1203-1211, 2013.
- [14] J. Jovanović, E. V. Rebrov, T. A. Nijhuis, M. T. Kreutzer, V. Hessel, and J. C. Schouten, "Liquid-Liquid Flow in a Capillary Microreactor: Hydrodynamic Flow Patterns and Extraction Performance," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 51, no. 2, pp. 1015-1026, 2012.
- [15] A. R. Betz and D. Attinger, "Can segmented flow enhance heat transfer in microchannel heat sinks?," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, no. 19, pp. 3683-3691, 2010.
- [16] M. N. Kashid, A. Gupta, A. Renken, and L. Kiwi-Minsker, "Numbering-up and mass transfer studies of liquid-liquid two-phase microstructured reactors," *Chemical Engineering Journal*, vol. 158, no. 2, pp. 233-240, 2010.
- [17] *ANSYS FLUENT Theory Guide*, Release 17.2 ed. 2016.
- [18] M. N. Kashid and D. W. Agar, "Hydrodynamics of liquid-liquid slug flow capillary microreactor: Flow regimes, slug size and pressure drop," *Chemical Engineering Journal*, vol. 131, no. 1-3, pp. 1-13, 2007.

- [19] N. Di Miceli Raimondi, L. Prat, C. Gourdon, and J. Tasselli, "Experiments of mass transfer with liquid–liquid slug flow in square microchannels," *Chemical Engineering Science*, vol. 105, pp. 169-178, 2014.
- [20] Y. Zhang, X. Zhang, B. Xu, W. Cai, and F. Wang, "CFD simulation of mass transfer intensified by chemical reactions in slug flow microchannels," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 93, no. 12, pp. 2307-2314, 2015.
- [21] J. R. Burns and C. Ramshaw, "The intensification of rapid reactions in multiphase systems using slug flow in capillaries," *Lab on a Chip*, 10.1039/B102818A vol. 1, no. 1, pp. 10-15, 2001.
- [22] J. D. Tice, A. D. Lyon, and R. F. Ismagilov, "Effects of viscosity on droplet formation and mixing in microfluidic channels," *Analytica Chimica Acta*, vol. 507, no. 1, pp. 73-77, 2004.
- [23] B. Ahmed, D. Barrow, and T. Wirth, "Enhancement of Reaction Rates by Segmented Fluid Flow in Capillary Scale Reactors," *Advanced Synthesis & Catalysis*, vol. 348, no. 9, pp. 1043-1048, 2006.
- [24] M. N. Kashid, A. Renken, and L. Kiwi-Minsker, "CFD modelling of liquid–liquid multiphase microstructured reactor: Slug flow generation," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 88, no. 3, pp. 362-368, 2010.
- [25] C. J. Shearer, "Mixing of highly viscous liquids: flow geometrics for streamline subdivision and redistribution," *Chemical Engineering Science*, vol. 28, no. 4, pp. 1091-1098, 1973.
- [26] S. K. R. Cherlo, S. Kariveti, and S. Pushpavanam, "Experimental and Numerical Investigations of Two-Phase (Liquid–Liquid) Flow Behavior in Rectangular Microchannels," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, no. 2, pp. 893-899, 2010.
- [27] A. Ufer, D. Sudhoff, A. Mescher, and D. W. Agar, "Suspension catalysis in a liquid–liquid capillary microreactor," *Chemical Engineering Journal*, vol. 167, no. 2, pp. 468-474, 2011.
- [28] Z. Ying, Z. Xubin, X. Bujian, C. Wangfeng, and W. Fumin, "CFD simulation of mass transfer intensified by chemical reactions in slug flow microchannels," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 93, no. 12, pp. 2307-2314, 2015.

- [29] A. Tonkovich *et al.*, "Microchannel Technology Scale-up to Commercial Capacity," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 83, no. 6, pp. 634-639, 2005.
- [30] D. Tsaoulidis and P. Angeli, "Effect of channel size on mass transfer during liquid–liquid plug flow in small scale extractors," *Chemical Engineering Journal*, vol. 262, pp. 785-793, 2015.
- [31] R. I. Issa, "Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting," *Journal of Computational Physics*, vol. 62, no. 1, pp. 40-65, 1986.
- [32] S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- [33] J. U. Brackbill, D. B. Kothe, and C. Zemach, "A continuum method for modeling surface tension," *Journal of Computational Physics*, vol. 100, no. 2, pp. 335-354, 1992.



ภาคผนวก



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายคณิน มงคล เกิดเมื่อวันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2535 สำเร็จการศึกษาระดับ
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร เมื่อปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558

