

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างแบบจำลองการไหลในท่อระดับไมโคร



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๔๙

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Simulation of Microchannel Fluid Flow



**A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BECHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง การสร้างแบบจำลองการไหลในท่อระดับไมโคร

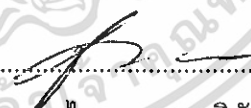
จัดทำโดย นายกมล สุเมธาพิทักษ์ เลขประจำตัว 46010005
นายจันทศักดิ์ หวังรังสีมากุล เลขประจำตัว 46010103

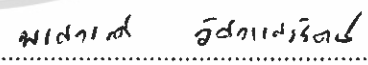
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

ปริญญาบัตร สาขา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร


.....ประธานกรรมการ
(ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)


.....กรรมการ
(รศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์)


.....กรรมการ
(ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การสร้างแบบจำลองการไหลในท่อระดับไมโคร
โดย นายกมล สุเมธาพิทักษ์ รหัสประจำตัว 46010005
นายจันทศักดิ์ หวังรังสิมากุล รหัสประจำตัว 46010103
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์หลักของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คือการออกแบบและพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อใช้อธิบายและทำนายผลที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมการไหลของของไหลในระดับไมโคร (Microfluidic Behavior) ซึ่งโครงการนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหล และการผสมกันของของไหล โดยมีการใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยอาศัยโปรแกรม Comsol Multiphysics 3.2a ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

สำหรับของไหลที่ผสมกันได้ (Miscible Fluid) ภายในช่วงขนาดท่อแคบขนาด 300 – 1400 μm จากการทดลองและการวิเคราะห์ผลพบว่า แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำไปอธิบายผลการทดลองได้อย่างมีนัยสำคัญและสามารถนำไปทำนายพฤติกรรมกระจายตัวของความเร็วและความเข้มข้น ซึ่งเป็นผลไปสู่การวิเคราะห์ประสิทธิภาพ การผสมผ่านดัชนีการผสม (mixing index) สำหรับในของของไหลที่ผสมกันไม่ได้ (Immiscible Fluid) ซึ่งมีลักษณะการไหลแบบเป็นกลุ่มก้อน (slug flow) แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำไปอธิบายผลการทดลองได้เป็นอย่างดีเช่นกัน โดยพิจารณาลักษณะของแคปซูลที่เกิดขึ้น อัตราการไหลและขนาดของท่อโดยจากแบบจำลองพบว่า ค่า aspect ratio จะมีแนวโน้มลดลงในช่วงแรกที่ค่า Re ในช่วง 1-5 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ค่า Re มีค่ามากกว่า 5 เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ capillary จะทำให้ค่า aspect ratio เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่อยๆเพิ่มอย่างสม่ำเสมอ เมื่อค่า aspect ratio เข้าใกล้หนึ่ง นั่นคือการเพิ่มขนาดท่อมากกว่า 500 μm จะส่งผลให้รูปร่างอนุภาคหยดเข้าใกล้ทรงกลมมากขึ้น

Report Title Simulation of Microchannel Fluid Flow
By Mr. Kamol Sumaytapituk ID.46010005
 Mr. Jantasak Wangrangsimakul ID.46010103
Advisor Dr. Surat Areerat
Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering
 Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

The main objective of this senior project is to design and develop an mathematical model for clarifying the microfluidic behavior. By applying simulation model the flow characteristic and mixing can be validated with experimental result. From this study Comsol Multiphysics version 3.2a was use to solve this one.

For miscible fluid mixing at various microchannel diameter 300 to 1400 micron, the comparison between experimental result and simulated model showed us an good agreement. The simulation model could significant describe velocity and concentration gradients of microfluidic flow by means of mixing index. For immiscible fluid flow which the typical flow pattern is slug flow, the simulated model also provide satisfactory description. When considering flow characteristic as micro capsule, it could depend on volumetric flow rate and capillary diameter. The simulated result illustrated the aspect ratio consider decreasing when Re within the range 1-5 (-). On the other hand , aspect ratio closed to 1 when Re is over than 5 (-). As capillary tube diameter increased, aspect ratio was increased and gradually increased when it approached to one.

II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือจากคณาจารย์ และบุคคลหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งคอยให้คำแนะนำและปรึกษาในด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการที่ทำ และเสนอแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาของการทำโครงการ รวมทั้งตรวจแก้รายงานทำให้โครงการนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมีและอาจารย์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้ทำการวิจัย ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ในการคิดแก้ปัญหา พัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้

รศ.ดร.มนัส สัจวรศิลป์ ผู้อำนวยการสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สจล. คุณนิวัฒน์ ภูเจริญ ดร.ระพีพงศ์ สุวรรณวรังกุล และสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สจล. ที่อนุเคราะห์การใช้คอมพิวเตอร์และแนะนำอบรมการใช้งานโปรแกรม Comsol Multiphysics 3.2a

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา อาจารย์ทุกท่านที่ให้การสนับสนุน ให้อำนาจใจ และคำแนะนำตลอดมา หากมีสิ่งผิดพลาดประการใดผู้วิจัยขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

นายกมล

สุเมธาพิทักษ์

นายจันทศักดิ์

หวังรังสิมากุล

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญภาพ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	2
2.1 พื้นฐานของการไหลระดับไมโคร.....	2
2.1.1 กระบวนการไหลระดับไมโคร.....	2
2.1.2 ลักษณะการไหลในท่อแคบระดับไมโคร.....	3
2.1.3 ดัชนีการผสม (mixing index).....	4
2.2 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล.....	4
2.2.1 สมการอนุพันธ์มวล.....	5
2.2.2 สมการอนุพันธ์โมเมนตัม.....	5
2.2.3 สมการพลังงานทั่วไป.....	6
2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	6
2.4 ขั้นตอนการทำงานเบื้องต้นของโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	8
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการทดลอง.....	11
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	11
3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทดลอง.....	11
3.3 วิธีการทดลอง.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการศึกษาและทดลอง.....	13
4.1 สร้างแบบจำลองการไหลเบื้องต้น.....	13
4.1.1 การเลือกใช้สมการแบบจำลอง.....	13
4.1.2 การกำหนดลักษณะรูปทรงของแบบการไหล.....	13
4.1.3 การกำหนดลักษณะของเมช.....	14
4.1.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	15
4.2 การศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลที่ผสมกันได้ (Miscible Fluid).....	17
4.2.1 ผลของตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อลักษณะการไหล.....	17
4.2.2 การศึกษาพฤติกรรมการไหลในเชิงความเร็ว.....	19
4.2.3 การศึกษาพฤติกรรมการไหลและการแพร่.....	22
4.3 การศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลที่ไม่ผสมกัน (Immiscible Fluid).....	24
4.3.1 ผลของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในต่อพฤติกรรมการไหล.....	24
4.3.2 การศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของการไหล.....	26
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	28
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	28
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	29
เอกสารอ้างอิง.....	30
ภาคผนวก.....	30
ภาคผนวก ก การหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารแต่ละชนิด.....	31
ภาคผนวก ข แสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรสำหรับท่อแต่ละชนิด.....	33
ภาคผนวก ค แสดงค่า laminar space ตามระยะทางตามแนวท่อ (y) ต่างๆ ที่ Re ต่างๆ.....	35

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.2	รูปแบบการกระจายความเร็วแบบพาราโบลา (parabolic velocity profile).....	3
รูปที่ 2.3	ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์ของโดเมนออกเป็นส่วนย่อย.....	7
รูปที่ 3.1	ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	12
รูปที่ 4.1	การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics 3.2a.....	13
รูปที่ 4.2	การกำหนดเมช (mesh) กับโดเมน ให้กับระบบทั้งหมด.....	14
รูปที่ 4.3	การกำหนดเมช (mesh) กับโดเมน ของระบบที่สมมาตรที่จุดกำเนิด.....	14
รูปที่ 4.4	รูปร่างโดเมนที่ใช้ในการในการสร้างแบบจำลอง.....	15
รูปที่ 4.5	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะ Laminar space ของการไหลภายในท่อ ที่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางกลางท่อในเท่ากับ 0.5 mm ที่ inner-tube Re ต่างๆกัน.....	17
รูปที่ 4.6	แสดงการเปรียบเทียบขนาด Laminar space ของแบบจำลองที่ได้กับการทดลองที่ตำแหน่งความยาวท่อต่างๆ (y) สำหรับที่ Re เท่ากับ 3.....	18
รูปที่ 4.7	ภาพรวมเส้นการไหลของของไหล ที่ Re เท่ากับ 1.....	19
รูปที่ 4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง velocity field กับ dimensionless distance ตามแนวแกน x ที่ระยะท่อต่างๆกัน ที่ค่า Re ต่างๆกัน.....	20
รูปที่ 4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตามแนวแกน y กับ dimensionless distance ตามแนวแกน x ที่ระยะท่อต่างๆกัน.....	21
รูปที่ 4.10	แสดงการกระจายของความเข้มข้น (concentration profile) ในหน่วย mol/m ³ ของการไหลภายในท่อ.....	22
รูปที่ 4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C _{mix} กับ Re.....	23
รูปที่ 4.12	เส้นการไหล (stream line) ที่แสดงถึงการไหลวนที่ Re เท่ากับ 100.....	23
รูปที่ 4.14	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของหยดน้ำของการไหลแบบกลุ่มก้อน (Sludge Flow) ที่ขนาดท่อใน (inner tube) ต่างๆกัน.....	24
รูปที่ 4.15	แสดงการเปรียบเทียบค่า Aspect Ratio ของแบบจำลองที่ได้กับการทดลอง.....	25
รูปที่ 4.16	แสดงผลของ Re ของท่อในที่มีต่อรูปร่างลักษณะของหยดน้ำที่ขนาดท่อต่างๆ.....	26
รูปที่ 4.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกลางท่อใน กับ aspect ratio ที่ค่า Re ต่างๆ.....	27

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงการกำหนดขนาดให้กับโดเมนที่จะนำมาสร้างแบบจำลอง.....	15
ตารางที่ 4.2 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม Comsol Multiphysics.....	16
ตารางที่ ข.1 แสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรสำหรับท่อแคปิลลารี (ท่อขนาดเล็ก).....	33
ตารางที่ ข.2 แสดงอัตราการไหลเชิงปริมาตรสำหรับท่อใหญ่ (ท่อของสารตัวพา).....	34
ตารางที่ ค.1 ค่า laminar space ตามระยะทางตามแนวท่อ (y) ต่างๆ ที่ $Re_t = 1$	35
ตารางที่ ค.2 ค่า laminar space ตามระยะทางตามแนวท่อ (y) ต่างๆ ที่ $Re_t = 3$	36
ตารางที่ ค.3 ค่า laminar space ตามระยะทางตามแนวท่อ (y) ต่างๆ ที่ $Re_t = 5$	37
ตารางที่ ค.4 ค่า laminar space ตามระยะทางตามแนวท่อ (y) ต่างๆ ที่ $Re_t = 7$	38
ตารางที่ ค.5 ค่า laminar space ตามระยะทางตามแนวท่อ (y) ต่างๆ ที่ $Re_t = 10$	39
ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองศึกษาพฤติกรรมการไหลและการผสมระหว่างพาราฟินเหลวกับสารละลาย โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยแสดงขนาดความกว้างของหยดของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมง กาเนตที่ d และ Q ต่างๆกัน.....	40

สัญลักษณ์และคำย่อ

ρ = ความหนาแน่น

τ = แรงเฉือน

U = พลังงานภายใน

μ = ความหนืด

\vec{B} = แรงลัพท์

P = ความดัน

v_z = ความเร็วตามแนวแกน z

v_y = ความเร็วตามแนวแกน y

v_x = ความเร็วตามแนวแกน x

Re = Reynolds number

N_i = ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์

ϕ_i = ตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ

I = ค่าของความเข้มฟลักซ์

N = จำนวนฟลักซ์ทั้งหมด

Re_i = inner tube Reynolds number

Re_o = outer tube Reynolds number

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแคปิลลารี

a/b = aspect ratio

C_{mix} = ค่าดัชนีการผสม

Y = dimensionless distance

y = ระยะทางของท่อภายนอกขาออก ณ จุดต่างๆ

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อภายนอก ณ ตำแหน่งขาเข้า 2

H = ระยะทางของท่อภายนอกขาออกทั้งหมด

W = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อภายนอก ณ ตำแหน่งขาเข้า 1

v_{avg} = ความเร็วเฉลี่ย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

เนื่องจากการศึกษากระบวนการไหลระดับไมโคร (microfluidic scale) จะมีลักษณะและคุณสมบัติหลายอย่างของการไหล ที่มักจะแตกต่างไปจากในระบบของมาโคร ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของตัวเลขเรย์โนลด์ ผลของพื้นที่ผิวสัมผัส ผลในด้านของความดันและสนามไฟฟ้า ความแตกต่างเหล่านี้เองส่งผลไปถึงรูปแบบและลักษณะที่เปลี่ยนไปในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาและการผสมของระบบ โดยการทดลองและวิเคราะห์ที่มีจุดประสงค์ที่จะศึกษาปรากฏการณ์ของการเกิดปฏิกิริยาและการผสม เพื่อนำไปสู่การหารูปแบบที่แท้จริงของกระบวนการนั้นย่อมเป็นเรื่องที่ปฏิบัติได้ค่อนข้างยากทั้งในเรื่องอุปกรณ์ เวลาและค่าใช้จ่ายรวมไปถึงเทคนิคความรู้ที่จะต้องใช้ไมโครเทคโนโลยีด้วย เหตุนี้การสร้างแบบจำลองของขบวนการเพื่อจำลองถึงสถานการณ์ของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น จึงมีความสำคัญที่จะขจัดปัญหาดังกล่าวได้ อีกทั้งยังอาจเป็นแนวทางในการค้นหาและปรับปรุงลักษณะรูปแบบของกระบวนการให้คงมีประสิทธิภาพมากขึ้นอีกประการหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาและสร้างแบบจำลองการไหลของของไหลในท่อแคบระดับไมโคร (microchannel) โดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics 3.2a [6] เพื่อนำผลที่ได้มาเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. สร้างเครื่องมือเพื่อใช้สำหรับคุณลักษณะการผสมและพฤติกรรมการไหลของของไหล
2. ศึกษาถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหลภายในท่อระดับไมโคร เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองและอธิบายผลที่ได้จากการทดลอง
3. ศึกษาถึงผลของตัวแปรที่มีผลต่อลักษณะการผสมและการไหลของของไหล ซึ่งตัวแปรที่จะทำการศึกษาคือ ความเร็วและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเล็ก (Capillary Tube)
4. สร้างแบบจำลองด้วยการใช้โปรแกรมเพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยนำมาศึกษาเทียบเคียงพฤติกรรมและลักษณะการไหลภายในท่อระดับไมโคร

1.4 ประโยชน์ที่รับจากโครงการ

1. สามารถสร้างแบบจำลองการไหลที่จะบ่งบอกได้ถึงลักษณะและพฤติกรรมการไหลของของไหลในท่อระดับไมโครได้
2. แบบจำลองที่สร้างได้สามารถที่จะนำไปอธิบาย พัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผสมและการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

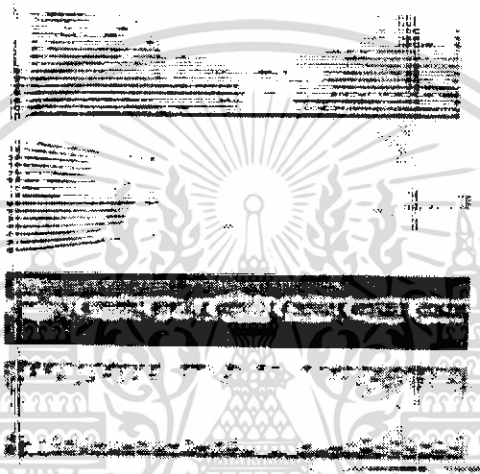
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พื้นฐานของการไหลระดับไมโคร (Fundamentals of Microfluidic)

2.1.1 กระบวนการไหลระดับไมโคร (Microfluidic Process)

เทคโนโลยีขบวนการระดับไมโคร (microfluidic process technology) คือ วิทยาศาสตร์แขนงหนึ่งที่ศึกษาพฤติกรรมทางกายภาพและทางเคมีของกระบวนการในปริมาตรเล็กๆ โดยทั่วไปจะอยู่ในช่อง (channel) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร หรือในโครงสร้างอื่นๆที่มีขนาดน้อยกว่า



รูปที่ 2.1 Normal and focused multi lamination flow pattern, slug flow composed of gas/ liquid segments (Taylor flow), and ordered foam flow (hexagon flow) (from top to bottom) [3]

10^{-3} เมตร กระบวนการ (process) นี้มักมีลักษณะการไหลแบบต่อเนื่อง ความได้เปรียบของโครงสร้างระดับไมโคร คือ การทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก และทำให้การถ่ายเทมวลสูงขึ้นด้วย ตัวอย่างเช่น ที่สเกลความยาวของกระบวนการแพร่ (diffusion processes) ชรรวมเทียบกับท่อขนาดไมครอน (microchannel) แบบ microscale จะมีความยาวสั้นกว่าและผสมกันได้ดีในเวลาอันสั้น (ในหน่วยมิลลิวินาที) คุณสมบัติของการถ่ายเทความร้อนที่ดีควรควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาให้ค่าแน่นอน เช่น ในปฏิกิริยาคายความร้อนสูงๆจะมีพฤติกรรมเป็น isothermal เมื่ออยู่ในระบบ microstructured reactors แต่ถ้ามีปริมาณของของไหลที่เย็นในปริมาณมากก็อาจทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงได้แม้ว่าส่วนใหญ่งานวิจัยจะมุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ในการวิเคราะห์ แต่ก็มีความสนใจที่เพิ่มขึ้นในการทำ chemical-on-a-chip ด้วย เพื่อประยุกต์ใช้กับการทดลองทำปฏิกิริยาที่มีจำนวนมากและ/หรือมีหลายๆ สภาวะ (condition) แต่ใช้สารตั้งต้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการทำปฏิกิริยาในแบบดั้งเดิม ด้วยข้อได้เปรียบในหลายด้านนี้ ทำให้การศึกษาทางด้าน micro process มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน

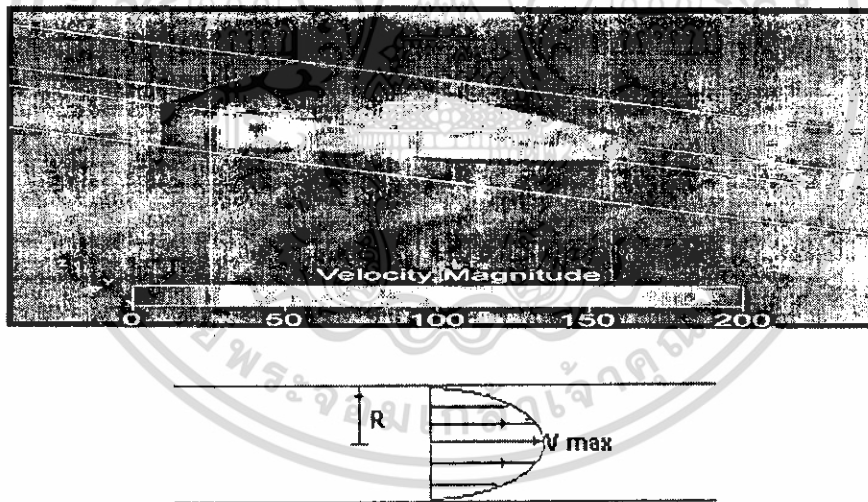
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ลักษณะการไหลในท่อแคบระดับไมโคร (Microchannel)

การไหลของของไหลในท่อระดับไมโคร (microfluidic channel) เป็นการไหลในท่อแคบขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยทั่วไปแล้วอยู่ในช่วงน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร โดยเราสามารถบ่งบอกลักษณะการไหลได้โดยอาศัยตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)

$$Re = \frac{Dv_{avg} \rho}{\mu}$$

โดย D นิยามเป็นความยาวสัมพันธ์ (relevant length) โดยมีค่าเท่ากับ 4 เท่าของอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดกับเส้นรอบวงของท่อ ρ และ μ คือความหนาแน่นและความหนืดของของไหลและ v_{avg} คือความเร็วเฉลี่ยในท่อ เนื่องมาจากมิติที่มีขนาดเล็กของท่อแคบในระดับไมโคร จึงส่งผลให้ Re ในระดับไมโครมีค่าโดยทั่วไปไม่เกิน 100 (ซึ่งส่วนใหญ่อาจมีค่าน้อยกว่า 1) ดังนั้นการไหลในระบบนี้จึงมักพบในรูปของการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) จึงเป็นผลให้โดยเฉลี่ยแล้วการถ่ายโอนของโมเลกุลอยู่ในรูปที่คาดคะเนลักษณะการไหลได้ง่าย ซึ่งที่ Re น้อยกว่า 100 นั้นพฤติกรรมการไหลที่คิดบนพื้นฐานของการถ่ายโอนโมเมนตัม (momentum-based phenomena) มักจะยังใช้ได้และให้ผลที่ค่อนข้างถูกต้อง



รูปที่ 2.2 รูปแบบการกระจายความเร็วแบบพาราโบลา (parabolic velocity profile)

การที่จะทำให้ของไหลขับเคลื่อนไปในท่อที่มีลักษณะเล็กได้นั้น จำเป็นต้องอาศัยแรงขับเคลื่อน โดยทั่วไปแล้วจะใช้ปั๊มที่อาศัยส่วนเคลื่อนที่ในการอัด (positive displacement pump) ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะใช้ปั๊มฉีด (syringe pump) เป็นตัวให้เกิดแรงขับเคลื่อนในการไหล ตามกฎของกลศาสตร์ของไหลนั้น ของไหลแบบราบเรียบที่ขับเคลื่อนด้วยแรงดันภายนอกจะเป็นสถานะที่ขอบเขตไม่มีการเลื่อนไหล จึงทำให้รูปแบบของการไหลมีลักษณะเป็นพาราโบลา (parabolic velocity profile) ดังรูปที่ 2.2 โดยมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วที่ผนังท่อเป็นศูนย์ ซึ่งลักษณะนี้จะเป็นผลต่อการถ่ายโอนโมเลกุลภายในท่อแคบ ด้วยโครงสร้างที่เล็กมากจึงทำให้ระบบมีลักษณะที่สำคัญอีกอย่างคือ การมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวปริมาตรในปริมาณที่สูงซึ่งก็เป็นผลเอื้อต่อการนำระบบของท่อแคบนี้ไปใช้เป็นท่อปฏิกรณ์ระดับไมโครได้เป็นอย่างดี ซึ่งโดยทั่วไประบบท่อแคบเหล่านี้มักมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงสิบถึงหลายร้อยไมครอน ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) สูงถึง $50,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าระบบทั่วไปหลายเท่าตัว

เนื่องจากลักษณะการเกิดปฏิกิริยาในระบบที่มีขนาดเล็กจะมีเวลาที่สารใช้ในการถ่ายโอนมวลที่ค่อนข้างสั้น และอิทธิพลของการถ่ายโอนมวลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ประสิทธิภาพของการถ่ายโอนความร้อนก็มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งที่อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้นนี้จะมีผลต้องการใช้ปริมาตรในการเกิดปฏิกิริยาน้อยลง และทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ก็ลดลงด้วยหรืออาจไม่จำเป็นต้องใช้เลยก็ได้

2.1.3 ดัชนีการผสม (mixing index)

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผสมทำได้โดยอาศัยความแตกต่างของเครื่องผสมภายใต้ช่วงของเงื่อนไข ซึ่งการกระจายของของความเข้มจะถูกนำมาพิจารณาในเชิงของความเบี่ยงเบน (deviation) ในงานวิจัยนี้ เอกสารอ้างอิง [9] ได้นำเสนอค่า mixing index, C_{mix} ดังนี้

$$C_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - I_{mean})^2}$$

$$C_{mix} = \frac{(C_{i_inlet} - C_{i_outlet})}{C_{i_inlet}}$$

เมื่อ I คือค่าของความเข้มฟลักซ์

N คือจำนวนฟลักซ์ทั้งหมด

ค่า ดัชนีการผสม (mixing index) ที่มีค่าน้อยนั้นจะบ่งบอกถึงความเบี่ยงเบนของความเข้มที่ใกล้เคียงกัน นั่นคือมีการผสมเกิดขึ้นไม่ดี ค่าดัชนีการผสมที่เท่ากับศูนย์จะบ่งบอกถึงไม่มีการผสมเกิดขึ้น

2.2 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล (Partial differential equations for fluid flow)

สำหรับการแก้ปัญหาพลศาสตร์ของไหลโดยเฉพาะปัญหาการไหลในท่อนั้น ความเข้าใจในระบบสมการอนุพันธ์ย่อยถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมาก ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้จะ

2.2.1 สมการอนุรักษ์มวล (conservation of mass)

สมการแรกในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลนี้เป็นสมการของการอนุรักษ์มวล หรือสมการความต่อเนื่อง (equation of continuity) โดยมีความหมายโดยหลักการว่า มวลนั้นไม่สูญหายไป สมการดังกล่าวจะอยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง ซึ่งอยู่ในรูป

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{v})$$

โดยประกอบไปด้วยตัวไม่รู้ถึง 4 ค่า คือ ρ , v_x , v_y , v_z ซึ่งต่างเปลี่ยนแปลงค่าได้ตลอดโดเมนของการไหล ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยสมการอื่นๆช่วยในการแก้ปัญหาด้วย

2.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (conservation of momentum)

สำหรับสมการอนุรักษ์โมเมนตัมจะได้มาจากการใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อสองของนิวตัน (Newton's second law) ที่กล่าวว่าแรงลัพธ์จะมีเท่ากับผลคูณของมวลกับอัตราเร่ง สมการทั่วไปที่ได้คือ

$$\rho \frac{Dv_x}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{v} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right] \rho X$$

$$\rho \frac{Dv_y}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{v} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \right] \rho Y$$

$$\rho \frac{Dv_z}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{v} \right] \rho Z$$

สำหรับกรณีที่คุณสมบัติของของไหลมีค่าคงที่ สมการที่ได้จะเป็น

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{B}$$

เรียกสมการนี้ว่า สมการนาเวียร์-สโตร์กส์ (Navier – Stokes equation)

สำหรับกรณีที่ $\tau = 0$ หรือ ของไหลอุดมคติ (ideal fluid)

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla P + \rho \vec{B}$$

เรียกสมการนี้ว่า สมการออยเลอร์ (Euler equation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 สมการพลังงานทั่วไป (general energy equation)

การไหลหลายชนิด ความเร็วของการไหลและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในของไหลต่างขึ้นอยู่กับกันและกัน ดังนั้นความจริงชนิดที่สามของการไหลใดๆที่สามารถนำมาใช้เพื่อสร้างสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเพิ่มเติมได้อีกนั่นคือ สมการอนุรักษ์พลังงาน หรือ สมการพลังงานทั่วไป (general energy equation) โดยมีที่ทฤษฎีมาจากกฎที่ว่า พลังงานนั้นไปสูญหายไป โดยมีรูปแบบทั่วไปคือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho \left(U + \frac{v^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \rho \left(U + \frac{v^2}{2} \right) v_x + \frac{\partial}{\partial z} \rho \left(U + \frac{v^2}{2} \right) v_z &= \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_g - \rho (g_x v_x + g_y v_y + g_z v_z) \\ - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\tau_{xx} v_x + \tau_{xy} v_y + \tau_{xz} v_z) + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{yx} v_x + \tau_{yy} v_y + \tau_{yz} v_z) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{zx} v_x + \tau_{zy} v_y + \tau_{zz} v_z) \right] \end{aligned}$$

หรือเขียนได้ในรูปเวกเตอร์-เทนเซอร์ (vector-tensor notation) แสดงได้คือ

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(U + \frac{v^2}{2} \right) + \nabla \cdot \rho \left(U + \frac{v^2}{2} \right) \mathbf{v} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_g + \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{v} - \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v})$$

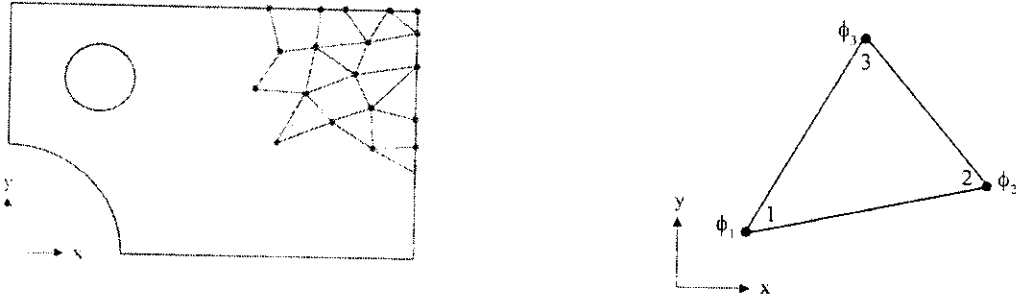
2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) [1, 4, 5]

การวิเคราะห์ปัญหาการไหลเพื่อหาความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ ฯลฯ สำหรับใช้ในการออกแบบงานทางวิศวกรรมเคมี ด้วยวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (computational fluid dynamic, CFD) ได้เข้ามามีบทบาทและก่อให้เกิดประโยชน์เป็นอย่างมากในปัจจุบัน โดยการคำนวณพลศาสตร์ของการไหลผสมผสานกับความรู้ด้านระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical methods) เพื่อแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) ซึ่งเป็นสมการที่แสดงถึงความสมดุลของการไหลนั้น ก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่สามารถแสดงออกมาในรูปแบบที่เข้าใจในปรากฏการณ์ของการไหลได้เป็นอย่างดี

ในการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในขั้นตอนแรกจะเป็นการแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ ดังรูป 2.3 ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อ (node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่คำนวณตัวไม่รู้ค่า (nodal unknowns) จากนั้นจึงทำการประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์นี้แต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งจะเป็นไปตาม

$$\phi(x, y) = [N_i(x, y)] \{ \phi \}$$

$N_i(x, y)$ แทนฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์และ ϕ , แทนตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ



รูปที่ 2.3 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์ของโดเมนออกเป็นส่วนย่อย

โดยทั่วไปผลลัพธ์ที่ได้จากผลลัพธ์ที่แท้จริง จึงต้องมีการใช้ผลลัพธ์โดยประมาณซึ่งนำไปสู่ค่าความคลาดเคลื่อนให้น้อยที่สุด หลังจากนั้นสมการที่ได้จากทุกๆเอลิเมนต์จะถูกนำมาประกอบรวมกัน ก่อให้เกิดระบบสมการ (system of equations) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยการนำสมการจากทุกเอลิเมนต์เข้ามาประกอบรวมกันนี้จำเป็นต้องกระทำอย่างมีหลักการให้สอดคล้องเหมือนกับการนำเอลิเมนต์ย่อยๆมาต่อประกอบเข้ากัน ก่อให้เกิดเป็นโดเมนทั้งหมดของปัญหานั้นขึ้นมาได้ ซึ่งการแก้ปัญหโดยสมบรูณ์นั้น ผลลัพธ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายความจริงของปัญหา เงื่อนไขและขอบเขตของปัญหา และลักษณะรูปร่างของปัญหาสำหรับปัญหาทางพลศาสตร์ของไหลนั้น ระบบสมการรวมมักจะประกอบไปด้วยสมการแบบไม่เชิงเส้นเป็นจำนวนมาก และจะเป็นส่วนที่ใช้เวลาในการคำนวณรวมทั้งปริมาณหน่วยความจำเป็นจำนวนมากเช่นกัน ดังนั้นหากสามารถสร้างสมการที่ประมาณลักษณะการกระจายของผลลัพธ์บนเอลิเมนต์ได้ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่แท้จริงมากเพียงไร ก็จะก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อน (error) ที่น้อยลงเพียงนั้น ซึ่งก็จะทำให้สามารถใช้ขนาดเอลิเมนต์ที่ใหญ่ขึ้น ได้อันจะเป็นผลโดยตรงต่อการลดปริมาณหน่วยความจำและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

ความรู้ในวิธีการแก้ปัญหามผสมผสานกับศักยภาพของการแก้ปัญหาคด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ก่อให้เกิดโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (computer program) ซึ่งได้ผลิตออกมาจำหน่ายในปัจจุบันหลายโปรแกรม ซึ่งหน้าที่หลักของโปรแกรมเหล่านี้คือการหาผลลัพธ์ด้วยการแก้สมการประกอบหลักทั้งสามดังกล่าว โปรแกรมเหล่านี้ล้วนมีราคาสูง ผู้ใช้จำเป็นต้องมีความรู้ทางด้านคณิตศาสตร์และทางด้านการคำนวณที่เพียงพอ จึงจะเกิดความมั่นใจว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรมเหล่านี้ถูกต้อง โดยโปรแกรมเหล่านี้ไม่เหมือนโปรแกรมกราฟิกที่ใช้วาดรูปหรือเขียนแบบที่พบเห็นกันมากทั่วไป การใช้โปรแกรมกราฟิกเพื่อวาดวงกลมบนหน้าจอคอมพิวเตอร์แล้วเห็นเป็นวงกลมที่ต้องการ ผู้ใช้ย่อมรู้ว่าตนเองได้ผลลัพธ์ที่เป็นรูปวงกลมที่ต้องการ แต่การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่คำนวณหาผลลัพธ์สถานะของการไหล ซึ่งผลที่ได้จะแสดงในรูปแบบของเวกเตอร์ของความเร็วและระดับสีของความดันในลักษณะต่างๆกันนั้น หากผู้ใช้ไม่มีความรู้ว่ามีโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นทำอะไรอยู่ภายใน ก็ไม่สามารถยืนยันได้ว่าผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นนั้นถูกต้อง ในทางปฏิบัติจึงอาจกล่าวได้ว่ามักจะก่อให้เกิดผลเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากผู้ใช้ไม่มีความรู้เบื้องต้นของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเหล่านี้แล้วนำผลลัพธ์ไปใช้ในการออกแบบงานทางวิศวกรรม

2.4 ขั้นตอนการทำงานเบื้องต้นของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [1, 6]

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเหล่านี้ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้แก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล โดยมีเงื่อนไขขอบเขตและลักษณะรูปร่างของปัญหาที่สามารถกำหนดได้โดยสะดวก ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วทุกๆ โปรแกรมจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ (ก) ขั้นตอนการสร้างลักษณะรูปร่างของปัญหาและเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งเป็นขั้นตอนของกระบวนการขั้นตอน (pre-processor) (ข) ขั้นตอนการวิเคราะห์แก้ปัญหา (analysis) ซึ่งเป็นหัวใจของโปรแกรม และ (ค) ขั้นตอนของกระบวนการขั้นท้าย (post-processor) เพื่อการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณ

(ก) กระบวนการขั้นต้น กระบวนการขั้นต้นเริ่มจากการสร้างโดเมนของการไหลที่ต้องการทำการวิเคราะห์ เป็นขั้นตอนนับตั้งแต่การสร้างเส้นขอบ (line) การสร้างเส้นขอบการสร้างพื้นผิว(surface) รวมไปถึงการสร้างปริมาตร (volume) หากเป็นการไหลในสามมิติ จากนั้นจึงแบ่งโดเมนของการไหลที่ได้สร้างขึ้นนี้ออกเป็นเอลิเมนต์ (element) เล็กๆ หรือออกเป็นตาราง (mesh) ย่อยๆ โดยเส้นตารางเหล่านี้ตัดกันที่จุดต่อ (grid หรือ node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณหาค่าอัตราการไหล อันได้แก่ความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิ เป็นต้น แล้วจึงกำหนดคุณสมบัติของของไหล และเงื่อนไขขอบเขตสำหรับปัญหานั้น ตามลำดับ

กระบวนการขั้นต้นนี้ ถึงแม้จะสามารถดำเนินการได้โดยง่ายในโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่ผลิตขึ้นมาจำหน่ายในปัจจุบัน แต่ก็มักจะใช้เวลาในการสร้างค่อนข้างมากเนื่องจากลักษณะรูปร่างของปัญหาของการไหลโดยทั่วไปในทางปฏิบัตินั้นมีความซับซ้อน ยกตัวอย่างเช่นการไหลผ่านเครื่องยนต์ได้ปีกที่ต่อกับลำตัวของเครื่องบิน โดเมนของการไหลจำเป็นต้องสร้างให้มีขนาดรูปร่างที่ถูกต้อง โดยที่ผิวของโดเมนของการไหลนี้จำเป็นต้องสัมผัสไปกับผิวโค้งของเครื่องยนต์ได้ปีก ผิวโค้งของลำตัวเครื่องบิน รวมทั้งส่วนของผิวโค้งต่างๆเหล่านี้ที่ตัดกันในสามมิติ จากนั้นจึงค่อยทำการแบ่งโดเมนของการไหลนี้ออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆหรือตารางย่อยๆเพื่อใช้ในการคำนวณในขั้นตอนต่อไป

(ข) ขั้นตอนการวิเคราะห์ ขั้นตอนการวิเคราะห์จัดได้ว่าเป็นหัวใจของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเหล่านี้ การแบ่งโดเมนของการไหลออกเป็นเอลิเมนต์ขนาดเล็กหรือเป็นตารางที่มีความถี่มากจนเกินไป จะก่อให้เกิดจำนวนจุดต่อซึ่งประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่า (Unknown) มากขึ้นตามไปด้วย อันจะเป็นผลต่อเนื่องต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (computational time) และปริมาณหน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์ (computer memory) ที่จำเป็นต้องจัดหาให้ แต่ในทางตรงกันข้าม ก็ก่อให้เกิด

ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำ (solution accuracy) สูงมากขึ้น นักวิเคราะห์ผู้มีส่วนประสมการนี้ในการแก้ปัญหา จึงจำเป็นต้องชั่งน้ำหนักระหว่างผลได้และผลเสียที่จะเกิดขึ้นนี้ก่อนทำการคำนวณ

แนวความคิดของการแบ่ง (discretizaion) โดเมนของการไหลออกเป็นเอลิเมนต์หรือตารางเล็กๆ ก็เพื่อที่จะสามารถใช้ฟังก์ชันชนิดง่ายๆ (simple functions) สำหรับแทน (represent) ลักษณะของการไหลผ่านเอลิเมนต์หรือตารางเล็กๆนั้น ฟังก์ชันดังกล่าวจะถูกแทนลงไปในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล ผสมเข้ากับกระบวนการทางคณิตศาสตร์บางอย่างเพื่อทำการลดค่าผิดพลาด (error) ก่อให้เกิดระบบสมการทางพีชคณิต (system of algebraic equations) ขนาดใหญ่ซึ่งจำเป็นต้องแก้โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ต่อไป

วิธีการวิเคราะห์ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากคือ ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference method) และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) ระเบียบวิธีทั้งสองนี้ ในภาพรวม ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องเป็นการใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) เพื่อประมาณพจน์เชิงอนุพันธ์ที่ปรากฏอยู่ในสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยด้วย ค่าที่จุดต่อ ณ ตำแหน่งที่พิจารณาและที่จุดต่อข้างเคียง ก่อให้เกิดระบบสมการทางพีชคณิตที่จำเป็นต้องแก้ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขดังกล่าวข้างต้น ระเบียบวิธีนี้ประกอบด้วยขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อนและง่ายแก่การเข้าใจ แต่มีขีดจำกัดคือไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาที่มีลักษณะรูปร่างซับซ้อนได้โดยง่าย

ในขณะเดียวกัน หากใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ปัญหาที่มีลักษณะรูปร่างซับซ้อนสามารถแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ฯลฯ ได้โดยง่าย เอลิเมนต์เหล่านี้ไม่จำเป็นต้องเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบดังเช่น ตารางสี่เหลี่ยมที่ต้องสร้างขึ้นในระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง จุดเด่นของระเบียบวิธีนี้เอง ทำให้ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นมากขึ้นในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมต่างๆ ซึ่งล้วนแต่จะมีลักษณะรูปร่างที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นประกอบด้วยขั้นตอนการประดิษฐ์สมการภายในที่ซับซ้อนกว่า เริ่มจากการสร้างฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (element interpolation functions) การประยุกต์ระเบียบวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals) ซึ่งประกอบด้วยการทำอินทิเกรต (integration) ก่อให้เกิดสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element equations) สำหรับเอลิเมนต์นั้นๆก่อนนำมาสมการเหล่านี้มาประกอบกันเข้า (assembling of element equations) ขึ้นเป็นระบบสมการรวมขนาดใหญ่ ซึ่งจำเป็นต้องแก้โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขต่อไปด้วยเช่นกัน

(ค) กระบวนการขั้นท้าย ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนของการวิเคราะห์การไหลนั้น โดยปกติจะประกอบไปด้วย ความเร็วย่อยในทิศแกนต่างๆ ความดันอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใดๆ ใน โดเมนของการไหลนั้น ผลลัพธ์ที่คำนวณได้เหล่านี้โดยปกติจะมีจำนวนมาก ซึ่งขึ้นโดยตรงกับจำนวนจุดต่อและต่างล้วนอยู่ในรูปแบบของตัวเลข ดังนั้นจึงแทบจะเป็นไปไม่ได้ที่จะดูเพียงแค่ตัวเลขเหล่านี้แล้วก่อให้เกิดความเข้าใจในฟิสิกส์ของสภาวะการไหล โดยเฉพาะหากเป็นปัญหาในสามมิติ การสร้างผลลัพธ์เหล่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกมาในรูปแบบของกราฟิกจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปแบบ เช่น การพล็อตเวกเตอร์ ณ ทุกๆจุดต่อตลอดทั้งโดเมนของการไหลเพื่อแสดงลักษณะทิศทางของการไหลและสภาวะการหมุนวนในบริเวณต่างๆ การพล็อตเหล่านี้อาจแสดงด้วยสีต่างๆกัน (color contour) บนหน้าจอคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยให้เกิดความเข้าใจในปัญหาโดยเร็วและดีขึ้น นอกจากนั้นการแสดงยังอาจแสดงในรูปแบบของเส้นทางการเคลื่อนของอนุภาค (particle tracing) ผลลัพธ์ในรูปแบบต่างๆเหล่านี้สามารถแสดงให้เห็นได้ในหลายๆทิศทาง (view) รวมไปถึงการแสดงในเชิงของการไหลที่มีการเคลื่อนไหว (fluid motion) เพื่อให้เกิดความรู้สึกที่เป็นจริงมากขึ้นด้วย

การวิเคราะห์ปัญหาใดๆทางวิศวกรรมศาสตร์ ลักษณะของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นโดยปกติจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลัก 3 ประการ คือ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย เงื่อนไขของปัญหานั้น และลักษณะรูปร่างของปัญหาสำหรับการแก้ปัญหาพลศาสตร์ของการไหลด้วยการคำนวณนั้น ความเข้าใจในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลที่นับได้ว่าเป็นหัวใจที่สำคัญ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้อธิบายถึงความเป็นจริงของการไหลซึ่งต้องเกิดการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน สมการเหล่านี้ล้วนประกอบด้วยพจน์ที่อยู่ในรูปแบบของค่าอนุพันธ์ต่างๆกัน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจและคุ้นเคยกับระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้ก่อน โดยไม่มองสมการเหล่านี้เพียงแต่ในแง่ลักษณะของสมการทางคณิตศาสตร์ แต่จำเป็นต้องเข้าใจถึงความหมายทางกายภาพของพจน์ต่างๆในสมการเหล่านี้ด้วย ความเข้าใจดังกล่าวไม่เพียงที่จะนำไปสู่ความสำเร็จในการแก้ปัญหาเท่านั้น แต่ช่วยทำให้เกิดผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องแม่นยำและสามารถอธิบายได้ ซึ่งจะนำไปสู่ความเข้าใจในปัญหาได้ดียิ่งขึ้นไป เพื่อให้เกิดความเข้าใจในความหมายทางกายภาพ (physical meaning) ของแต่ละพจน์ในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยได้ง่าย รวมทั้งที่มาของพจน์เหล่านี้ จะแสดงขั้นตอนการประดิษฐ์สมการสำหรับการไหลใน 2 มิติ ซึ่งจะลดจำนวนพจน์ต่างๆ และความยาวของสมการลงไปได้อย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรไหลใน 3 มิติ อย่างไรก็ตามความเข้าใจที่เกิดขึ้น สามารถนำไปขยายต่อในการประดิษฐ์สมการสำหรับการไหลใน 3 มิติ ได้โดยตรง โดยเพียงแต่ใช้เวลามากขึ้นเนื่องจากสมการต่างๆเหล่านั้นมีความยาวและประกอบด้วยโดยพจน์ต่างๆเพิ่มขึ้นอีก 1 มิติเท่านั้นเอง พจน์ในต่างๆในสมการเหล่านี้ล้วนอยู่ในรูปแบบของพจน์เชิงอนุพันธ์ (derivative) ซึ่งอาจจะไม่ค่อยรู้สึกคุ้นเคยในการเริ่มศึกษาใหม่ แต่ความเข้าใจในความหมายทางกายภาพของพจน์ต่างๆเหล่านี้มีความจำเป็นและสำคัญต่อการแก้ปัญหาพลศาสตร์ของไหลด้วยการคำนวณมาก เพราะหัวใจโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้นในปัจจุบันล้วนลงไปทำการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในลักษณะเช่นนี้ทั้งนั้น ดังนั้นความถูกต้องและความเที่ยงตรงของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจของผู้ใช้ในระบบเชิงอนุพันธ์ย่อยประกอบเข้าด้วยกันเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการทดลอง

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

1. ชุดอุปกรณ์บันทึกภาพ (GANZ ZC-Y11PH3)
2. ชุดท่อลักษณะต่างๆ
3. หลอดฉีดสาร
4. ไมโครพีดเดอร์และเครื่องแปลงไฟฟ้า
5. แท่นยึดท่อพร้อมสายยาง
6. ชุดเครื่องมือวัดระดับไมโคร
7. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4)
8. พาราฟินเหลว
9. น้ำกลั่น
10. คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม TVR เพื่อใช้ในการดูภาพลักษณะการไหล

3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทดลอง

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวบรวมและศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมด
2. ออกแบบอุปกรณ์เครื่องมือและทำการทดลองโดยใช้อุปกรณ์บันทึกภาพบันทึกภาพลักษณะการผสมกันของของไหล ดังแสดงในรูปที่ 3.1
3. ทำการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Comsol Multiphysics 3.2 a เพื่อใช้ในการดูลักษณะของการผสมกัน ณ ความเร็วและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (capillary tube) ต่างๆกัน
4. นำผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองกับผลจากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อทำการเปรียบเทียบเพื่อดูลักษณะการผสมและการไหลของของไหล

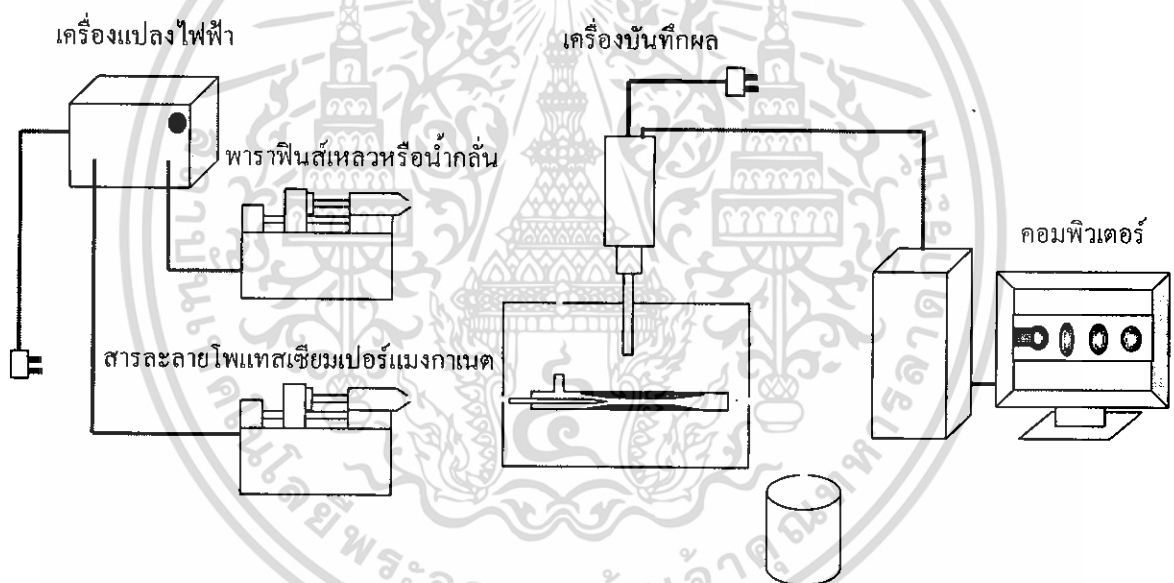
3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองนี้ศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลและการผสมกันระหว่างน้ำกลั่นและสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต กับ พาราฟินเหลวและสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ดังนี้

1. การเตรียมสารเคมี แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ
 - 1.1 สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยใส่ผงโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต จำนวน 0.1 กรัม ในน้ำ 220 ลูกบาศก์เซนติเมตร
 - 1.2 พาราฟินเหลวปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร
 - 1.3 น้ำกลั่นปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำสารเคมีที่เตรียมไว้ทั้ง 2 ส่วนมาบรรจุลงในหลอดฉีดยาขนาด 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรและใส่ฟองอากาศออก นำไปวางที่เครื่องป้อนสาร (microfeeder) โดยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจะต่อกับสายยางที่ต่อกับท่อเล็ก ส่วนน้ำกลั่นจะต่อเข้าสายยางที่ต่อกับท่อใหญ่ของเครื่องผสม
3. จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.1 พร้อมเปิดเครื่องป้อนสาร กล้องวิดีโอและโปรแกรม TVR ที่แสดงภาพการผสมในเครื่องคอมพิวเตอร์ ปรับโฟกัสของกล้องวิดีโอให้เห็นภาพการไหลที่ชัดเจน
4. ตั้งค่าอัตราการไหลของเครื่องป้อนที่ต่อเชื่อมกับท่อใหญ่ ประมาณ 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงเพื่อไล่ฟองอากาศออกจากสายยางและเครื่องผสม จากนั้นค่อย ๆ ลดอัตราการไหลลงเรื่อย ๆ จนถึงระดับที่ต้องการทำการทดลอง โดยทำการปรับอัตราไหลดังแสดงตามตารางที่ ข.1 และ ข.2
5. จับภาพการไหลจากกล้องวิดีโอ และถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของหยดน้ำ สังเกตและวัดขนาดของ Laminar space ในกรณีแรกและวัดขนาดของอนุภาคหยดน้ำในกรณีสอง
6. ทำการทดลองเช่นเดิมอีกครั้งหนึ่ง โดยทำการเปลี่ยนจากน้ำกลั่นเป็นพาราฟินเหลว



รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 4

ผลการศึกษาและทดลอง

4.1 การสร้างแบบจำลองการไหลเบื้องต้น

4.1.1 การเลือกใช้สมการแบบจำลอง (Model Equations)

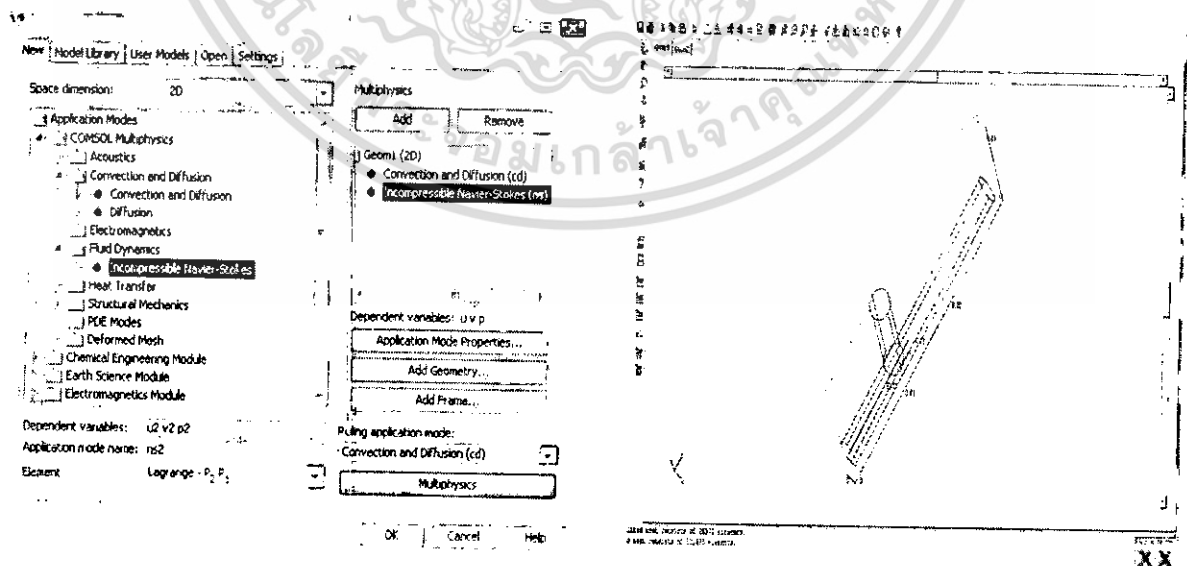
สมการแบบจำลองที่เลือกใช้ในระบบการไหลระดับไมโครแท่งจริงแล้ว ก็ยังคงจะตั้งอยู่บนพื้นฐานทฤษฎีของธรรมชาติของการไหล ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงานตามที่ได้กล่าวมาแล้วในภาคทฤษฎี ในการเลือกใช้สมการเราจะสมมติว่าระบบของเราอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) มีอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Process) และไม่มีการถ่ายเทพลังงาน อีกทั้งของไหลในระบบจะเป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) ดังนั้นสมการหลักที่เราใช้ในการสร้างแบบจำลองนี้จึงมี 2 สมการ ได้แก่

1. Convection and diffusion equation
2. Incompressible Navier-stoke equation

ซึ่งเราสามารถเลือกใส่สมการทั้งสองให้กับโปรแกรมได้โดยผ่านหน้าต่าง Model Navigator ของโปรแกรม Comsol Multiphysics ดังแสดงดังรูปที่ 4.1

4.1.2 การกำหนดลักษณะรูปร่างของแบบการไหล (Model Geometry)

ภายในตัวโปรแกรม Comsol Multiphysics จะมีโหมดที่ใช้ในการออกแบบและสร้างลักษณะรูปร่างต่างๆขึ้น โดยเฉพาะ ซึ่งสามารถกำหนดรูปร่างของการไหลโดยผ่านโหมดนี้ของตัวโปรแกรมดังรูปที่ 4.1

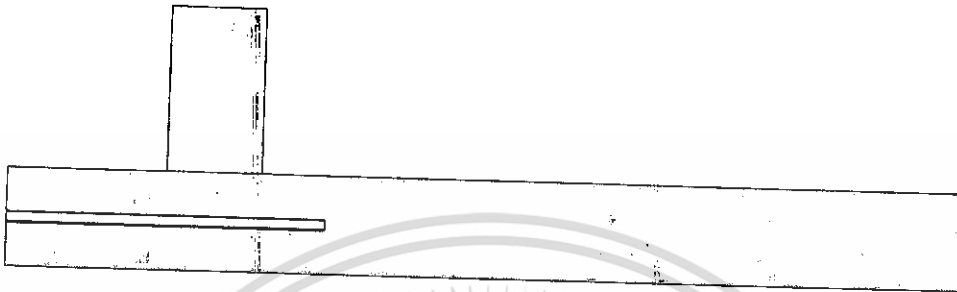


รูปที่ 4.1 การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การกำหนดลักษณะของเมช (Mesh Construction)

ลักษณะของเมชที่จะใช้จะมีความสำคัญต่อความแม่นยำของผลทางกราฟฟิกที่จะได้ แต่ทั้งนี้ การกำหนดความละเอียดของเมชก็จะขึ้นกับหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่ต้องใช้ และเวลาในการแก้หาผลเฉลยของโปรแกรม



รูปที่ 4.2 การกำหนดเมช (mesh) กับโดเมน ให้กับระบบทั้งหมด

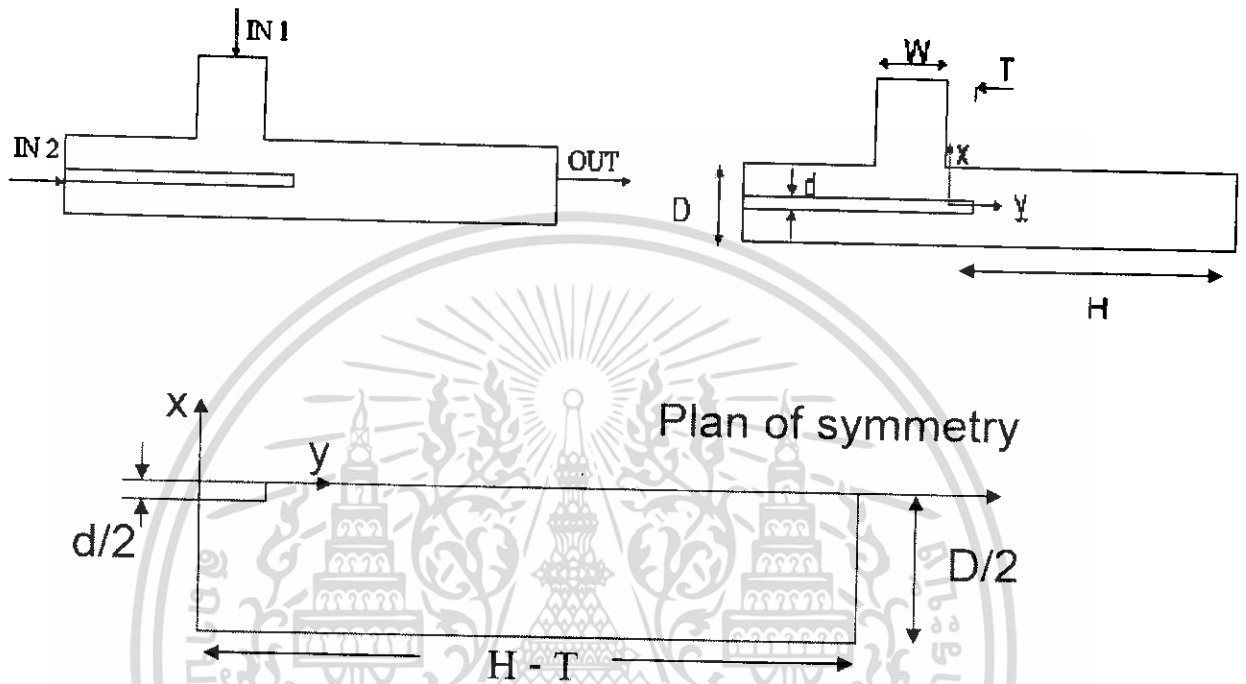
ดังจะเห็นจากรูปที่ 4.2 ว่า บริเวณโดเมนที่เราสนใจจะมีลักษณะสมมาตร (symmetry) ของระนาบทอทั้งสองข้าง ดังนั้นเพื่อเป็นการลดเวลาในการแก้หาคำตอบ และลดหน่วยความจำที่ใช้ จึงได้กำหนดขอบเขตของโดเมนใหม่ ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งสมมาตรกับโดเมนเดิม



รูปที่ 4.3 การกำหนดเมช (mesh) กับโดเมน ของระบบที่สมมาตรที่จุดกำเนิด

4.1.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)

ขอบเขตและขนาดของโดเมนที่สร้างขึ้นมาจะสามารถวัดได้จากการทดลองจริง จากรูปที่ 4.4 ของไหลชนิดที่ 1 จะไหลเข้าทาง IN 1 ข้างบนและของไหลชนิดที่ 2 จะไหลเข้าทาง IN 2 ซึ่งเป็น



รูปที่ 4.4 รูปร่างโดเมนที่ใช้ในการในการสร้างแบบจำลอง

ท่อแคปิลลารี (capillary tube) โดยในการทดลองนั้นของไหลชนิดที่ 2 จะถูกฉีดเข้าไปในระบบและเกิดการผสมกับของไหลชนิดที่ 1 และไหลรวมกันออกทางปลายท่อ โดยขนาดของท่อที่จำลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 โดยมีสัญลักษณ์ตามรูปที่ 4.4

Dimension	ขนาด (mm)
d	vary (0.3-1.4)
W, D	5
H	10
T	3

ตารางที่ 4.1 แสดงการกำหนดขนาดให้กับโดเมนที่จะนำมาสร้างแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 ได้แสดงถึงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับโดเมนของระบบโดยในที่นี้จะมีการตั้งสมมติฐานว่า ที่ผนังของท่อจะไม่มี การเลื่อนไหล (no slip) ของชั้นของไหล และไม่มีการถ่ายเทของฟลักซ์ความเร็วและมวล ที่กลางท่อซึ่งเป็นระนาบสมมาตร ค่า \bar{v} และ C เป็นค่าที่สามารถปรับเปลี่ยนได้จากการทดลองโดยตรง

ขอบเขต	ค่าขอบเขต
$0 < y < (H-T), x = W/2$	$\bar{v} = 0, \bar{n} \cdot \bar{N} = 0$
$0 < y < (H-T), x = 0$	$\bar{n} \cdot \bar{v} = 0, \bar{n} \cdot \bar{N} = 0$
$y = 0, -d/2 < x < 0$	$\bar{v} = \bar{v}_1, C = C_1$
$y = 0, (d-W)/2 < x < 0$	$\bar{v} = \bar{v}_2, C = C_2$

ตารางที่ 4.2 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม Comsol Multiphysics

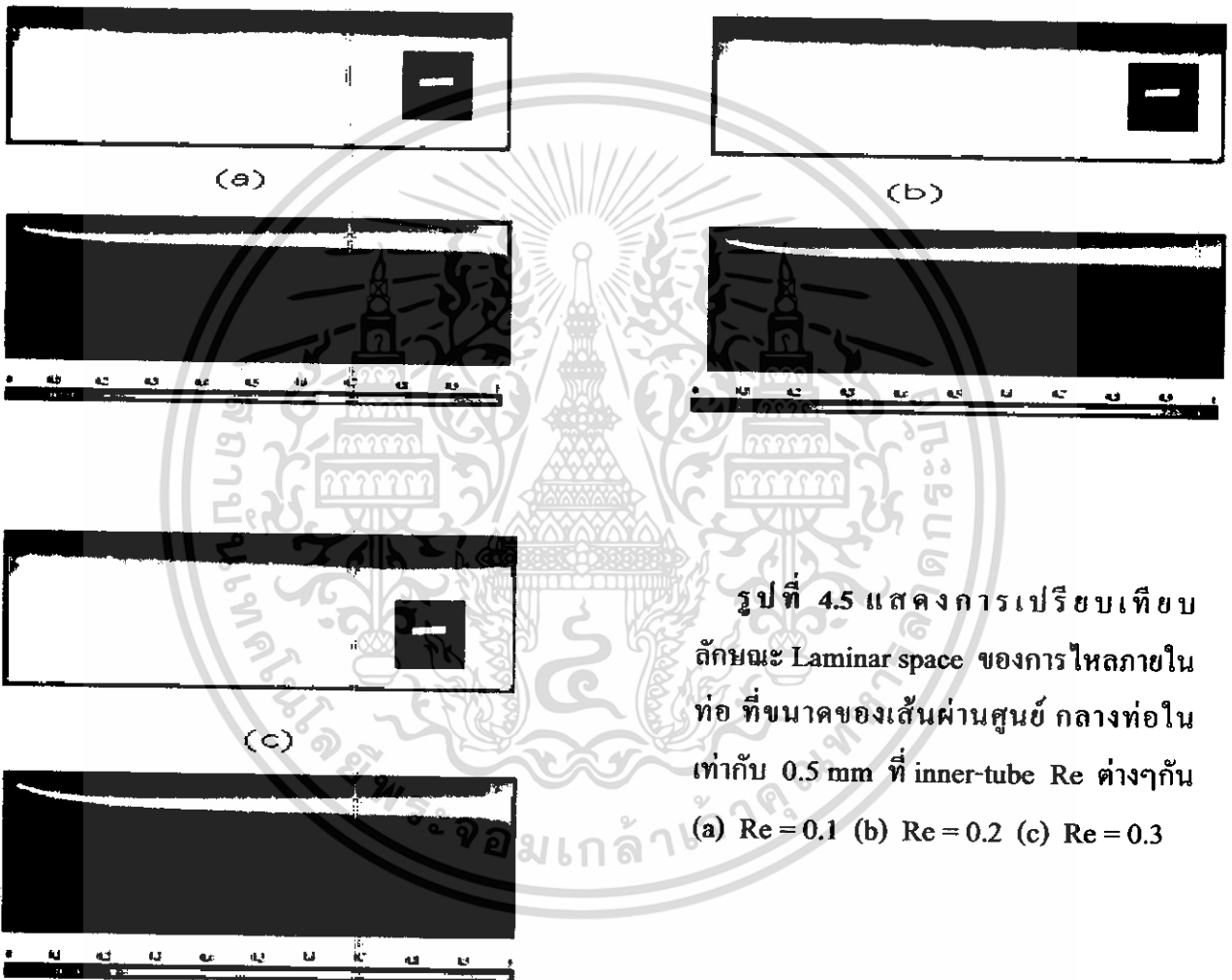
ในโปรแกรม Comsol Multiphysics จะสามารถกำหนดคุณสมบัติของโดเมนผ่านทางโหมด Subdomain Setting และ Boundary Setting ในแถบ Physics ที่มีอยู่ในตัวโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลที่ผสมกันได้ (Miscible Fluid)

4.2.1 ผลของตัวเลขเรย์โนลด์์ที่มีต่อลักษณะการไหล

ในการไหลภายในท่อแคบระดับไมโคร ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อลักษณะการไหล คือ ขนาดของท่อใน และความเร็วที่ของของไหลที่ใช้ ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลของ Re ของท่อในที่มีผลต่อรูปร่างของการไหลที่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ผ่านการเปรียบเทียบเทอม Laminar Space กับแบบจำลองที่สร้างขึ้น



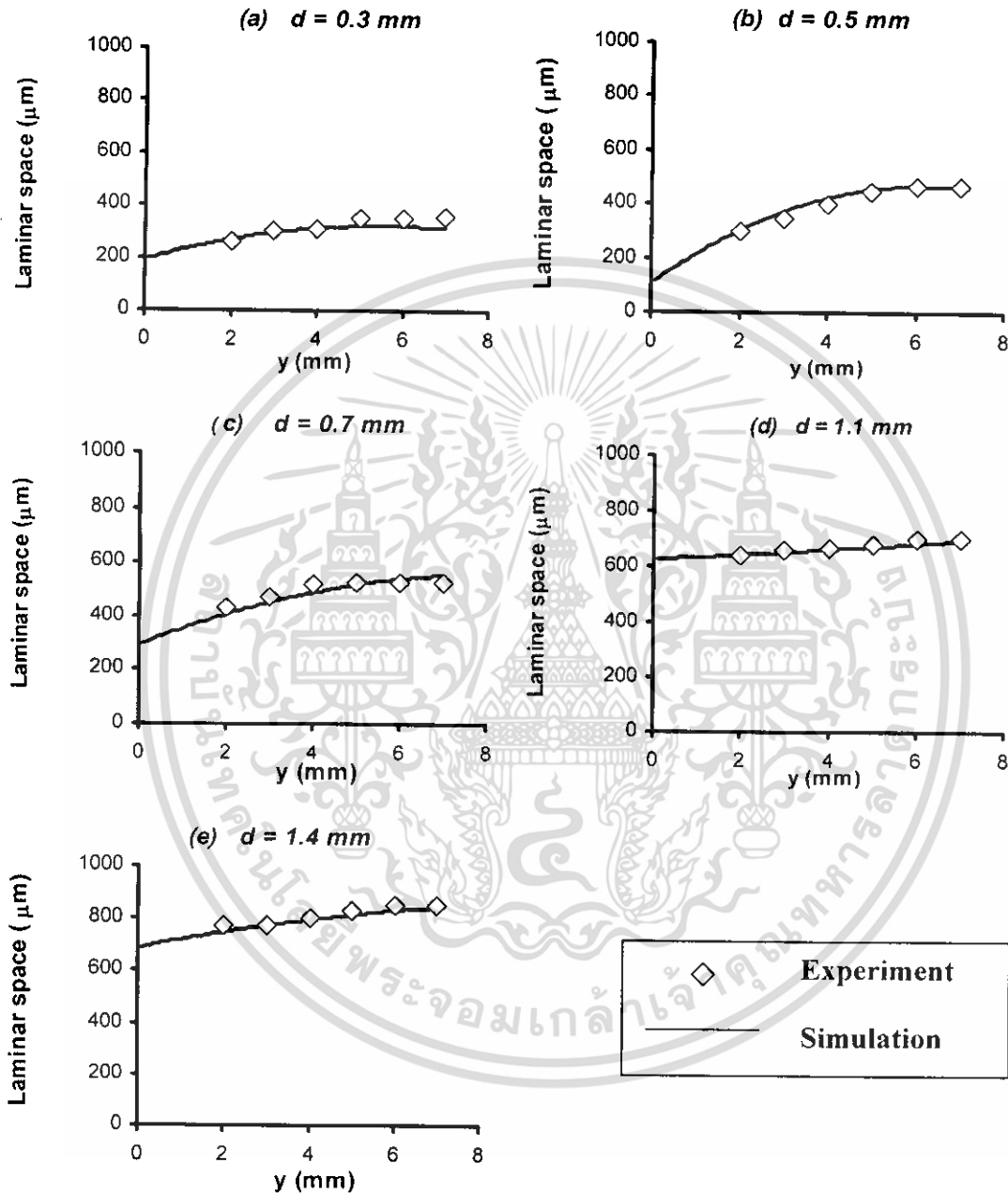
รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะ Laminar space ของการไหลภายในท่อ ที่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในเท่ากับ 0.5 mm ที่ inner-tube Re ต่างๆกัน (a) $Re = 0.1$ (b) $Re = 0.2$ (c) $Re = 0.3$

สำหรับของไหลที่สามารถผสมเข้ากันได้เป็นเฟสเดียว เทอมที่จะใช้ในการบ่งบอกถึงลักษณะของการผสมที่มีชั้นของการแพร่เกิดขึ้น เรียกว่า Laminar space รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 แสดงถึงการเปรียบเทียบลักษณะของกระแสการไหลกับภาพกราฟฟิคที่ได้จากแบบจำลอง ที่ Re ของท่อในมีค่าต่ำ ($Re < 1$) รูปที่ 4.6 เป็นกราฟที่ทำการพล็อตโดยการเปลี่ยนค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.3 mm ถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลง 72056 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 mm ที่ค่าของ Re คงที่ค่าหนึ่ง จากรูปที่ 4.6 สามารถแสดงได้ถึงความสอดคล้องที่ได้ระหว่างแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับผลการทดลองจริง จากการวัดค่า Laminar space profile ที่ขนาดท่อต่างๆ

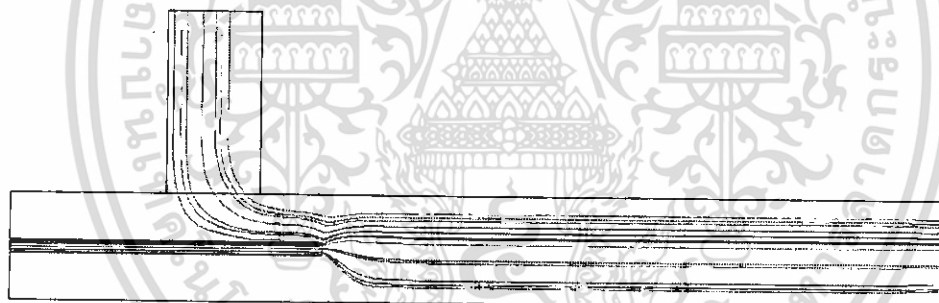


รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบขนาด Laminar space ของแบบจำลองที่ได้กับการทดลองที่ตำแหน่งความยาวท่อต่างๆ (y) สำหรับที่ Re คงที่เท่ากับ 3

ผลที่ได้จะสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อขนาดของท่อในมีค่าเพิ่มมากขึ้น การขยายตัวของ Laminar space จะค่อนข้างสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับ การขยายขนาดของ Laminar space ขนาดที่ท่อมีค่าต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากมีจำกัดเส้นทางการไหล (Stream Line) โดยขนาดของท่อภายนอกหาความสัมพันธ์ระหว่าง Laminar space กับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเล็กที่ค่า Re ต่างๆกัน โดยใช้ผลจากแบบจำลองที่ได้ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเล็กจะมีผลให้ Laminar space เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นในช่วงต้น แต่จะเริ่มคงที่เมื่อ Laminar space มีค่าเข้าใกล้เส้นผ่านศูนย์กลางท่อใหญ่

4.2.2 การศึกษาพฤติกรรมของการไหลในเชิงความเร็ว

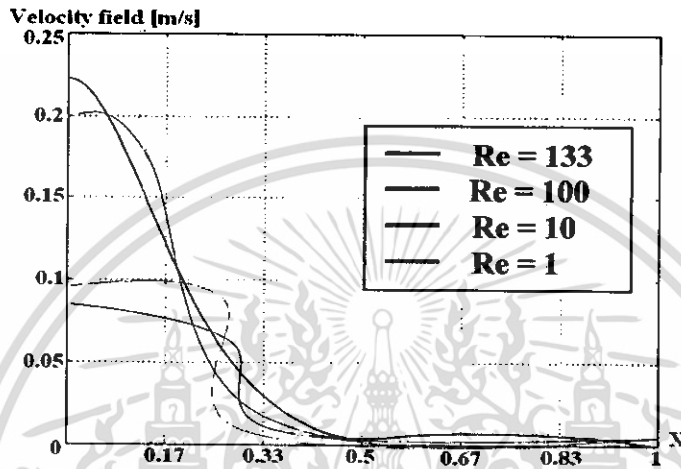
จากการศึกษาพฤติกรรมของการไหลในท่อโดยใช้แบบจำลองจากโปรแกรม Comsol Multiphysics 3.2 a พบว่าเส้นการไหล (stream line) ของของเหลวทั้งสองชนิดเป็นดังรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าการไหลเข้าของของเหลวที่ท่อด้านบนจะมีผลต่อการไหลที่บริเวณปลายท่อแคปิลลารี ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ว่าระยะของปลายท่อแคปิลลารี (T) ต้องมีค่าหนึ่งที่ทำให้บริเวณการผสมมีความสมมาตร โดยในการทดลองจะกำหนดค่าระยะนี้ไว้ที่ค่าหนึ่ง



รูปที่ 4.7 ภาพรวมเส้นการไหลของของไหล ที่ Re เท่ากับ 1

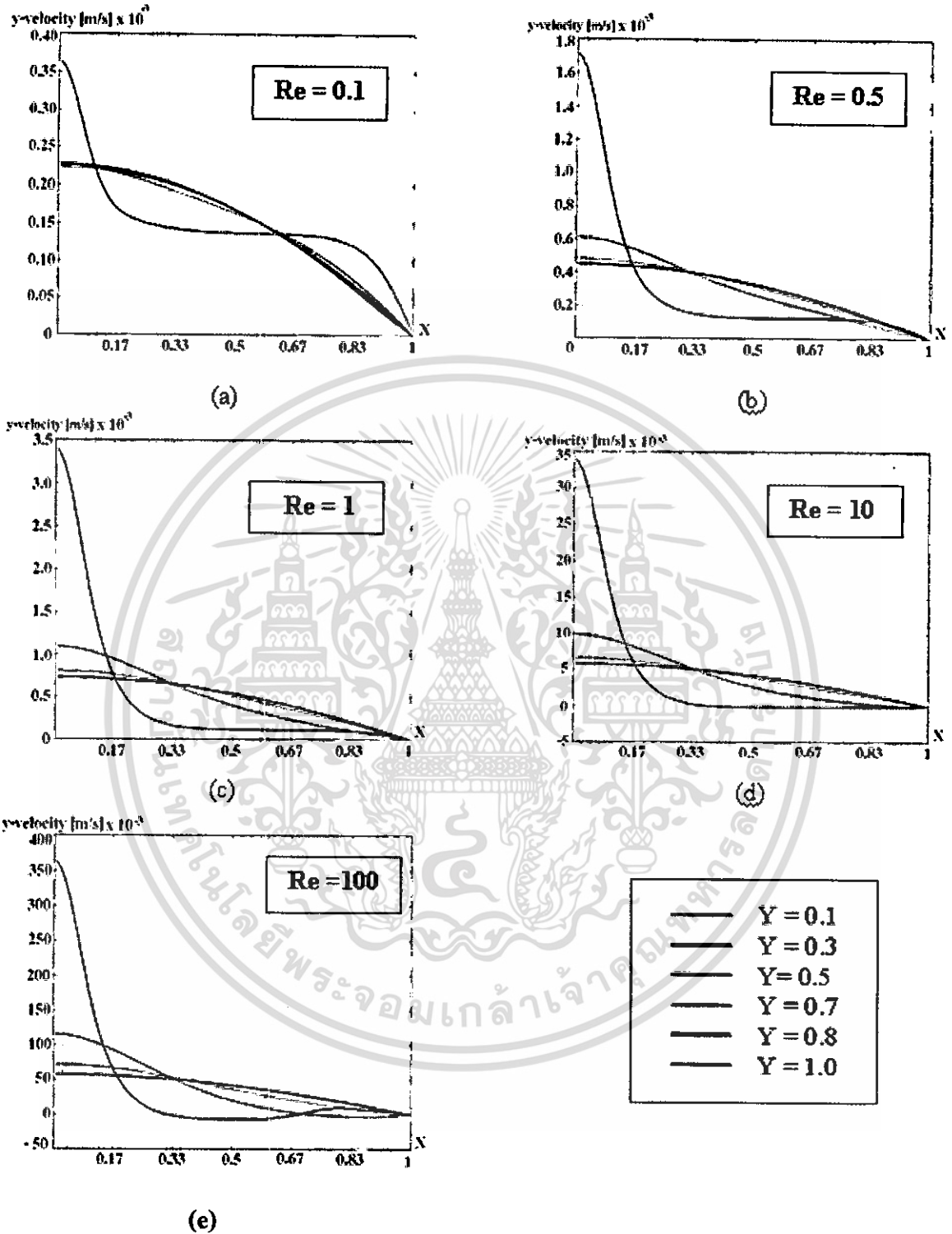
จากรูปที่ 4.8 ที่ $Y = 0.1$ หรือบริเวณปลายท่อแคปิลลารี การกระจายตัวของความเร็วตามแนวหน้าตัดท่อ จะมีค่าค่อนข้างสูง จะเห็นได้ว่า ที่ Re มีค่าสูง ความเร็วที่บริเวณกลางท่อจะมีค่าสูงอย่างเฉียบพลัน

หรือเป็นลักษณะของการเกิดเจ็ท (jet) ทำให้แรงเฉือนภายในบริเวณนี้มีค่ามากเป็นผลทำให้เกิดการไหลตีกลับของของเหลว เกิดเป็นลักษณะของการหมุนวนดังแสดงในรูปที่ 4.12 และที่ $Y > 0.5$ การไหลจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวแกน x อีกต่อไป หรือมีการพัฒนาเต็มที่ (fully develop) ดังแสดงตามรูปที่ 4.9 และมีรูปแบบของการไหลเป็นพาราโบลา ซึ่งเป็นไปตามหลักของพลศาสตร์ของไหล



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง velocity field กับ dimensionless distance ตามแนวแกน x ที่ระยะที่ต่างกัน ที่ค่า Re ต่างๆกัน

รูปที่ 4.9 แสดงถึงการกระจายของความเร็วเมื่อมีการเปลี่ยนค่า Re ของท่อใน ตั้งแต่ 0.1 ถึง 100 สังเกตที่ Re ค่าต่ำๆ ที่ Y มีค่าเท่ากับ 0.1 (บริเวณปลายท่อใน) เจ็ทที่เกิดขึ้นจะมีค่าไม่สูงมากนัก จึงไม่เกิดผลให้มีการกระจายความเร็วที่บริเวณผิวท่อนอก แต่ที่ Re มีค่ามาก ($Re > 10$) เจ็ทที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้มีการไหลกลับของความเร็ว ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการหมุนวนดังที่ได้กล่าวมา

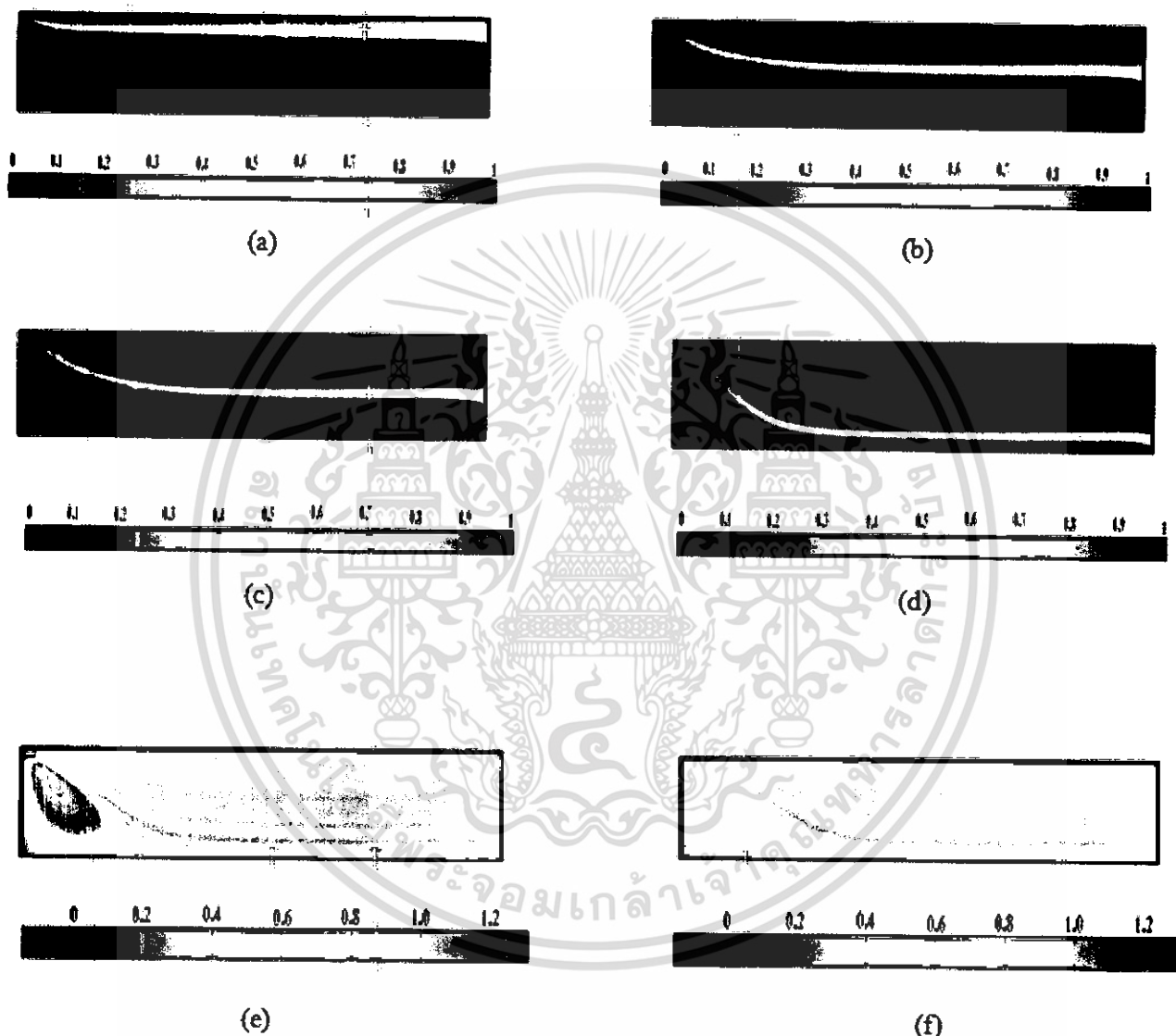


รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตามแนวแกน y กับ dimensionless distance ตามแนวแกน x ที่ระยะที่ต่างกัน (a) $Re = 0.1$ (b) $Re = 0.5$ (c) $Re = 1$ (d) $Re = 10$ (e) $Re = 100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การศึกษาพฤติกรรมของไหลและการแพร่

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมของของไหลในการถ่ายเทมวล ซึ่งเป็นที่ทราบแล้วว่า กลไกในการถ่ายเทมวลภายในท่อระดับไมโครเป็นแบบการพามวลและการแพร่ในเวลาเดียวกัน ดังนั้นปัจจัยที่จะมีผลมากต่อลักษณะรูปร่างการไหลจะเป็น ความเร็วของของไหลภายในท่อซึ่งจะเห็นได้ชัดจากรูปที่ 4.10

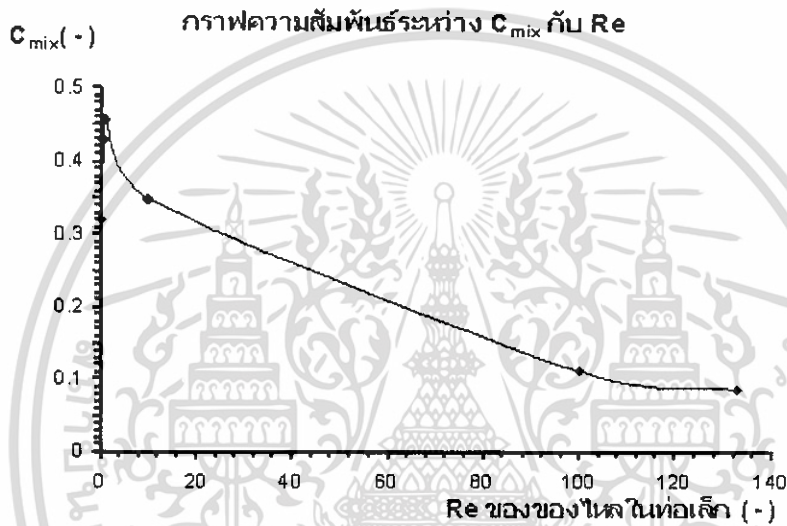


รูปที่ 4.10 แสดงการกระจายของความเข้มข้น (concentration profile) ในหน่วย mol/m^3 ของการไหลภายในท่อ ที่ (a) $Re = 0.1$ (b) $Re = 0.5$ (c) $Re = 1$ (d) $Re = 10$ (e) $Re = 100$ (f) $Re = 130$

รูปที่ 4.10 แสดงถึงผลของการเพิ่มอัตราการไหลของของไหลท่อในโดยการเปลี่ยนค่า Re ตั้งแต่ 0.1 ถึง 130 ที่เส้นผ่านศูนย์กลางท่อในมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อสังเกตการกระจายของความเข้มข้น จะเห็นได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

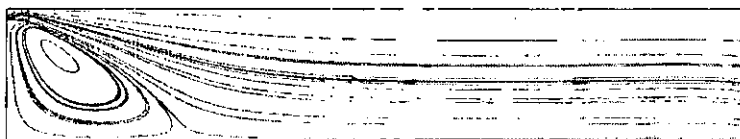
อย่างชัดเจนจากรูปที่ 4.10 ว่ายังมี Re มากก็จะมีกระจายของความเข้มข้นสูง หรือมีการถ่ายโอนมวลเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของ Re ที่มากถึงค่าหนึ่ง จะทำให้เกิดการไหลวนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เวลาในการผสมลดลงนั่นคือการผสมเกิดได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ

การบอกถึงประสิทธิภาพของการผสมโดยใช้ดัชนีการผสม (Mixing index) เป็นตัวชี้วัดสามารถทำได้โดยการหาความเบี่ยงเบนของความเข้มข้นที่ได้จากการจำลอง ซึ่งโปรแกรมที่ใช้บอกปริมาณความเข้มข้นที่ได้ในงานวิจัยจะใช้ Photoshop CS 8.0 ผลที่ได้จากการคำนวณดัชนีการผสมที่ Re ต่างๆกันแสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_{mix} กับ Re

จากกราฟรูปที่ 4.11 จะเห็นว่า เมื่อ Re เพิ่มขึ้น ค่าดัชนีการผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงที่ค่า Re ประมาณ 1.5 การเพิ่มขึ้น Re จะเริ่มทำให้ค่าดัชนีการผสมลดลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าที่ Re สูงๆ จะทำให้การไหลวนของของไหลมีขนาดใหญ่ขึ้น จนทำให้การผสมเกิดได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



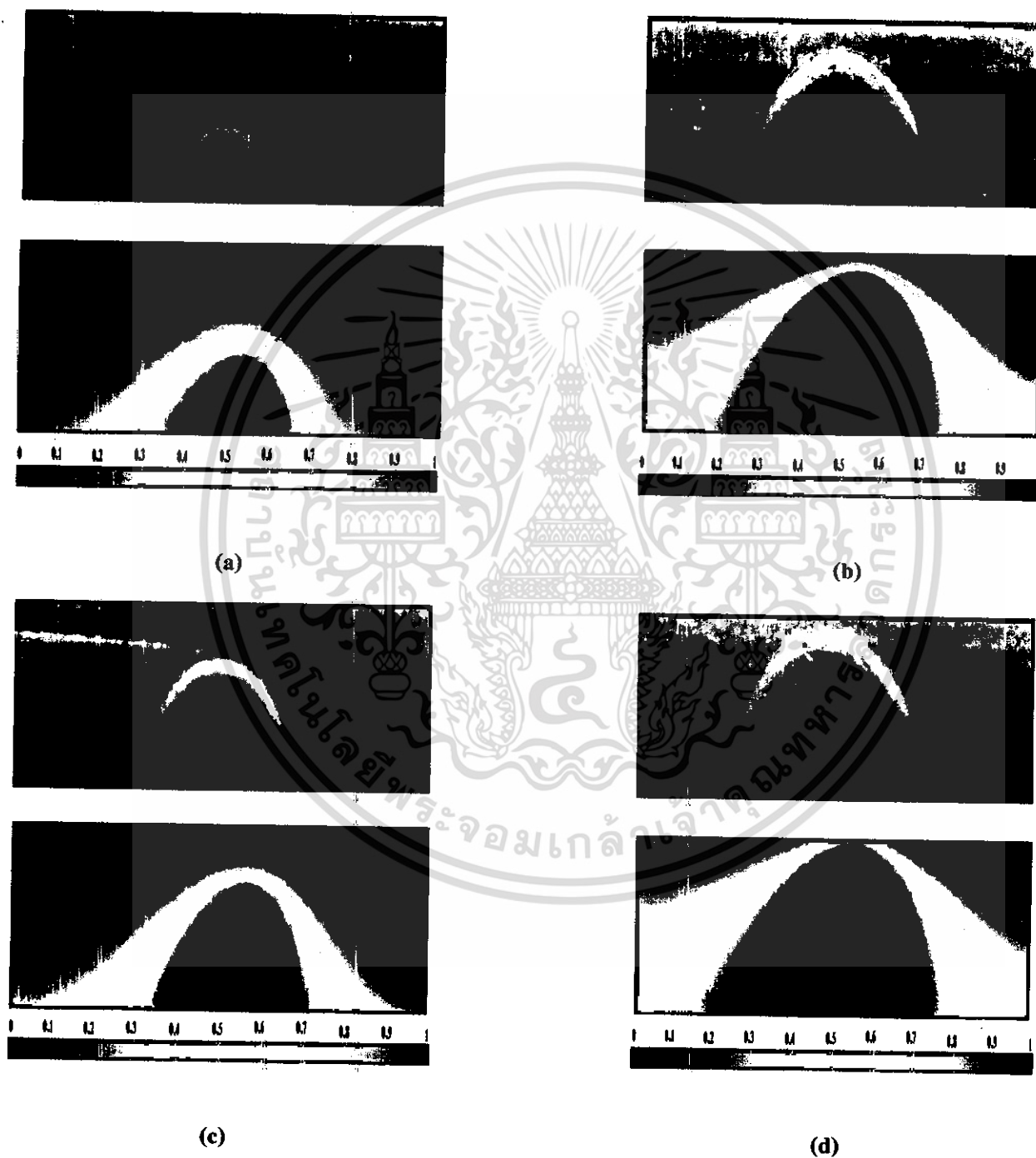
รูปที่ 4.12 เส้นการไหล (stream line) ที่แสดงถึงการไหลวนที่ Re เท่ากับ 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลที่ไม่ผสมกัน (Immiscible Fluid)

4.3.1 ผลของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในต่อพฤติกรรมการไหล

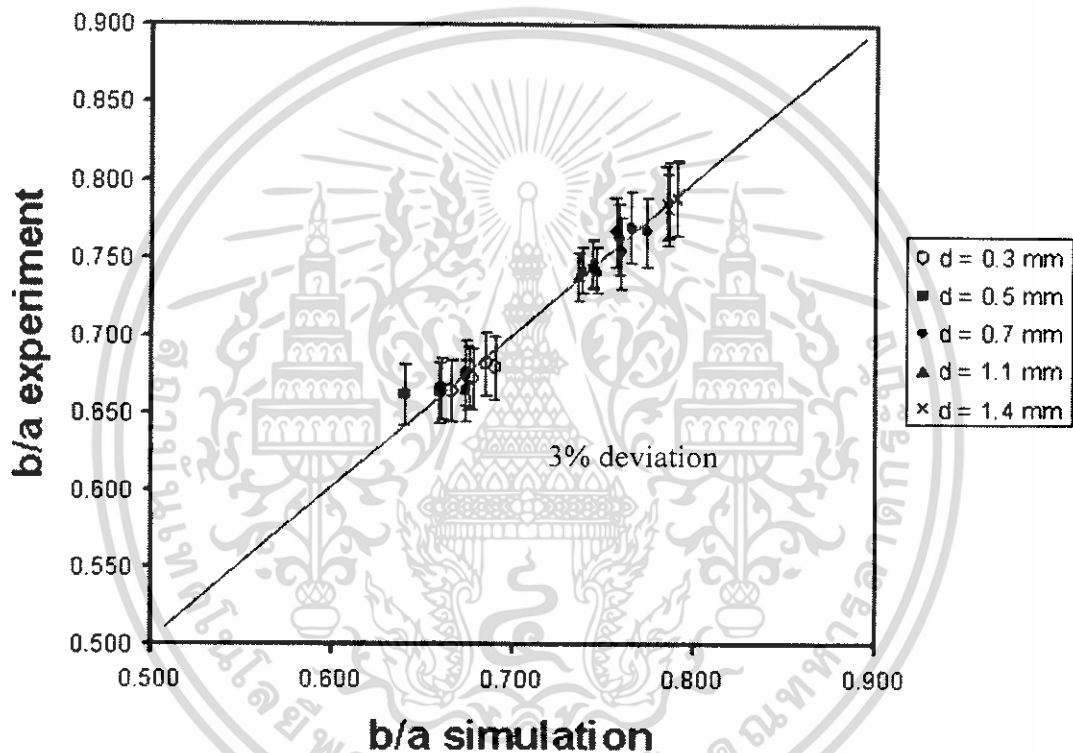
เมื่อพิจารณาการไหลของไหลสองชนิดที่ไม่ผสมกันไม่ได้ (Immiscible Fluid) ภายในท่อระดับไมโคร การไหลจะมีลักษณะเป็นแบบกลุ่มก้อน (Slug flow) แยกชั้นกันเป็นสองเฟสโดยเฟสของ



รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของหยดน้ำของการไหลแบบกลุ่มก้อน (Sludge Flow) ที่ขนาดท่อใน (inner tube) ต่างๆกัน (a) $d = 0.3 \text{ mm}$ (b) $d = 0.5 \text{ mm}$ (c) $d = 0.7 \text{ mm}$ (d) $d = 1.1 \text{ mm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายรูปร่างจะมีลักษณะของเฟสเป็นรูปวงรีคล้ายกับแคปซูล เรียกรูปร่างนี้ว่า แคปซูลระดับไมโคร (Microcapsule) ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.13 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในที่ใช้มีผลเป็นอย่างมากต่อลักษณะรูปร่างของแคปซูล การเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง จะมีผลทำให้รูปร่างของแคปซูลใหญ่ขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็ยังมีผลทำให้รูปร่างของแคปซูลมีค่าใกล้เคียงกลมมากขึ้น ซึ่งจะสังเกตผลที่ได้จากการเพิ่มขึ้นของค่า aspect ratio ดังในรูปที่ 4.13 เมื่อสังเกตผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง จะเห็นได้ว่าลักษณะของขอบเขตของแคปซูลที่จำลองได้ มีความสอดคล้องต่อผลการทดลองจริงเป็นอย่างมาก



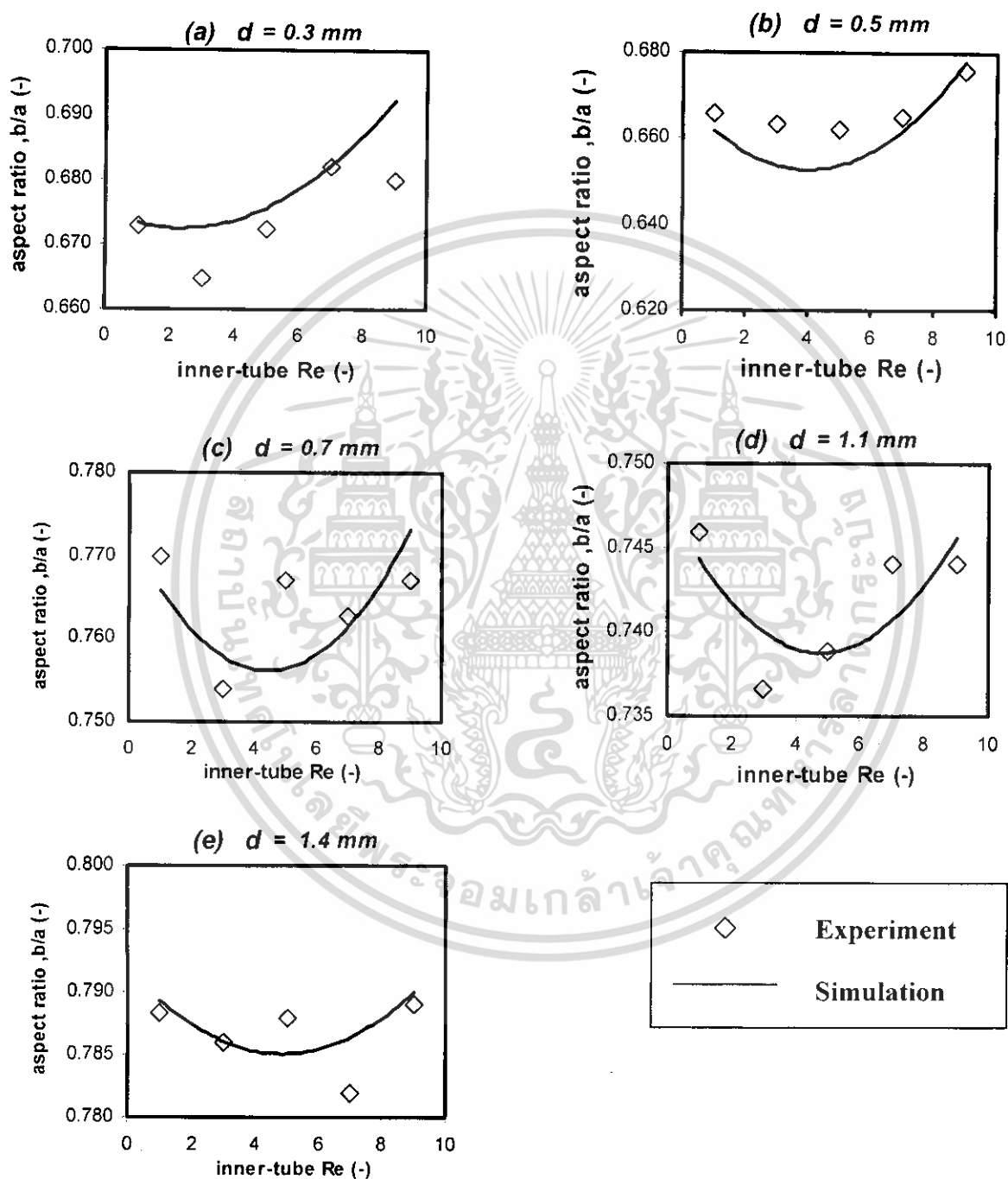
รูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบค่า aspect ratio ของแบบจำลองที่ได้กับการทดลอง

จากรูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองกับการทดลอง จะพบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้น สามารถนำมาใช้อธิบายเพื่อทำนายรูปร่างของ microcapsule ได้เป็นอย่างดี ซึ่งจากการหาค่า aspect ratio ของลักษณะหยดน้ำที่ได้จากแบบจำลอง พบว่าส่วนใหญ่แล้วมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงไม่เกิน 3 % เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะแคปซูลที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของการไหล

อัตราการไหลของท่อใน ที่มีผลต่อลักษณะของการไหลแบบสองเฟสจะแสดงอยู่ในรูปของ Re ของท่อในเมื่อมีการเปลี่ยนค่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง



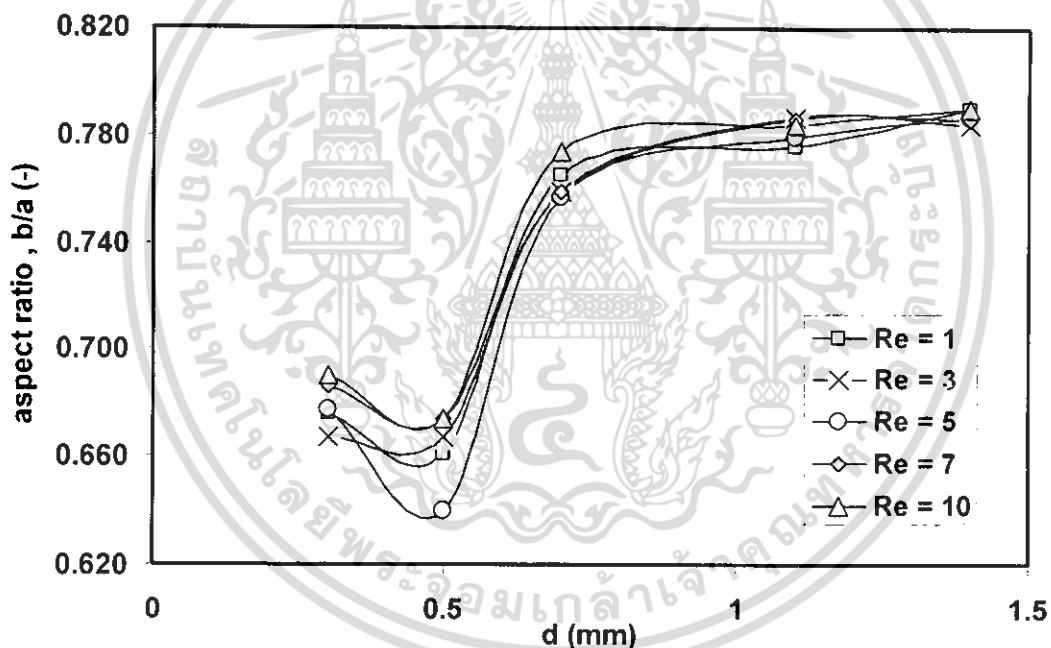
รูปที่ 4.15 แสดงผลของ Re ของท่อในที่มีต่อรูปร่างลักษณะของหยดน้ำที่ขนาดท่อต่างๆ

(a) $d = 0.3$ mm (b) $d = 0.5$ mm (c) $d = 0.7$ mm (d) $d = 1.1$ mm (e) $d = 1.4$ mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 เป็นผลมาจากการปรับเปลี่ยนค่า Re ที่มีผลต่อลักษณะของหยดน้ำที่ขนาดท่อต่างๆ โดยพิจารณาที่ค่าของ Re ในช่วงระหว่าง 1-10 จะสังเกตได้ว่า การที่ค่า aspect ratio มีค่าเข้าใกล้ 1 จะหมายถึงรูปร่างของหยดน้ำมีความเป็นทรงกลมมากยิ่งขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะที่มีเสถียรภาพในการถ่ายเทมวลและเกิดปฏิกิริยา [9] จากกราฟรูปที่ 4.15 (a) – (e) จะมีลักษณะคล้ายกันแบบเส้นโค้งหงาย ซึ่งจะอธิบายได้ว่า ค่า aspect ratio จะมีแนวโน้มลดลงในช่วงแรกที่ค่า Re มีค่าต่ำๆ ซึ่งผลนี้จะเห็นได้ชัดเจนที่ขนาดของท่อในมีค่าค่อนข้างมากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ค่า Re มีค่ามากขึ้น โดยผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองก็มีลักษณะคล้ายกับผลที่ได้จากการทดลองที่ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3% ดังเห็นได้จากรูป 4.15 พรรณิและนิศารัตน์ [3] ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลของน้ำในพาราฟินในท่อแคบระดับไมโครที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในเท่ากับ 1.6 mm และได้รายงานผลออกมาในลักษณะเดียวกันคือ ค่า aspect ratio ที่มีค่าสูงขึ้น ที่อัตราส่วน Re ท่อในต่อ Re ท่อนอก มีค่ามากขึ้น



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางท่อใน กับ aspect ratio ที่ค่า Re ต่างๆ

จากแบบจำลองที่ได้สามารถนำมาทำนายความสัมพันธ์ของขนาดท่อใน ที่มีผลต่อลักษณะหยดของเหลว ได้จากกราฟรูปที่ 4.16 เป็นการพล็อตค่าระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในกับ aspect ratio จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในจะทำให้ค่า aspect ratio เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและค่อยๆเพิ่มอย่างสม่ำเสมอ เมื่อค่า aspect ratio เข้าใกล้หนึ่ง นั่นคือการเพิ่มขนาดท่อจะส่งผลให้รูปร่างอนุภาคหยดเข้าใกล้ทรงกลมมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในท่อแคบระดับไมโคร (Microchannel Fluid Flow) ดังที่กล่าวในตอนต้นแล้วว่า เป็นเรื่องที่ยากลำบากที่จะอธิบายพฤติกรรมการไหล โดยใช้ข้อมูลจากผลการทดลอง ทั้งนี้ผลของปัจจัยต่างๆมากมายที่จะส่งผลกระทบต่อให้การไหลมีลักษณะและพฤติกรรมที่แตกต่างกัน การศึกษาในขั้นต้นเราทำการทดลองใช้โปรแกรม Comsol Multiphysic 3.2 a เป็นเครื่องมือในการจำลองพฤติกรรมการผสมของสารละลายต่างทับทิมในน้ำ ซึ่งจากผลการทดลองทำให้เราทราบถึงการกระจายตัวของความเร็วและความเข้มข้น ซึ่งทั้งหมดนี้ทำให้เราสามารถออกแบบสถานะและขนาดท่อเพื่อที่จะช่วยให้การผสมเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการจำลองการไหลเบื้องต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อประโยชน์ในการคาดคะเนแนวโน้มและพฤติกรรมเชิงธรรมชาติของการไหล

จากการสร้างแบบจำลองการไหลทำให้พบว่า

- การกระจายตัวของความเร็วที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์ (Fully Developed Velocity Profile) ในท่อแคบระดับไมโครจะมีลักษณะแบบพาราโบลา
- การเพิ่ม Re ของของไหลจะมีผลทำให้ Laminar space มีค่าเพิ่มขึ้นแต่ที่ Re สูงจะมีผลของการหมุนวนเกิดขึ้นด้วย
- การเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเล็กจะมีผลให้ Laminar space เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นในช่วงต้น แต่จะเริ่มคงที่เมื่อ Laminar space มีค่าเข้าใกล้เส้นผ่านศูนย์กลางท่อใหญ่
- สำหรับการไหลแบบสองเฟสพบว่าลักษณะของหยดของเหลวมีค่าขึ้นกับอัตราการไหลและขนาดของท่อ ค่า aspect ratio จะมีแนวโน้มลดลงในช่วงแรกที่ค่า Re มีค่าต่ำๆ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ค่า Re มีค่ามากขึ้น เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในจะทำให้ค่า aspect ratio เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่อยๆเพิ่มอย่างสม่ำเสมอ เมื่อค่า aspect ratio เข้าใกล้หนึ่ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลในระดับไมโคร (Microchannel Fluid Flow) ปรากฏต่าง ๆ มากมาย มักจะมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการไหลทั้ง โดยทางตรงและทางอ้อม ปรากฏเหล่านี้จะต้องมีการศึกษาและทำการพัฒนาต่อไปโดยอาศัยพื้นฐานการสร้างแบบจำลองที่ได้ศึกษามาในการทดลองนี้

5.2.1 ศึกษาถึงลักษณะรูปทรงแบบต่างๆของท่อที่มีต่อลักษณะการไหล เช่น การชนในท่อรูปตัวที (T-tube Impinging Stream) การผสมในท่อรูปตัววาย (Y-tube Mixing) หรืออาจเป็นลักษณะท่อที่ทำการออกแบบขึ้นเอง ทั้งแบบเฟสเดียวและสองเฟส

5.2.2 พัฒนาแบบจำลองที่ได้ ให้นำไปใช้อธิบาย และทำนายถึงพฤติกรรมการเกิดปฏิกิริยาระดับไมโคร (Micro reaction) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีระดับไมโคร (Microtechnology) ที่แพร่หลายในปัจจุบันและมีแนวโน้มที่จะพัฒนาต่ออย่างกว้างขวางในอนาคต



เอกสารอ้างอิง

1. ปราโมทย์ เคชชะอำไพ , “ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์ของไหล”, พิมพ์ครั้งที่1, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
2. นิสารัตน์ เฟลทินใจ , พรรณี บริบูรณ์ศรี, “ปริยญาณิพนธ์เรื่องเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครสำหรับการสังเคราะห์ไบโอดีเซล”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
3. Jamal saleh , “ Fluid Flow Handbook ”, New York , McGraw-Hill , 1976.
4. Frank P.Incropera , “Fundamentals Of Heat and Mass Transfer”, Fourth Edition , indiana , West Lafayette , 1994.
5. Dechaumphai P. , Wansophark N., “Application of Finite Element Method in Computational Fluid Dynamics”, Computational Mechanics Laboratory Notes , Chulalongkorn University , Bangkok , 2000.
6. Cook R.D. , Malkus S.D. and Plesha M.E. , “ Concept and Applications of Finite Element Analysis ”, Thrid Edition , John Wiley & Sons , New York , 1989.
7. COMSOL Multiphysics model Library @ COPYRIGHT 1994-2005.
8. R.Byron Bird , Warren E.Stewart , “ Transport Phenomena ”, Second Edition , New York , John Wiley & Sons , 1976 .
9. Charinrat Srisamran and Sakamon Devahastin. “Numerical simulation of flow and mixing behavior of impinging streams of shear-thinning fluids.” Chemical Engineering Journal 85 (2002) 215–223.
10. Ying Zheng Liu, Byoung Jae Kim and Hyung Jin Sung. “Two-fluid mixing in a microchannel.” International Journal of Heat and Fluid Flow 25 (2004) 986–995.

ภาคผนวก ก

การหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารแต่ละชนิด

- สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

เนื่องจากปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตน้อยมากจึงสมมติให้คุณสมบัติของสารละลายนี้เหมือนกับน้ำบริสุทธิ์โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพ ที่อุณหภูมิ 25 °C ที่ความดัน 1 atm ดังนี้

- ความหนาแน่น (ρ) เท่ากับ 998 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- ความหนืดทางไดนามิกส์ (μ) เท่ากับ 1.002 กรัมต่อเมตรต่อวินาที

- พาราฟินเหลว

คุณสมบัติทางกายภาพของพาราฟินเหลวที่อุณหภูมิ 25 °C ที่ความดัน 1 atm ดังนี้

- ความหนาแน่น (ρ) เท่ากับ 860 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- ความหนืด ไดนามิกส์ (μ) เท่ากับ 180 กรัมต่อเมตรต่อวินาที

การคำนวณค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตร

การทดลองนี้จะต้องคำนวณหาอัตราการไหลเชิงปริมาตร เพราะต้องนำข้อมูลเหล่านั้นมาใช้ปรับค่าในการทดลอง โดยเราจะทำการคำนวณหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรแยกกันระหว่างสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตกับพาราฟินเหลว โดยเราต้องทำการคำนวณหาอัตราการไหล (v) ก่อน จากสูตรที่ (ก.1) หลังจากนั้นทำการคูณอัตราเร็วการไหลกับพื้นที่หน้าตัดของท่อ จะได้ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตร โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu} \quad (ก.1)$$

เมื่อ Re คือ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

D คือ คุณลักษณะความยาว ในที่นี้คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของช่องการไหล (m)

v คือ อัตราเร็ว (m/s)

μ คือ ความหนืดไดนามิกส์ (kg/m.s)

สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

การคำนวณหาค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตนี้จะกำหนดค่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของช่องการไหลเล็ก (ท่อแคปิลารีที่ใช้ป้อน) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0003 เมตร ที่หน้าตัดทางออก คิดเป็นพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 7.065×10^{-8} ตารางเมตร

กำหนดให้ Re_c เท่ากับ 1 แทนค่าลงในสมการ (ก.1)

$$v = \frac{m^3}{998kg} \left| \frac{1}{0.0003m} \right| \frac{1.002 \times 10^{-3} kg}{m.s}$$

$$v = 3.34 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$Q = v \cdot A = (3.34 \times 10^{-3} \times 7.065 \times 10^{-8}) = 2.36 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s} = 0.85 \text{ ml/hr}$$

พาราฟินเหลว

การหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของพาราฟินเหลวจะคำนวณเช่นเดียวกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยมีสมมติฐาน คือ ภายในท่อใหญ่มีแต่พาราฟินเหลวไหลอยู่เท่านั้น และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อใหญ่เท่ากับ 0.005 เมตร คิดเป็นพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 1.96×10^{-5} ตารางเมตร

กำหนดให้ Re_c เท่ากับ 0.03 แทนค่าลงในสมการ (ก.1)

$$v = \frac{m^3}{860kg} \left| \frac{1}{0.005m} \right| \frac{180 \times 10^{-3} kg}{m.s}$$

$$v = 0.042 \text{ m/s}$$

$$Q = v \cdot A = (0.042 \times 1.96 \times 10^{-5}) = 8.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 88.72 \text{ ml/hr}$$

ภาคผนวก ข

อัตราการไหลเชิงปริมาตรสำหรับท่อแต่ละชนิด

ตารางที่ ข. 1 อัตราการไหลเชิงปริมาตรสำหรับท่อแคปิลลารี (ท่อขนาดเล็ก)

D (m)	Re _c (-)	ความหนืด (kg/m.s)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ความเร็ว (m/s)	พื้นที่หน้าตัด (m ²)	อัตราการไหล (ml / hr)
0.0003	1	0.001	1000	0.0033	7.065E-08	0.85
0.0003	3	0.001	1000	0.0100	7.065E-08	2.54
0.0003	5	0.001	1000	0.0167	7.065E-08	4.24
0.0003	7	0.001	1000	0.0233	7.065E-08	5.93
0.0003	10	0.001	1000	0.0333	7.065E-08	8.48
0.0005	1	0.001	1000	0.0020	1.9625E-07	1.41
0.0005	3	0.001	1000	0.0060	1.9625E-07	4.24
0.0005	5	0.001	1000	0.0100	1.9625E-07	7.07
0.0005	7	0.001	1000	0.0140	1.9625E-07	9.89
0.0005	10	0.001	1000	0.0200	1.9625E-07	14.13
0.0007	1	0.001	1000	0.0014	3.8465E-07	1.98
0.0007	3	0.001	1000	0.0043	3.8465E-07	5.93
0.0007	5	0.001	1000	0.0071	3.8465E-07	9.89
0.0007	7	0.001	1000	0.0100	3.8465E-07	13.85
0.0007	10	0.001	1000	0.0143	3.8465E-07	19.78
0.0011	1	0.001	1000	0.0009	9.4985E-07	3.11
0.0011	3	0.001	1000	0.0027	9.4985E-07	9.33
0.0011	5	0.001	1000	0.0045	9.4985E-07	15.54
0.0011	7	0.001	1000	0.0064	9.4985E-07	21.76
0.0011	10	0.001	1000	0.0091	9.4985E-07	31.09
0.0014	1	0.001	1000	0.0007	1.5386E-06	3.96
0.0014	3	0.001	1000	0.0021	1.5386E-06	11.87
0.0014	5	0.001	1000	0.0036	1.5386E-06	19.78
0.0014	7	0.001	1000	0.0050	1.5386E-06	27.69
0.0014	10	0.001	1000	0.0071	1.5386E-06	39.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 2 อัตราการไหลเชิงปริมาตรสำหรับท่อใหญ่ (ท่อของสารตัวพา)

W (m)	Re ₀ (-)	ความหนืด (kg/m.s)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ความเร็ว (m/s)	พื้นที่หน้าตัด (m ²)	อัตราการไหล (ml / hr)
0.005	0.03	0.18	860	0.0013	0.000019625	88.72



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ค่า laminar space ตามระยะทางตามแนวท่อ (y) ต่างๆ ที่ Re ต่างๆ

ผลการทดลองศึกษาพฤติกรรมการไหลและการผสม ระหว่างน้ำกลั่นกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยกำหนดให้ Re_0 ของท่อใหญ่ (พาราฟินหรือน้ำกลั่น) คงที่ มีค่าเท่ากับ 0.03

ตารางที่ ค.1 ค่า laminar space ตามระยะทางตามแนวท่อ (y) ต่างๆ ที่ $Re_1 = 1$

d (mm)	y	Ratio y	laminar space (mm)	
			lab	simulation
0.3	2	0.286	0.25	0.27
	3	0.429	0.25	0.28
	4	0.571	0.26	0.29
	5	0.714	0.26	0.31
	6	0.857	0.28	0.31
	7	1.000	0.28	0.32
0.5	2	0.286	0.26	0.29
	3	0.429	0.28	0.31
	4	0.571	0.28	0.34
	5	0.714	0.3	0.35
	6	0.857	0.31	0.35
	7	1.000	0.32	0.35
0.7	2	0.286	0.4	0.38
	3	0.429	0.4	0.4
	4	0.571	0.43	0.43
	5	0.714	0.44	0.44
	6	0.857	0.45	0.45
	7	1.000	0.46	0.45
1.1	2	0.286	0.54	0.58
	3	0.429	0.55	0.6
	4	0.571	0.57	0.62
	5	0.714	0.59	0.65
	6	0.857	0.61	0.66
	7	1.000	0.62	0.66
1.4	2	0.286	0.68	0.7
	3	0.429	0.69	0.73
	4	0.571	0.69	0.74
	5	0.714	0.72	0.75
	6	0.857	0.73	0.76
	7	1.000	0.74	0.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.2 ค่า laminar space ตามระยะทางตามแนวท่อ (y) ต่างๆ ที่ $Re_t = 3$

d (mm)	y	ratio y	laminar space (mm)	
			Lab	simulation
0.3	2	0.286	0.26	0.28
	3	0.429	0.3	0.29
	4	0.571	0.31	0.33
	5	0.714	0.35	0.34
	6	0.857	0.35	0.37
	7	1.000	0.36	0.35
0.5	2	0.286	0.3	0.31
	3	0.429	0.35	0.36
	4	0.571	0.4	0.43
	5	0.714	0.45	0.46
	6	0.857	0.47	0.47
	7	1.000	0.47	0.46
0.7	2	0.286	0.43	0.41
	3	0.429	0.47	0.45
	4	0.571	0.52	0.48
	5	0.714	0.53	0.53
	6	0.857	0.53	0.54
	7	1.000	0.53	0.55
1.1	2	0.286	0.63	0.63
	3	0.429	0.65	0.64
	4	0.571	0.67	0.66
	5	0.714	0.68	0.67
	6	0.857	0.7	0.69
	7	1.000	0.7	0.69
1.4	2	0.286	0.77	0.75
	3	0.429	0.77	0.77
	4	0.571	0.8	0.79
	5	0.714	0.83	0.82
	6	0.857	0.85	0.83
	7	1.000	0.85	0.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.3 ค่า laminar space ตามระยะทางตามแนวท่อ (y) ต่างๆ ที่ $Re_c = 5$

d (mm)	y	ratio y	laminar space (mm)	
			Lab	simulation
0.3	2	0.286	0.32	0.31
	3	0.429	0.32	0.33
	4	0.571	0.34	0.35
	5	0.714	0.35	0.36
	6	0.857	0.36	0.37
	7	1.000	0.36	0.37
0.5	2	0.286	0.32	0.33
	3	0.429	0.35	0.35
	4	0.571	0.36	0.36
	5	0.714	0.38	0.37
	6	0.857	0.39	0.37
	7	1.000	0.39	0.37
0.7	2	0.286	0.44	0.43
	3	0.429	0.44	0.45
	4	0.571	0.45	0.46
	5	0.714	0.45	0.47
	6	0.857	0.46	0.47
	7	1.000	0.47	0.48
1.1	2	0.286	0.59	0.62
	3	0.429	0.59	0.63
	4	0.571	0.62	0.65
	5	0.714	0.64	0.67
	6	0.857	0.66	0.67
	7	1.000	0.67	0.67
1.4	2	0.286	0.75	0.77
	3	0.429	0.77	0.79
	4	0.571	0.78	0.81
	5	0.714	0.78	0.82
	6	0.857	0.79	0.83
	7	1.000	0.81	0.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.4 ค่า laminar space ตามระยะทางตามแนวท่อ (y) ต่างๆ ที่ $Re_c = 7$

d (mm)	y	ratio y	laminar space (mm)	
			Lab	simulation
0.3	2	0.286	0.32	0.33
	3	0.429	0.32	0.34
	4	0.571	0.32	0.36
	5	0.714	0.34	0.37
	6	0.857	0.36	0.38
	7	1.000	0.37	0.38
0.5	2	0.286	0.34	0.35
	3	0.429	0.35	0.36
	4	0.571	0.36	0.37
	5	0.714	0.38	0.39
	6	0.857	0.41	0.39
	7	1.000	0.42	0.39
0.7	2	0.286	0.45	0.45
	3	0.429	0.45	0.46
	4	0.571	0.45	0.48
	5	0.714	0.47	0.49
	6	0.857	0.48	0.49
	7	1.000	0.48	0.49
1.1	2	0.286	0.66	0.65
	3	0.429	0.67	0.67
	4	0.571	0.67	0.69
	5	0.714	0.68	0.71
	6	0.857	0.69	0.72
	7	1.000	0.71	0.72
1.4	2	0.286	0.81	0.79
	3	0.429	0.82	0.81
	4	0.571	0.83	0.82
	5	0.714	0.85	0.83
	6	0.857	0.87	0.85
	7	1.000	0.88	0.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.5 ค่า laminar space ตามระยะทางตามแนวท่อ (y) ต่างๆ ที่ $Re_i = 10$

d (mm)	y	ratio y	laminar space (mm)	
			lab	simulation
0.3	2	0.286	0.38	0.35
	3	0.429	0.38	0.36
	4	0.571	0.38	0.37
	5	0.714	0.41	0.39
	6	0.857	0.42	0.39
	7	1.000	0.44	0.4
0.5	2	0.286	0.41	0.38
	3	0.429	0.42	0.39
	4	0.571	0.45	0.41
	5	0.714	0.45	0.43
	6	0.857	0.46	0.43
	7	1.000	0.46	0.44
0.7	2	0.286	0.51	0.48
	3	0.429	0.53	0.49
	4	0.571	0.55	0.51
	5	0.714	0.56	0.52
	6	0.857	0.56	0.52
	7	1.000	0.58	0.53
1.1	2	0.286	0.71	0.69
	3	0.429	0.73	0.71
	4	0.571	0.75	0.73
	5	0.714	0.76	0.75
	6	0.857	0.77	0.76
	7	1.000	0.79	0.76
1.4	2	0.286	0.85	0.81
	3	0.429	0.86	0.83
	4	0.571	0.88	0.85
	5	0.714	0.89	0.86
	6	0.857	0.91	0.87
	7	1.000	0.92	0.87

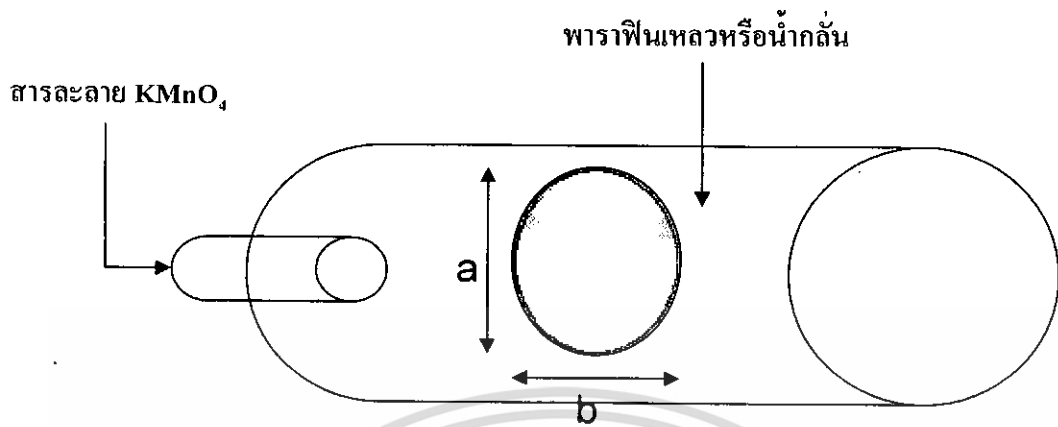
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองศึกษาพฤติกรรมการไหลและการผสมระหว่างพาราฟินเหลวกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยแสดงขนาดความกว้างของหยดของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ d และ Q ต่างๆกัน ดังตาราง

d (mm)	ท่อแคปิลลารี		ขนาดของหยด (mm)					
			lab			simulation		
	Q (ml/hr)	Re_i	a	b	a/b	a	b	a/b
0.3	0.85	1	1.72	1.12	0.67	1.53	0.96	0.66
	2.54	3	1.73	1.15	0.66	1.53	1.02	0.67
	4.24	5	1.73	1.14	0.66	1.55	1.05	0.68
	5.93	7	1.73	1.15	0.68	1.56	1.07	0.69
	8.48	10	1.74	1.15	0.68	1.55	1.07	0.69
0.5	1.41	1	1.86	1.22	0.67	1.67	1.03	0.66
	4.24	3	1.87	1.24	0.66	1.67	1.04	0.66
	7.07	5	1.86	1.24	0.66	1.67	1.03	0.64
	9.89	7	1.87	1.25	0.67	1.68	1.05	0.67
	14.13	10	1.88	1.26	0.68	1.68	1.06	0.67
0.7	1.98	1	2.56	1.92	0.77	2.46	1.83	0.77
	5.93	3	2.56	1.93	0.75	2.45	1.86	0.76
	9.89	5	2.58	1.95	0.77	2.47	1.87	0.76
	13.85	7	2.57	1.96	0.76	2.49	1.89	0.76
	19.78	10	2.58	1.97	0.77	2.48	1.92	0.77
1.1	3.11	1	2.72	2.02	0.74	2.67	1.92	0.75
	9.33	3	2.75	2.03	0.74	2.69	1.94	0.74
	15.54	5	2.76	2.05	0.74	2.71	1.95	0.74
	21.76	7	2.75	2.05	0.75	2.72	1.97	0.74
	31.09	10	2.77	2.07	0.75	2.73	1.98	0.74
1.4	3.96	1	2.93	2.31	0.79	2.88	2.23	0.79
	11.87	3	2.95	2.33	0.79	2.92	2.26	0.78
	19.78	5	2.97	2.34	0.79	2.91	2.29	0.79
	27.69	7	2.98	2.33	0.78	2.94	2.31	0.79
	39.56	10	2.98	2.34	0.79	2.94	2.34	0.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ ความยาวด้าน a และ b แสดงดังรูป



รูปที่ ๓.1 การแสดงลักษณะของไมโครแคปซูล (micro capsule)

นิยาม ค่า b/a คือค่า Aspect ratio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้