

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครสำหรับการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพ

MICROREACTOR FOR BIODIESEL SYNTHESIS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MICROREACTOR FOR BIODIESEL SYNTHESIS



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

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง

เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครสำหรับการสังเคราะห์น้ำมันดีเซล
ชีวภาพ

โดย

นางสาวนิศารัตน์ เพลิณใจ

นางสาวพรรณิ บริบูรณ์ศรี

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์


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


..... กรรมการ
(อาจารย์บุญชัย ไชติวิริยวานิชย์)


..... กรรมการ
(ดร. สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครสำหรับการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพ
โดย	นางสาวนิศาตร์ณ์ เพลินใจ นางสาวพรรณิ บริบูรณ์ศรี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครที่มีช่องการไหลขนาดพื้นที่หน้าตัด 60×90 ตารางไมโครเมตร โดยอัตราการไหลเชิงปริมาตรของกรดออกทานอิกต่อเมทานอลเท่ากับ 1:4 ในช่วงค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ (Re) น้อยกว่า 10 (-) แสดงถึงลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) จากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดออกทานอิกและเมทานอลในสัดส่วนดังกล่าวที่อุณหภูมิในช่วง 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส ให้ค่าร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานอิกเท่ากับ 15 ถึง 39 ตามลำดับ ค่าคงที่สมดุลเท่ากับ 1.70×10^{-3} ถึง 1.63×10^{-2} ตามลำดับ ที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.07×10^{-9} ถึง 2.86×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที

จากผลการทดลองการผสมที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาแล้วค่าร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานอิกจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่มีค่ามากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม ค่าร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานอิกมีค่าคงที่ประมาณ 22 ทำให้สรุปได้ว่าการแพร่ที่เกิดขึ้นมีอิทธิพลต่อร้อยละการแปลงผัน ซึ่งสามารถยืนยันผลการทดลองด้วยการทำแบบจำลองการผสมด้วย โปรแกรม Comsol Multiphysics 3.2a

Report Title Microreactor for biodiesel synthesis
By Miss Nisarath Phlernjai
Miss Pannee Boriboonsri
Advisor Dr. Surat Areerat
Report for Bachelor Degree in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

In this work, the possibility study of biodiesel synthesis in a microreactor was investigated which its cross-section area is $60 \times 90 \mu\text{m}^2$. At given both volumetric flow rates of octanoic acid and methanol in the microchannel, the estimated Reynold number (Re) less than 10 (-) was obtained. It is implied that the typical flow occur inside the microchannel. The esterification by without any catalysts was conducted at given constant volumetric flow ratio of octanoic acid to methanol 1:4, varying temperature 40 to 60 °C. The theoretical diffusion coefficients of octanoic acid to methanol varying from 2.07×10^{-9} to $2.86 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ were applied to determine diffusion and convective phenomena. The experimentally obtained conversion values and the equilibrium constant, K were 15 to 39% conversion and 1.70×10^{-3} to 1.63×10^{-2} , respectively.

From the experimental results when temperature increasing, mixing inside the microchannel enhanced the conversion because of the increasing of diffusion coefficient. On the other hand, comparing with batch reactor at experimentally obtained 22% conversion, it was implied that the increasing of reaction temperature is not able to improve the conversion. The simulation model by Comsol Multiphysics 3.2a provides us a useful calculation to confirm the diffusion affect to enhancement of conversion.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเรื่องนี้ สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์และบุคคลฝ่ายต่างๆ ที่ให้ความอนุเคราะห์และให้คำปรึกษาสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่องานปริญญาโท

ขอขอบคุณ Prof. Masahiro Ohshima ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกียวโตที่ สนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์ในโครงการวิจัยนี้

ขอสนับสนุนโครงการวิจัย เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปี 2549

ขอขอบคุณ รศ. ดร. ประกอบ กิจไชยา ที่ให้คำปรึกษาแนะนำเกี่ยวกับเครื่อง HPLC และ ให้ยืมเครื่องมือทำการทดลอง

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหิดล และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ เคมีที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

ขอขอบคุณสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับโปรแกรม Comsol Multiphysics 3.2a

ขอขอบคุณ คุณจุฑารัตน์ อินนา ที่ให้คำปรึกษาวิธีใช้เครื่อง HPLC

สุดท้ายขอขอบคุณ ดร. สุรัตน์ อาริรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดมา และอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนสำเร็จการศึกษา

คณะผู้จัดทำ

นางสาวนิสรัตน์ เพลินใจ

นางสาวพรณี บริบูรณ์ศรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
สัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 น้ำมันดีเซลชีวภาพกับประเทศไทย.....	4
2.2 น้ำมันดีเซลชีวภาพโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....	4
2.3 ตัวแปรของกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....	5
2.4 เครื่องปฏิกรณ์.....	6
2.5 เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ (Static Mixer).....	7
2.6 ความรู้พื้นฐานทางฟิสิกส์และเคมีของอุปกรณ์ระดับไมโคร.....	8
2.7 การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพกับไมโครเทคโนโลยี.....	11
2.8 การแพร่ในระบบของเหลว 2 ชนิด.....	13
2.9 การแพร่ที่เกิดปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์.....	16
2.10 สมดุลปฏิกิริยาเคมี.....	17
2.11 การหาคอนเวอร์ชันที่เกิดขึ้น ณ สภาวะสมดุล (Equilibrium Conversion).....	19
2.12 การคำนวณค่าความหนืดของของเหลวที่ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิ.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การทดลอง.....	22
3.1 การศึกษาพฤติกรรมของการไหลในท่อเล็ก.....	22
3.2 การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร.....	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	27
4.1 ผลของค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่อพฤติกรรมของการไหล.....	27
4.2 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร.....	30
4.3 การเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในระบบต่างกัน.....	34
บทที่ 5 แบบจำลองการผสมในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร.....	37
5.1 แบบจำลองลักษณะการไหลภายในช่องการไหลของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร.....	37
5.2 การหาเกณฑ์บ่งบอกประสิทธิภาพของการผสม.....	41
5.3 ผลของการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่มีต่อการผสมของกรดออกทานอิก และเมทานอล.....	42
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	47
เอกสารอ้างอิง.....	48
ภาคผนวก.....	50
ภาคผนวก ก. การศึกษาผลของอัตราการไหลที่มีต่อขนาดหยดน้ำ.....	51
ภาคผนวก ข. การหาค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของการไหลในท่อแคบ.....	53
ภาคผนวก ค. โคโรมาโตรแกรมของเมทิลแคปปีเลทและกราฟมาตรฐานของ เมทิลแคปปีเลท.....	55
ภาคผนวก ง. ผลการทดลอง 3.2 การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ในเครื่องปฏิกรณ์ ระดับ ไมโคร.....	57
ภาคผนวก จ. การหาค่าร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานอิกและค่าคงที่สมดุลใน ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน.....	58
ภาคผนวก ฉ. การคำนวณอัตราเร็วภายในช่องการไหลระดับไมโคร.....	60
ภาคผนวก ช. การหาค่าความหนืดและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบเครื่องผสมขนาดทั่วไปกับขนาดไมโคร.....	8
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบกลุ่มตัวแปรไว้หน่วยระหว่างภายในถึงปฏิกรณ์ระบบมาโคร และระบบไมโคร.....	11
ตารางที่ 3.1 อัตราการไหลของออกทานอนิกและเมทานอลที่เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา เอสเตอร์ฟิเคชัน.....	26
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติสมบัติที่ใช้ในการคำนวณค่า Re ของสารต่าง ๆ.....	28
ตารางที่ 4.2 รีเทนชันไทม์ (Retention Time) ของสารแต่ละชนิดของเครื่องHPLC.....	32
ตารางที่ 4.3 ผลของสัดส่วนอัตราการไหลของกรดออกทานอนิกต่อเมทานอลในปฏิกิริยา เอสเตอร์ฟิเคชันที่ 40 °ซ.....	33
ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อค่าร้อยละการแปลงผันและค่าคงที่สมดุลในสัดส่วนอัตรา การไหลเชิงปริมาตรของกรดออกทานอนิกต่อเมทานอล 1:4.....	34
ตารางที่ 4.5 ค่าร้อยละการแปลงผันคอนเวอร์ชันและค่าคงที่สมดุลในถังปั่นกวนแบบกะ ขนาด 50 มิลลิลิตร.....	34
ตารางที่ 4.6 ค่าความร้อนของปฏิกิริยาแต่ละระบบ.....	35
ตารางที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากการประมาณค่าโดยวิธี Wilkey-Chang.....	43
ตารางที่ 5.2 ค่าตัวแปรและค่าคงที่ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง.....	43
ตารางที่ ก.1 ขนาดของหยดที่อัตราความเร็วของน้ำและพาราฟินส์เหลวต่าง ๆ กัน.....	51
ตารางที่ ก.1 ปริมาณสารเมทิลแคปปีเลทกับพื้นที่ใต้กราฟ HPLC โครมาโตแกรม.....	55
ตารางที่ ง.1 เปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟกับปริมาณเมทิลแคปปีเลทในสัดส่วนของ อัตราการไหลของกรดออกทานอนิกต่อเมทานอลต่างกัน.....	57
ตารางที่ ซ.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ.....	61
ตารางที่ ซ.2 ค่าความหนืด ณ อุณหภูมิต่าง ๆ.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่.....	8
รูปที่ 2.2 ก. ถังกวนขนาดทั่วไป	
ข. เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครรูปตัวที.....	9
รูปที่ 2.3 การ์ดผลิตภัณฑ์น้ำมันดีเซลชีวภาพของ ONAMI.....	12
รูปที่ 2.4 กลไกการเคลื่อนที่และการแพร่ของของไหลในท่อระดับไมโคร.....	12
รูปที่ 2.5 แผนภาพการแพร่ที่เกิดปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์.....	16
รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K$ กับ $1/T$	19
รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์การทดลองพฤติกรรมกรไหล.....	24
รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์การทดลองการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน.....	25
รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์การทดลองการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบต่อเนื่อง.....	26
รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์การทดลองการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบกะ.....	26
รูปที่ 4.1 การกำหนดขนาดของหยดน้ำ.....	27
รูปที่ 4.2 รูปร่างของหยดน้ำ (จุดสีเทา) โดยมีพาราฟินส์เหลวอยู่ด้านนอก.....	28
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Re_w และ Re_p กับค่า Aspect Ratio.....	29
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Re_w กับขนาด b ที่ Re_p ต่าง ๆ กัน.....	30
รูปที่ 4.5 บริเวณการเกิดปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร.....	31
รูปที่ 4.6 HPLC โครมาโตแกรมของเมทิลแคปปีเลท.....	32
รูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบร้อยละการแปลงผันของกรคอกทาโนอิกของระบบเครื่อง ปฏิกรณ์ระดับไมโครกับระบบกะ.....	35
รูปที่ 4.8 แสดงความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K$ กับ $1/T$	36
รูปที่ 5.1 ช่องป้อนสารในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร.....	37
รูปที่ 5.2 ช่องทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร.....	38
รูปที่ 5.3 เงื่อนไขขอบเขตของช่องกรไหลสำหรับสมการนาเวียร์-สโตรด.....	40
รูปที่ 5.4 ฟลักซ์การแพร่ของกรคอกทาโนอิกตามช่องกรไหล.....	44
รูปที่ 5.5 ผลของสัมประสิทธิ์การแพร่ต่อการกระจายของความเข้มข้น เมทานอลในช่องกรไหลระดับไมโคร.....	44
รูปที่ 5.6 แสดง Concentration Gradient ของเมทานอล.....	45
รูปที่ 5.7 ผลของสัมประสิทธิ์การแพร่ต่อการกระจายความเข้มข้น ที่ระยะทางตามทิศทางกรไหล.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ค.1 HPLC โครมาโตแกรมของเอสเทอร์ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส...55	
รูปที่ ค.2 กราฟมาตรฐานของเมทิลแคปปีเลท.....56	
รูปที่ ค.3 HPLC โครมาโตแกรมของเอสเทอร์ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส...56	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

a	ความสูงหรือความกว้างของช่องหน้าตัดสี่เหลี่ยม (ระยะทาง)
A	พื้นที่หน้าตัด (พื้นที่)
b	ความกว้างหรือความสูงของช่องหน้าตัดสี่เหลี่ยม (ระยะทาง)
Bo	บอนด์นัมเบอร์ (Bond Number)
c	ความเข้มข้นรวมสาร A และ B (โมลต่อปริมาตร)
c_{av}	ความเข้มข้นทั้งหมดเฉลี่ยของสาร A รวม B (โมลต่อปริมาตร)
Ca	แคปิลลารีนัมเบอร์ (Capillary Number)
c_A	ความเข้มข้นของสาร A (โมล A ต่อปริมาตร)
d	คุณลักษณะความยาว
D_{AB}	สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลาย A ที่ความเข้มข้นในสารละลาย B (พื้นที่ต่อเวลา)
Fr	ฟรูดนัมเบอร์ (Froude Number)
ΔG	พลังงานอิสระ
ΔG°	พลังงานอิสระมาตรฐาน
kc_A	โมลของสาร A ที่เกิดปฏิกิริยาต่อหน่วยปริมาตรต่อเวลา
M_B	มวลโมเลกุลของสารทำละลาย B (กรัมต่อโมล)
M_1	มวลโมเลกุลเฉลี่ยของสารละลายที่จุด 1 (มวลสารต่อปริมาตร)
n_A	จำนวน โมลของสาร A ที่เวลาใด ๆ
n_{A0}	จำนวน โมลของสาร A ที่เวลาเริ่มต้น
n_T	จำนวน โมลรวม
N_A	ฟลักซ์ของสาร A (โมล A ต่อพื้นที่ต่อเวลา)
N_{Az}	ฟลักซ์ของสาร A ในทิศทาง z (โมล A ต่อพื้นที่ต่อเวลา)
N_B	ฟลักซ์ของสาร B (โมล B ต่อพื้นที่ต่อเวลา)
p	ความดัน (แรงต่อพื้นที่)
P_A, P_B	พาราชอร์ (Parachors)
Re	เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number)
Re_p	เรย์โนลด์นัมเบอร์พาราฟินส์เหลว
Re_w	เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำ
S	พื้นที่หน้าตัดของของเหลว
T	อุณหภูมิหน่วยของสเกลวิน
u	เวกเตอร์ความเร็ว (ระยะทางต่อเวลา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

U	เส้นรอบวงของพื้นที่หน้าตัดผิวเปียก
v	อัตราเร็ว (ระยะทางต่อเวลา)
\tilde{V}_A	ปริมาตรของเหลวของตัวถูกละลาย A ที่จุดเดือดปกติ
V_B	ปริมาตรของตัวถูกละลาย B ใน 1 โมลที่จุดเดือดปกติ (ปริมาตรคือ โมล)
We	เวบเบอร์ (Weber Number)
x_A	สัดส่วนโดยโมลของสาร A
y_i	สัดส่วนโดยโมลของสาร i มีค่าเท่ากับ n_i/n_T
z	ระยะทางที่ศทาง z

สัญลักษณ์กรีก

η_B	ความหนืดของตัวทำละลาย (เซนติพอยส์)
μ	ค่าความหนืดไดนามิกส์
ψ_B	Association Parameter ของตัวทำละลาย
ρ	ความหนาแน่น (น้ำหนักต่อปริมาตร)
ρ_1	ความหนาแน่นเฉลี่ยของสารละลายที่จุด 1 (มวลต่อปริมาตร)
ϕ	Association Factor ของตัวทำละลาย (-)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันน้ำมันเชื้อเพลิงได้กลายเป็นปัจจัยหลักในการดำรงชีวิตของมนุษย์กันมากขึ้น เนื่องจากน้ำมันได้ถูกนำมาใช้เพื่อประกอบกิจกรรมในด้านต่าง ๆ อย่างมากมาย อย่างไรก็ตามจากสภาพการณ์พลังงานที่มีแนวโน้มความต้องการใช้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเติบโตทางเศรษฐกิจ จึงส่งผลให้ความต้องการเพิ่มสูงขึ้น จากกรณีที่น้ำมันที่มีอยู่มีปริมาณอย่างจำกัด ทำให้น้ำมันอยู่ในสถานะที่ขาดแคลน จึงได้มีการคิดค้นสิ่งที่สามารถใช้ทดแทนน้ำมันขึ้น

น้ำมันดีเซลชีวภาพหรือไบโอดีเซลเป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่ทำมาขึ้นเพื่อแก้ปัญหา โดยทั่วไปแล้วน้ำมันดีเซลชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) ระหว่างน้ำมันหรือไขมันที่ได้จากพืชหรือสัตว์กับแอลกอฮอล์ ซึ่งปกติแล้วสารที่มีความหนืดสูง (น้ำมัน) กับสารที่มีความหนืดต่ำ (แอลกอฮอล์) จะมีการผสมและปฏิกิริยากันไม่ได้ จึงต้องมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไป การเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยานี้เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลงจะต้องมีการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจึงจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้บริสุทธิ์ ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่าย

เหตุนี้จึงได้มีการศึกษาการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครเมตร ข้อดีของการผลิตแบบนี้จะใช้เวลาน้อยในการทำปฏิกิริยาให้สมบูรณ์ การผสมและการทำปฏิกิริยาดีขึ้น การควบคุมระบบจะทำได้ง่ายขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้วิธีการผลิตแบบนี้พัฒนาไปสู่การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในระดับอุตสาหกรรมได้ ซึ่งเราอาจแบ่งน้ำมันดีเซลชีวภาพตามประเภทของน้ำมัน ที่นำมาใช้ได้ออกเป็น 3 ประเภท

1. น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์

น้ำมันดีเซลชีวภาพประเภทนี้ก็คือน้ำมันพืชแท้ ๆ (เช่น น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันปาล์ม, น้ำมันถั่วลิสง, น้ำมันถั่วเหลือง) หรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ (เช่น น้ำมันหมู) ซึ่งเราสามารถเอามาใช้ได้เลยกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสม หรือเติมสารเคมีอื่นใด หรือไม่ต้องนำมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมัน

2. น้ำมันดีเซลชีวภาพแบบลูกผสม

น้ำมันดีเซลชีวภาพชนิดนี้เป็นลูกผสมระหว่างน้ำมันพืช (หรือสัตว์) กับ น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล หรืออะไรก็ได้เพื่อให้น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้มากที่สุด

3. น้ำมันดีเซลชีวภาพแบบเอสเทอร์

น้ำมันดีเซลชีวภาพ ในความหมายของสากลหมายถึง น้ำมันดีเซลชีวภาพแบบเอสเทอร์ สำหรับน้ำมันดีเซลชีวภาพประเภทนี้ต้องผ่าน กระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการทางเคมีที่ เรียกว่า ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) นั่นคือ การนำเอาน้ำมันพืชหรือสัตว์ที่มีกรด ไขมัน ไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้เอสเทอร์ โดย จะเรียกชนิดของน้ำมันดีเซลชีวภาพแบบเอสเทอร์ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ข้อดีของน้ำมันดีเซลชีวภาพแบบเอสเทอร์ คือ ค่าซีเทน (Cetane) ใช้แสดงถึงค่าดัชนีการ จุดติดไฟ สูงกว่าน้ำมันดีเซล นั่นคือจุดติดไฟได้ง่ายกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้การจุดระเบิดทำได้ดี การ สั่นคาบสมบรูณ์ คาร์บอนมอนอกไซด์จึงน้อย ไม่มีควันดำและซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ทำลาย สิ่งแวดล้อม มีความหนืดคงที่สามารถย่อยสลายได้เองตามกระบวนการย่อยสลายโดยวิธีทางชีวภาพ (Biodegradable) และไม่เป็นพิษ (Non-Toxic) ข้อเสีย คือราคาแพง ต้นทุนสูงกว่าน้ำมันดีเซล ชีวภาพแบบอื่นๆ เครื่องยนต์ให้กำลังต่ำกว่าน้ำมันดีเซล มีการสร้างแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เพิ่มขึ้น แล้วก็ต้องต้องดัดแปลงส่วนประกอบของเครื่องยนต์ที่เป็นยาง ซึ่งอาจถูกทำลายโดยน้ำมัน ดีเซลชีวภาพ แต่น้ำมันดีเซลชีวภาพแบบเอสเทอร์นี้ใช้กับเครื่องยนต์รอบสูงอย่างรถยนต์ได้และมี คุณสมบัติที่เหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด โครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการ ทำน้ำมันดีเซลชีวภาพแบบเอสเทอร์ โดยเริ่มจากการทดลองทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง แอลกอฮอล์กับกรดไขมัน แล้วจึงค่อยพัฒนาไปเป็นปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง แอลกอฮอล์กับเอสเทอร์

1.2 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย

1. เพื่อทราบถึงหลักการพื้นฐานและการใช้เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร (Micro Reactor)
2. เพื่อศึกษาผลของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครต่อการผลิตเอสเทอร์ก่อนนำมา ประยุกต์ใช้กับการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
3. เพื่อทราบถึงผลของการทำผสมและทำปฏิกิริยาของสารที่มีความหนืดแตกต่างกันมาก คือแอลกอฮอล์กับน้ำมัน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. โครงการงานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการเกิดเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร
2. การผลิตเอสเทอร์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร โดยการศึกษา
 - ผลของคุณสมบัติทางกายภาพของกรคน้ำมัน
 - ผลของคุณหภูมิ
 - อัตราการไหล
 - อัตราส่วนของแอลกอฮอล์กับน้ำมัน เพื่อสร้างแบบจำลอง เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร และสามารถนำมาใช้อัตราไหลคงที่สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่เหมาะสมได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. หากผลของการเกิดเอสเทอร์สูง จะมีโอกาสนำมาประยุกต์ใช้เพื่อผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพแบบเอสเทอร์
2. คาดว่าสามารถลดปริมาณการใช้และค่าใช้จ่ายของตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตเอสเทอร์และน้ำมันดีเซลชีวภาพในอนาคตได้
3. เพื่อให้สามารถควบคุมกระบวนการได้ง่าย เช่น อุณหภูมิ เนื่องจากหน่วยทำปฏิกิริยามีขนาดเล็ก
4. พัฒนานักวิจัยให้มีความรู้ความสามารถ มีความคิดสร้างสรรค์และนำความรู้ที่มีมาประยุกต์ใช้ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

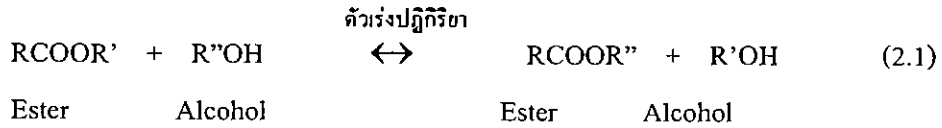
2.1 น้ำมันดีเซลชีวภาพกับประเทศไทย

ท่ามกลางวิกฤติราคาน้ำมันเชื้อเพลิง ที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยเฉพาะน้ำมันดีเซล ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักในภาคคมนาคมขนส่ง และภาคเกษตรกรรม ส่งผลกระทบต่อประชาชนเป็นอย่างมาก นับตั้งแต่ปลายปี พ.ศ. 2543 เป็นต้นมาจนถึงปี 2544 ราคาน้ำมันได้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จากราคาน้ำมันดีเซลปกติ (ก่อนหน้าราคาวิกฤติ ปี พ.ศ.2543) อยู่ที่ประมาณลิตรละ 7-8 บาท ก็ได้พุ่งสูงไปถึงลิตรละ 13-14 บาท จนถึงปัจจุบัน (ปี พ.ศ. 2549) ราคาน้ำมันดีเซลมีราคาเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2544 เท่าตัว ตามปริมาณการใช้ที่เพิ่มขึ้น และการจำกัดการผลิตของกลุ่มประเทศโอเปค ผู้ที่มีอิทธิพลสูงสุดในการกำหนดราคาน้ำมันตลาดโลก จึงถือว่าเป็นอีกครั้งหนึ่งที่ประเทศไทยของเรามีความตื่นตัวในเรื่องของพลังงาน มีการหาแหล่งพลังงานทดแทนน้ำมันกันอย่างมากมาย อาทิ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล (Biomass) ไบโอดีเซล (Biogas) เป็นต้น

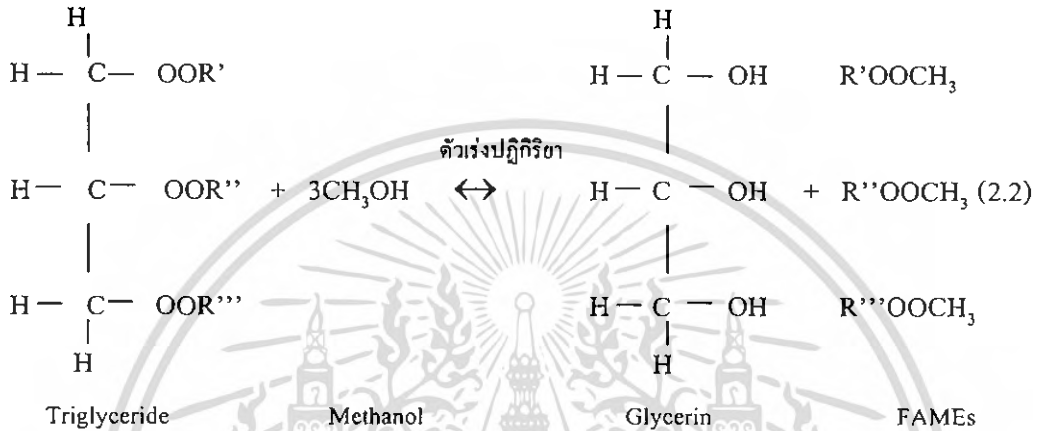
น้ำมันดีเซลชีวภาพเป็นพลังงานทดแทนอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญ โดยทั่วไปแล้วน้ำมันดีเซลชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ระหว่างน้ำมันหรือไขมันที่ได้จากพืชหรือสัตว์กับแอลกอฮอล์ เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล โดยข้อดีของน้ำมันดีเซลชีวภาพในเชิงเศรษฐศาสตร์คือ ราคาถูก ช่วยพยุงราคาพืชผลทางการเกษตรของไทย ลดการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ ในทางด้านสิ่งแวดล้อมและคุณภาพชีวิตคือ ช่วยลดมลพิษในอากาศ ทำให้ลดการสูญเสียจากการรักษาพยาบาลผู้ป่วยที่ได้รับมลพิษจากอากาศ เป็นต้น

2.2 น้ำมันดีเซลชีวภาพโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

มีรายงานผลการวิจัยที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งมีความแตกต่างกันในปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา สัดส่วนของน้ำมันต่อแอลกอฮอล์ที่ใช้ ชนิดของสารตั้งต้น ส่วนใหญ่ที่ศึกษาคือไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์ เวลาในการทำปฏิกิริยา หรือกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน เป็นต้น [2] มีสมการการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันดังสมการที่ 2.1



เมื่อเราใช้เมทานอลในสมการข้างต้น ปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอลดังแสดงในสมการที่ 2.2



Fatty Acid Methyl Ester (FAMES) คือน้ำมันดีเซลชีวภาพนั่นเอง

2.3 ตัวแปรของกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ตัวแปรที่สำคัญในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ส่งผลต่อเวลาและร้อยละการแปลงผัน (Conversion) [2] คือ

2.3.1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับอุณหภูมิอย่างมากแต่ถ้าหากมีเวลาที่เพียงพอ ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้แม้ในอุณหภูมิห้อง โดยทั่วไปจะถูกควบคุมให้มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับจุดเดือดของเมทานอล (60 ถึง 70 °ซ) ที่ความดันบรรยากาศซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรง แต่ต้องทำการกำจัดกรดไขมันอิสระออกจากน้ำมัน โดยการสกัดหรือ พรีเอสเทอร์ฟิเคชัน (Pre-Esterification) แต่ไม่ต้องปรับปรุงสภาพก่อน (Pre-Treatment)

2.3.2 อัตราส่วนแอลกอฮอล์กับน้ำมัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ซึ่งตามมวลสารสัมพันธ์ต้องการ 3 โมลของแอลกอฮอล์ ต่อ 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์ จะได้ 3 โมลของเอสเทอร์ และ 1 โมลของกลีเซอริน ถ้าต้องการให้ปฏิกิริยาไปทางขวา อาจใช้แอลกอฮอล์มากเกินไปในการทำปฏิกิริยา หรือทำการดึงผลิตภัณฑ์ตัวหนึ่งออกไป ซึ่งในกรณีหลังทำได้ยากเนื่องจากเป็นของผสม เมื่อใช้เมทานอล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกินพออัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมากขึ้น แต่อัตราส่วนแอลกอฮอล์ที่มากขึ้นทำให้การแยกกลีเซอรินทำได้ยาก

2.3.3 ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีทั้งด่าง กรด และเอนไซม์ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด ได้แก่ กรดกำมะถัน กรดฟอสฟอริก กรดเกลือ กับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดด่าง (อัลคอกไซด์ของโลหะอัลคาไล) เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดด่างให้ผลในการเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่าตัวเร่งชนิดกรด ประมาณ 4,000 เท่าในปริมาณเท่ากัน [2, 8] จึงเป็นที่นิยมใช้ด่างในการทำปฏิกิริยาทรานส์เมทิลเลชัน นอกจากนี้ด่างมีการกัดกร่อนเครื่องมือในอุตสาหกรรมน้อยกว่ากรด ที่ความเข้มข้นของด่างที่ใช้อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละการแปลงผันถึง 94 ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มความเข้มข้นด่างที่มากกว่านี้ ไม่ทำให้ร้อยละการแปลงผันเพิ่มขึ้น และยังเพิ่มค่าใช้จ่ายมากขึ้น

2.3.4 การผสม

ปัจจัยที่มีความสำคัญของกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันคือองศาการผสมระหว่างแอลกอฮอล์กับไตรกลีเซอไรด์ เนื่องจากการแยกชั้นเพราะละลายเข้ากันไม่ได้ ดังนั้นการผสมจึงมีบทบาทที่สำคัญที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน สำหรับการผลิตในขนาดใหญ่การออกแบบผลของการผสมจึงมีความสำคัญมาก เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นสารตั้งต้นมีธรรมชาติที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกิดขึ้นได้ที่ระหว่างผิวสัมผัสของของเหลว อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นได้ช้า

2.4 เครื่องปฏิกรณ์ [2]

2.4.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch Reactor)

สารตั้งต้น (Reactant) ทั้งหมด ถูกป้อนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ไว้ก่อนแล้วจึงเริ่มปฏิกิริยาเมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนดจึงนำของผสม (ผลิตภัณฑ์ที่ได้กับสารทำปฏิกิริยาที่เหลืออยู่) ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งโดยทั่วไปเป็นแบบถังกวน

2.4.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous Reactor)

สารทำปฏิกิริยาถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไหลออกตรงทางออก ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้มีทั้งแบบถังกวนและแบบท่อ

ในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนผสมต่อเนื่อง (Continuous Stirred-Tank Reactor, CSTR) นั้นเนื่องจากตามทฤษฎีมีการผสมกันดีมาก ความเข้มข้นเท่ากันทั้งที่ทางเข้าและทางออก อัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นขึ้นกับความเข้มข้น จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ช้าที่ร้อยละการแปลงผันสูง ส่วนเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อนั้น ที่พื้นที่หน้าตัดเดียวกันจะมีความเข้มข้นเท่ากัน โดยความเข้มข้นสารตั้งต้นลดลงตามความยาวในแกนไหล ดังนั้นในตอนต้นจะมีความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงและลดลงเรื่อย ๆ ร้อยละการแปลงผันจึงขึ้นกับความยาวของเครื่องปฏิกรณ์

โดยทั่วไปการผลิตในอุตสาหกรรมที่ต้องการการผลิตจำนวนมาก จะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอยู่ในสถานะคงตัว (Steady State) ทำให้ควบคุมได้ง่าย ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังช่วยลดขั้นตอนการถ่ายเทสารทำปฏิกิริยาเข้าออกจากเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งต้องทำในกรณีแบบกะออกไปได้ จึงประหยัดค่าใช้จ่ายด้านแรงงาน นอกจากนี้กระบวนการแบบกะต้องการปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นจึงต้องการเงินลงทุนสูงกว่า มีความแตกต่างในทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในแต่ละกะ

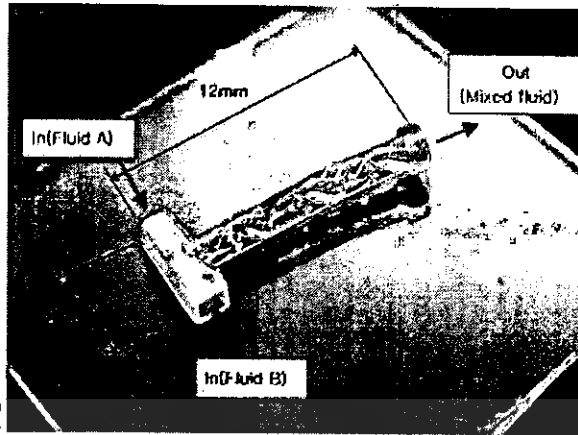
2.4.3 เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องและแบบท่อ

โดยทั่วไปแล้วเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อมีความต้องการขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เล็กกว่าแบบถังกวนต่อเนื่องที่ร้อยละการแปลงผันเดียวกัน ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อคือ การผสมในท่อสำหรับระบบหลายวัฏภาค (Multiphase) ส่วนเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องนั้นจะได้ร้อยละการแปลงผันที่ไม่สูง แม้จะมีการผสมที่ดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเนื่องจากความเข้มข้นที่ต่ำ

2.5 เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ (Static Mixer)

คือ อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการผสมที่อยู่กับที่ไม่ต้องใช้หน่วยขับเคลื่อนใด ๆ อาศัยอัตราไหลของของไหลและวัสดุกันภายในท่อทำให้ของไหลไหลสลับกันไปมาระหว่างกลางท่อและผนังท่อทำให้เกิดการผสมอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถนำมาแก้ปัญหาในกระบวนการผสมได้

เมื่อนำเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่มาใช้ในการผสมทำให้เพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ถึง 400 เปอร์เซ็นต์ ประหยัดพลังงานและสามารถใช้กับของไหลที่มีความหนืดสูงได้ ทำให้ประหยัดในการติดตั้งและค่าบำรุงรักษาขณะใช้งาน ตลอดจนมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมเหมืองแร่ การผลิตสีและเรซิน การผลิตอาหารและยา พอลิเมอร์และพลาสติก และการบำบัดน้ำเสีย



รูปที่ 2.1 เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่

2.6 ความรู้พื้นฐานทางฟิสิกส์และเคมีของอุปกรณ์ระดับไมโคร [3]

2.6.1 การทดลองของอุปกรณ์กระบวนการ

สิ่งที่เห็นได้ชัดเจนของการผลิตที่ข้อนาคลงมาก คือ พฤติกรรมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดตามกฎฟิสิกส์ ที่มักจะสมมติให้มีลักษณะที่ปกติของการไหล เช่น สมมติให้มีการไหลแบบราบเรียบ เป็นต้น การถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ดังเช่นเมื่อขนาดของช่องการไหลหรือเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครมีขนาดลดลง สัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรจะเพิ่มมากขึ้นและระยะทางเฉลี่ยของปริมาตรของไหลต่อผนังของถังปฏิกรณ์หรือต่อของไหลอีกชนิดหนึ่งจะลดลง เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่ผนังช่องการไหลหรือกับของไหลอีกชนิดเพิ่มมากขึ้นดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบเครื่องผสมขนาดทั่วไปกับขนาดไมโคร

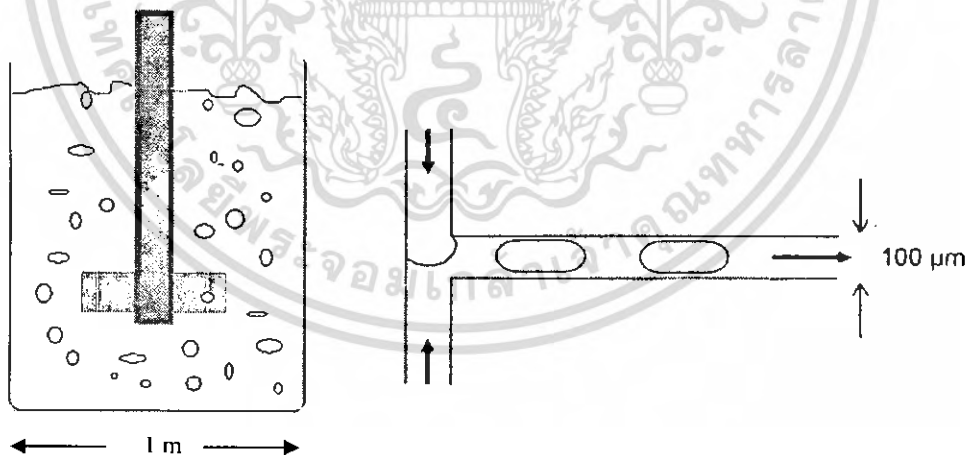
ตัวแปร	เครื่องผสมขนาดทั่วไป	เครื่องผสมระดับไมโคร
ความดัน	ต่ำ	สูง
เวลา (τ)	นาน	สั้น
การถ่ายเทความร้อนและมวล	ต่ำ	สูง
ความปลอดภัย	ต่ำ	สูง
ผลผลิตของผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพของกระบวนการ	ต่ำ	สูง
ของเสีย	สูง	ต่ำ
การซ่อมบำรุง	สะดวก	ลำบาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วเมื่อของไหลถูกทำในช่องว่างที่จำกัด ปรากฏการณ์สองชนิดที่เกิดขึ้น คือ ผลกระทบจากพื้นผิวและปริมาตร ตัวอย่างของผลกระทบจากพื้นผิวคือการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งแบบวิวิธพันธ์จะเกิดขึ้นที่ผนังของถัง ขณะที่การเคลื่อนที่ของของไหลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเป็นผลกระทบจากปริมาตร กล่าวโดยสรุปว่าผลจากพื้นผิวมีความสำคัญเปรียบเทียบกับผลของปริมาตรได้เมื่อขนาดของถังปฏิกรณ์ลดลง แต่การลดขนาดลงจะส่งผลให้ระยะทางการแพร่ลดลง พื้นผิวสัมผัสระหว่างของไหลและลำดับของความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

2.6.2 อิทธิพลของขนาดที่ลดลงเกี่ยวกับแรงของการเคลื่อนตัวของของไหล

ปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ระหว่างเทคโนโลยีแบบดั้งเดิมกับเทคโนโลยีระดับไมโครจะช่วยให้ในการเปรียบเทียบลักษณะกระบวนการได้ ในกระบวนการเทคโนโลยีแบบดั้งเดิม ถังปฏิกรณ์เป็นถังกวนที่ใช้สำหรับปฏิกิริยาระหว่างของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว เมื่อมีเป้าหมายเพื่อผสมก๊าซกับของเหลว ใบกวนจะมีที่พ่นก๊าซสำหรับทำให้เกิดฟองก๊าซ จากรูปที่ 2.2 แสดงภาพจำลองของถังกวนและเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร จากรูป 2.2 ข ซึ่งใช้ได้กับปฏิกิริยาระหว่างของเหลวกับของเหลว และของเหลวกับก๊าซขึ้นกับชนิดของสารป้อนเข้าที่ทางเข้าของเครื่องปฏิกรณ์ ในรูปชี้ให้เห็นการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซผ่านช่องการไหลเพื่อทำปฏิกิริยา ในทางตรงกันข้ามกับเทคโนโลยีแบบดั้งเดิมที่เป็นกระบวนการแบบกะแต่ในถังปฏิกรณ์ระดับไมโครเป็นการไหลแบบต่อเนื่อง



ก.

ข.

รูปที่ 2.2 ก. ถังกวนขนาดทั่วไป

ข. เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครรูปตัวที

โดยทั่วไปแล้วจะมีความแตกต่างของปรากฏการณ์การไหล การถ่ายเทความร้อนและมวลสารเกิดขึ้นมากมายในระหว่างปฏิริยาของของเหลวกับของเหลวหรือก๊าซกับของเหลว อย่างเช่น ในกรณีของปรากฏการณ์การไหลในสารละลายแต่ละวัฏภาคหรือระบบของอากาศกับน้ำ ซึ่งจุดประสงค์หลักก็คือการหากฎการเปลี่ยนขนาด (Scaling Laws) เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของอุปกรณ์กระบวนการ

สารที่ใช้ศึกษาที่เป็นวัฏภาคของเหลวคือน้ำ ที่สภาวะ 20 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ สำหรับวัฏภาคก๊าซจะเป็นอากาศภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยความเร็ว (Velocity Scale, u) เป็น 1 เมตรต่อวินาทีสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนและ 0.01 เมตรต่อวินาทีสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครเมตร ปริมาณสารที่นำมาวิเคราะห์จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของความยาว (L) ของเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองชนิด สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครมีค่าคงที่เท่ากับ 100 ไมครอน เมื่อน้ำและอากาศไหลมาผสมกันจะให้ความยาวอีกลักษณะหนึ่ง คือ ความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางพองอากาศ คุณลักษณะของเส้นผ่านศูนย์กลางพองอากาศของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนที่มีกำลังการกวนสูงสุดได้ขนาดประมาณ 500 ไมครอน ในขณะที่เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร โดยทั่วไปแล้วจะมีขนาดของพองอากาศเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหล

จากตารางที่ 2.2 แสดงกลุ่มตัวเลขไร้มิติที่บอกถึงลักษณะการไหลทั้งในเครื่องปฏิกรณ์ระดับมาโครและเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร มิติของรูปทรงเป็นความยาว L (1 เมตรและ 100 ไมครอน) การประมาณค่าของบอนด์นัมเบอร์ (Bond Number) จากตารางทั้งของเครื่องปฏิกรณ์ระดับมาโครและไมโครสามารถจะทิ้งแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแรงตึงผิว อย่างไรก็ตาม ฟรูดนัมเบอร์ (Froude Number) ซึ่งให้เห็นว่าแรงโน้มถ่วงมีอิทธิพลเหนือกว่าแรงเฉื่อย ซึ่งถ้านำบอนด์นัมเบอร์หารด้วยฟรูดนัมเบอร์จะได้ตัวเลขไร้มิติอีกตัว คือ เวเบอร์นัมเบอร์ (Weber Number) เพราะฉะนั้นสำหรับช่วงการไหลของก๊าซกับของเหลวจะมีแรงตึงผิวแรงโน้มถ่วง และแรงเฉื่อยเหมือนกันของเครื่องปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิด ส่วนแรงหนืด (Viscous Force) แสดงในแคปิลลารีนัมเบอร์ (Capillary Number) ซึ่งมีความสำคัญเช่นเดียวกันกับแรงโน้มถ่วงในเครื่องปฏิกรณ์

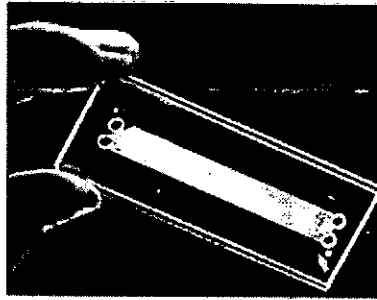
ความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนและเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครก็คือค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างแรงเฉื่อยกับแรงหนืด เรย์โนลด์นัมเบอร์เป็นกลุ่มตัวเลขไร้มิติที่ใช้ได้ทั้งการไหลของสารวัฏภาคเดียวและสองวัฏภาค ในเครื่องปฏิกรณ์ระดับมาโคร แรงหนืดสามารถจะทิ้งได้เมื่อเปรียบเทียบกับแรงเฉื่อยแต่ไม่ใช่ในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร ซึ่งการไหลในอุปกรณ์ระดับมาโครส่วนใหญ่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนขณะที่การไหลในอุปกรณ์ระดับไมโครจะเป็นแบบราบเรียบ

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบกลุ่มตัวเลขไร้นิติระหว่างภายในเครื่องปฏิกรณ์ระบบมาโคร และระบบไมโคร [3]

Name	Formula	Physical interpretation	Typical macro value	Typical micro value	Comments
Bond number	$Bo = \frac{(\rho_l - \rho_g)L^2g}{\sigma}$	$\frac{\text{gravitational force}}{\text{surface-tension force}}$	3×10^{-2}	1×10^{-3}	Relevant for bubble (droplet) flows. Length scale: bubble diameter
Capillary number	$Ca = \frac{\mu u}{\sigma}$	$\frac{\text{viscous force}}{\text{surface-tension force}}$	1×10^{-2}	1×10^{-4}	Relevant for bubble (droplet) flows
Froude number	$Fr = \frac{\rho_g u^2}{(\rho_l - \rho_g)gL}$	$\frac{\text{inertial force}}{\text{gravitational force}}$	2×10^{-1}	1×10^{-4}	Relevant for bubble (droplet) flows. Length scale: bubble diameter
Reynolds number	$Re = \frac{\rho Lu}{\mu}$	$\frac{\text{inertial force}}{\text{viscous force}}$	1×10^6	1	
Weber number	$We = \frac{\rho_g Lu^2}{\sigma}$	$\frac{\text{inertial force}}{\text{surface-tension force}}$	8×10^{-3}	2×10^{-7}	Relevant for bubble (droplet) flows. Length scale: bubble diameter

2.7 การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพกับไมโครเทคโนโลยี

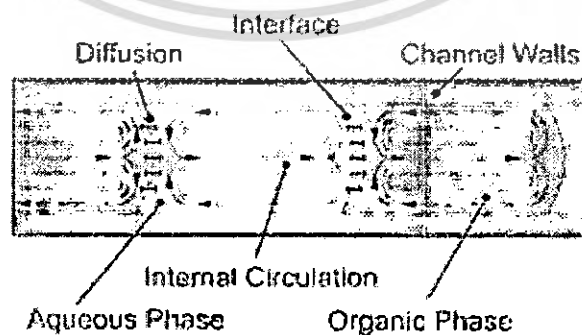
การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันกับแอลกอฮอล์โดยปกติทั่วไปแล้วจะต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากปกติแล้วสารที่มีความหนืดสูง (น้ำมัน) กับสารที่มีความหนืดต่ำ (แอลกอฮอล์) จะมีการผสมและปฏิกิริยากันได้ไม่ดีจึงต้องมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไป การเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยานี้เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลงจะต้องมีการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจึงจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้บริสุทธิ์ ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่าย



รูปที่ 2.3 การ์ดผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพของ ONAMI [4]

เมื่อเร็ว ๆ นี้ Oregon Nanoscience and Microtechnologies Institute (ONAMI) ปี พ.ศ. 2549 [4] คิดค้นนวัตกรรมใหม่แห่งการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพแบบเอสเทอร์ที่มีส่วนผสมระหว่าง แอลกอฮอล์และน้ำมันพืชได้โดยตรง รวดเร็วและง่าย ด้วยเทคโนโลยีที่เรียกว่าการ์ดน้ำมันดีเซลชีวภาพ (Biodiesel Microreactor) การ์ดผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพนี้มีขนาดเท่าบัตรเครดิต ประกอบด้วยช่องเล็ก ๆ ขนาดเล็กกว่าเส้นผมคนเรียงขนานกัน โดยป้อนน้ำมันพืชและแอลกอฮอล์ ให้ไหลผ่านอย่างต่อเนื่องเข้าการ์ดผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ซึ่งจะช่วยตัดขั้นตอนกระบวนการแปร รูปทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน ที่มีความยุ่งยากและมีต้นทุนสูงกว่าวิธีผลิตแบบเดิม ๆ และหากนำการ์ดนี้มาเรียงขนานกันโดยจัดให้มีขนาดเท่ากับกระเป๋าเดินทางขนาดย่อม ๆ ก็จะสามารถผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้มากถึงปีละนับแสนแกลลอน

จากที่ทราบแล้วว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน ในเทคนิคแบบดั้งเดิมได้ใช้กำลังงานช่วยในการผสมระหว่างเฟสโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร ใช้การลดระยะทางการแพร่ลงและทำให้เกิดการพาและการแพร่ขึ้นในช่องปฏิกรณ์ กลไกการพาและการแพร่ที่เกิดขึ้นในช่องปฏิกรณ์ (Reactor Channel) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กลไกการเคลื่อนที่และการแพร่ของของไหลในท่อระดับไมโคร [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4 แสดงกลไกการพาและการแพร่ที่เกิดขึ้นในช่องปฏิกรณ์ โดยจากรูปเป็นสารสองชนิดที่เป็นสารละลายกับสารอินทรีย์ซึ่งไม่ละลายซึ่งกันและกัน ของเหลวทั้งสองชนิดนี้จะไหลสลับกันเป็นช่วง ๆ ตามช่องการไหลและไหลจากซ้ายไปขวา ในขณะที่ของเหลวไหลนั้นบริเวณผิวสัมผัสของของเหลวทั้งสองชนิดจะมีการแพร่เกิดขึ้น และภายในแต่ละวัฏภาคเองจะเกิดการหมุนเวียนสารจากผิวด้านนอกเข้ามาด้านในตัวของสารเองทำให้เกิดการพาสารอีกชนิดหนึ่งที่แพร่เข้ามายังด้านในอีกวัฏภาคได้

เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครมีหลายชนิดและสามารถช่วยแก้ปัญหาความหนืดสูงในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้ โดยอาศัยข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร คือ ระยะเวลาของการถ่ายเทมวลสัณลง และพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสูงขึ้น ได้การผสมที่รวดเร็วโดยปราศจากการแยกกระจายตัวออก การไหลในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) เกิดความดันลดน้อยถ้าเป็นท่อเรียบ และสามารถควบคุมอุณหภูมิ ความดันง่าย ที่สำคัญเกิดของเสียหรือได้ผลิตภัณฑ์ต่ำกว่ามาตรฐานน้อยลง แต่ได้ผลผลิตสูงขึ้น

2.8 การแพร่ในระบบของเหลว 2 ชนิด

เนื่องจากโมเลกุลของของเหลวจะอยู่ใกล้ชิดกันมากกว่าก๊าซ ความหนาแน่นและความต้านทานในการแพร่ของของเหลวจึงมากกว่าด้วย ในการแพร่ในของเหลวจึงมีความแตกต่างสำคัญจากก๊าซก็คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusivity Coefficient) ส่วนมากจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่แพร่ ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สามารถหาได้จากสมการที่ (2.3) [6]

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของเหลว 2 ชนิดที่ Infinite Dilution

สำหรับของผสม 2 ชนิดที่สาร A เป็นสารถูกละลาย และสาร B เป็นตัวทำละลาย สัมประสิทธิ์การแพร่ D_{AB} ของสาร A ในสารละลายเจือจางโดยวิธีคำนวณค่า D_{AB} นั้น สมมติฐานว่าความเข้มข้นของสาร A อยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล โดยในงานวิจัยนี้ กรดออกทาลอนิกจะเป็นตัวถูกละลายและเมทานอลเป็นตัวทำละลาย

การประมาณค่าโดยวิธีของ Wilke-Chang

$$D_{AB} = \frac{7.4 \times 10^{-8} (\phi M_B)^{1/2} T}{\eta_B V_A^{0.6}} \quad (2.3)$$

- เมื่อ D_{AB} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวถูกละลาย A ที่ความเข้มข้นในสารละลาย B (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
- M_B คือ มวลโมเลกุลของสารทำละลาย B (กรัมต่อ โมล)
- T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)
- η_B คือ ความหนืดของตัวทำละลาย (เซนติพอยส์)
- V_A คือ ปริมาตรของตัวถูกละลาย A ใน 1 โมลที่จุดเดือดปกติ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ โมล)
- ϕ คือ Association factor ของตัวทำละลาย (-)

Wilke-Chang แนะนำค่า $\phi_{\text{water}} = 2.6$ $\phi_{\text{methanol}} = 1.9$ $\phi_{\text{ethanol}} = 1.5$ เป็นต้น

การประมาณค่าโดยวิธี Tyn-Calus

$$D_{AB} = 8.93 \times 10^{-8} \left(\frac{V_A}{V_B} \right)^{1/6} \left(\frac{P_B}{P_A} \right)^{0.6} \frac{T}{\eta_B} \quad (2.4)$$

- เมื่อ V_B คือ ปริมาตรของตัวถูกละลาย B ใน 1 โมลที่จุดเดือดปกติ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ โมล)
- P_A, P_B คือ พาราชอร์ (Parachors)

ข้อจำกัดของวิธีนี้

1. ไม่ควรใช้กับค่าความหนืดที่สูงเกิน 20-30 เซนติพอยส์ (ขึ้นกับสารตัวทำละลาย) ถ้าตัวทำละลายเป็นน้ำ (ค่าไคเมอร์ของ V_B, P_B จะถูกนำมาใช้) $V_A = V_w = 37.4$ มีหน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล และ $P_A = P_w = 105.2 \text{ cm}^3 \text{ g}^{1/4} / \text{s}^{1/2} \cdot \text{mol}$
2. ถ้าตัวถูกละลายเป็นกรดอินทรีย์ และตัวทำละลายเป็นตัวอื่นที่ไม่ใช่น้ำ เมทานอลหรือ บิวทานอล กรดอินทรีย์จะถูกพิจารณาเป็น 2 เท่าของค่าไคเมอร์ของ V_A และ P_A

2.8.1 การแพร่สวนทางกันแบบโมลเท่ากัน (Equimolar counterdiffusion) [7] เริ่มจาก สมการทั่วไปหรือกฎของฟิคส์ (Fick's law) ดังสมการที่ 2.5

$$N_i = -cD_{im} \nabla x_i + x_i \sum_{j=1}^n N_j \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับระบบของเหลว 2 ชนิดจะได้

$$N_A = -cD_{AB} \frac{dx_A}{dz} + \frac{c_A}{c}(N_A + N_B) \quad (2.6)$$

- เมื่อ N_A คือ ฟลักซ์ของสาร A (โมล A ต่อพื้นที่ต่อเวลา)
 D_{AB} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (พื้นที่ต่อเวลา)
 c คือ ความเข้มข้นรวมสาร A และ B (โมลต่อปริมาตร)
 z คือ ระยะทางทิศทาง z
 x_A คือ สัดส่วนโดยโมลของสาร A
 c_A คือ ความเข้มข้นของสาร A (โมล A ต่อปริมาตร)
 N_B คือ ฟลักซ์ของสาร B (โมล B ต่อพื้นที่ต่อเวลา)

จากสมการที่ 2.6 สำหรับการแพร่สวนทางกันแบบโมลเท่ากัน นั่นคือ $N_A = -N_B$ และหาปริพันธ์จะได้

$$N_A = \frac{D_{AB}(c_{A1} - c_{A2})}{z_2 - z_1} = \frac{D_{AB}c_{av}(x_{A1} - x_{A2})}{z_2 - z_1} \quad (2.7)$$

โดย $c_{av} = \left(\frac{\rho}{M}\right)_{av} = \left(\frac{\rho_1}{M_1} + \frac{\rho_2}{M_2}\right) / 2 \quad (2.8)$

- เมื่อ c_{av} คือ ความเข้มข้นทั้งหมดเฉลี่ยของสาร A รวม B (โมลต่อปริมาตร)
 M_1 คือ มวลโมเลกุลเฉลี่ยของสารละลายที่จุด 1 (มวลสารต่อปริมาตร)
 ρ_1 คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของสารละลายที่จุด 1 (มวลต่อปริมาตร)

สมการ (2.7) จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ย นั่นก็คือ เมื่อความเข้มข้นมีการเปลี่ยนแปลง และมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยดังสมการ (2.8)

2.8.2 การแพร่ของสาร A ผ่านสาร B ที่ไม่มีการแพร่ [7]

กรณีสำคัญในการแพร่ของของเหลว คือ ตัวถูกละลาย A แพร่ในตัวทำละลาย B ที่ไม่มีการแพร่หรืออยู่นิ่ง (Stagnant) นั่นก็คือ $N_A = 0$ จากสมการ (2.6) จะได้

$$N_A = -cD_{AB} \frac{dx_A}{dz} + \frac{c_A}{c}(N_A + 0) \quad (2.9)$$

จัดรูปสมการ (2.9) และหาปริพันธ์จะได้สมการสำหรับของเหลวที่สภาวะคงตัว ดังนี้

$$N_A = \frac{D_{AB} c_{av}}{(z_2 - z_1) x_{BM}} (x_{A1} - x_{A2}) \quad (2.10)$$

เมื่อ
$$x_{BM} = \frac{x_{B2} - x_{B1}}{\ln(x_{B2} / x_{B1})} \quad (2.11)$$

โดยที่ $x_{A1} + x_{B1} = x_{A2} + x_{B2} = 1$ และสำหรับสารละลายเจือจาง ค่า x_{BM} จะมีค่าเข้าใกล้ 1 และ c จะเป็นค่าคงที่ สมการ (2.10) ลดรูปเป็นสมการอย่างง่ายได้ดังนี้

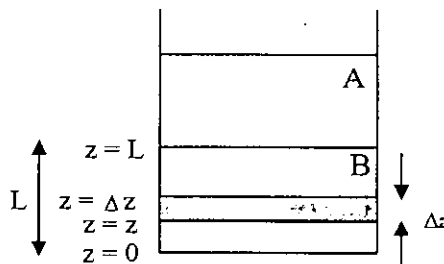
$$N_A = \frac{D_{AB} (c_{A1} - c_{A2})}{(z_2 - z_1)} \quad (2.12)$$

2.9 การแพร่ที่เกิดปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ [8]

การทำดุลมวลสารในที่นี้จะเป็นระบบดังแสดงดังรูปที่ 2.5 โดยของเหลว A จะแพร่เข้าไปในของเหลว B ที่ด้านล่างของบีกเกอร์ สาร A และเกิดปฏิกิริยาเอกพันธ์อันดับหนึ่ง คือ $A + B \rightarrow AB$ โดยสมมติฐานว่าปริมาณของ AB น้อยมาก จึงให้สมมติให้เป็นระบบของเหลว 2 ชนิด (Pseudobinary) การดุลมวลสารของเหลว A ในปริมาตรหนา Δz ของของเหลว B ได้ดังนี้

$$N_{Az} \Big|_z - N_{Az} \Big|_{z+\Delta z} - S - kc_A \Delta z = 0 \quad (2.13)$$

- เมื่อ N_{Az} คือ ฟลักซ์ของสาร A ในทิศทาง z (โมล A ต่อพื้นที่ต่อเวลา)
- S คือ พื้นที่หน้าตัดของของเหลว
- kc_A คือ โมลของสาร A ที่เกิดปฏิกิริยาต่อหน่วยปริมาตรต่อเวลา



รูปที่ 2.5 แผนภาพการแพร่ที่เกิดปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นหารสมการ (2.13) ด้วยปริมาตร $S\Delta z$ และให้ Δz เข้าใกล้ศูนย์ จะได้สมการเป็น

$$\frac{dN_{Az}}{dz} + kc_A = 0 \quad (2.14)$$

ถ้าความเข้มข้นของสาร A ดำ ดังนั้นกฎของฟิกส์ สมการ (2.6) จะได้เป็น

$$N_{Az} = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz} \quad (2.15)$$

แทนสมการ (2.15) ลงในสมการ (2.14) ได้

$$D_{AB} \frac{d^2c_A}{dz^2} - kc_A = 0 \quad (2.16)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการแก้สมการ (2.16) ดังนี้

$$\text{เงื่อนไขขอบเขตที่ 1} \quad \text{ที่ } z = 0 \quad c_A = c_{A0} \quad (2.17)$$

$$\text{เงื่อนไขขอบเขตที่ 2} \quad \text{ที่ } z = L \quad c_A = 0 \quad (2.18)$$

เมื่อหาคำตอบปริพันธ์ของสมการ (2.16) และหาค่าคงที่สมการจากเงื่อนไขขอบเขต จะได้สมการความเข้มข้นของสาร A ที่ระยะทางจากผิวสัมผัสต่าง ๆ ดังนี้

$$\frac{c_A}{c_{A0}} = \cosh \sqrt{\frac{k}{D_{AB}}} z - \left(\sinh \sqrt{\frac{k}{D_{AB}}} z / \tanh \sqrt{\frac{k}{D_{AB}}} L \right) \quad (2.19)$$

2.10 สมดุลปฏิกิริยาเคมี [8]

เมื่อมีปฏิกิริยาเกิดขึ้น การหาค่าสมดุลปฏิกิริยาเคมีที่ไม่มีข้อมูลทางอุณหพลศาสตร์อาจวิเคราะห์ได้จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เช่นเดียวกับการหาค่าความร้อนของปฏิกิริยา

การทำนายร้อยละการแปลงผันที่จุดสมดุลจะอาศัยค่าพลังงานอิสระมาตรฐานในทางอุณหพลศาสตร์ เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นถึงจุดสมดุล อุณหภูมิและความดันของระบบคงที่ และพลังงานอิสระ (Free Energy, ΔG) ไม่เปลี่ยนแปลงหรือเท่ากับศูนย์ ภายใต้สภาวะเช่นนี้สามารถหา

72901

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (ΔG°) กับค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant, K) [8] ได้ดังนี้

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad (2.20)$$

ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ซึ่งหมายถึงที่อุณหภูมิหนึ่งจะมีค่าคงที่สมดุลค่าหนึ่งเป็นค่าเฉพาะของปฏิกิริยานั้นๆ โดยที่การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (ΔG°) เป็นค่าความแตกต่างของพลังงานอิสระระหว่างผลิตภัณฑ์กับสารทำปฏิกิริยาซึ่งอยู่ในสภาวะมาตรฐาน

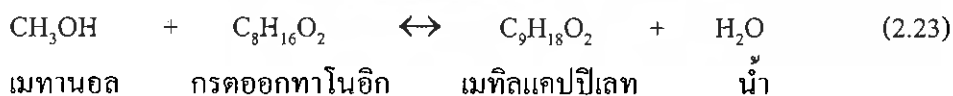
ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



สมมติฐานว่าระบบของปฏิกิริยาสมการ (2.21) นี้เป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบอุดมคติ (Ideal System) ค่า K สามารถคำนวณได้จากความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ดังนี้

$$K = \frac{C_C^c C_D^d}{C_A^a C_B^b} \quad (2.22)$$

ดังนั้นการหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดคาร์บอกซิลิกกับแอลกอฮอล์ในกรณีเมทานอลทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับกรดออกทานอิก สามารถคำนวณได้จากความเข้มข้น ณ จุดสมดุล (Equilibrium Concentration) โดยจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในสมการ (2.23) นี้มีสัมประสิทธิ์ a, b, c, d มีค่าเท่ากับ 1 จะได้สมการค่า K ดังสมการ (2.24)



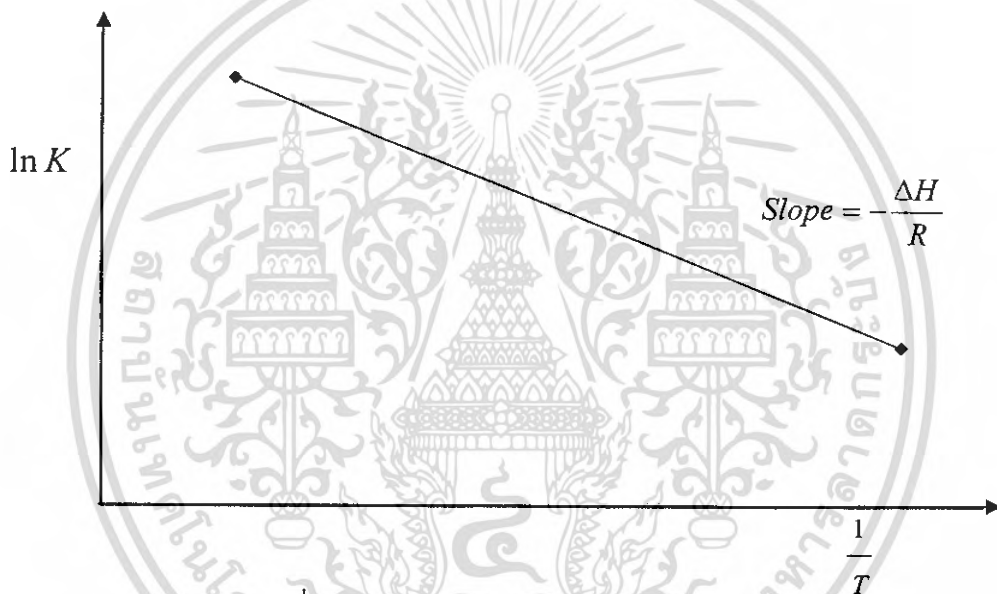
$$K = \frac{C_C C_D}{C_A C_B} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐานของปฏิกิริยา i ในกรณีที่มีหลายปฏิกิริยา ที่ความดันคงที่นั้น ได้จากความสัมพันธ์ทางอุณหพลศาสตร์ $d(\Delta G_i^\circ / R) / dT = -\Delta H_i^\circ / RT^2$ ซึ่งเมื่อนำมารวมกับสมการ (2.20) จะทำให้ได้ผลดังสมการ (2.25) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้หาค่าความร้อนของปฏิกิริยา (Heat of Reaction)

$$\frac{d(\ln K_i)}{dT} = \frac{\Delta H_i^\circ}{RT^2} ; i = 1, 2, 3, \dots, q \quad (2.25)$$

เมื่อทำการทดลองหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ จะสามารถหาค่าความร้อนของปฏิกิริยาต่างๆ ได้จากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K$ กับ $1/T$ ดังนี้



รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K$ กับ $1/T$

2.11 การหาร้อยละการแปลงผันที่เกิดขึ้น ณ สถานะสมดุล (Equilibrium Conversion)

การตอบคำถามว่า สาร A ในสมการปริมาณสัมพันธ์ (2.21) ทำปฏิกิริยาไปเท่าไรนั้นร้อยละการแปลงผันเป็นตัวแปรที่ใช้ในการชี้บ่งได้ [8]

นิยามของร้อยละการแปลงผันของสาร A (x_A) ในเครื่องปฏิกรณ์คือ

$$x_A = \text{จำนวน โมลของสาร A ที่ทำปฏิกิริยาไป} / \text{จำนวน โมลของสาร A ที่ป้อน}$$

$$\text{หรือ } x_A = (n_{A0} - n_A) / (n_{A0}) \quad (2.26)$$

เพราะฉะนั้นจำนวน โมลของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจึงเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_{product} = x_A n_{A0} \quad (2.27)$$

เมื่อ n_{A0} หมายถึง จำนวนโมลของสาร A ที่เวลาเริ่มต้น

n_A หมายถึง จำนวนโมลของสาร A ที่เวลาใดๆ

กลับมากพิจารณาสมการ (2.24)

$$K = \frac{C_C C_D}{C_A C_B}$$

$$K = \frac{\frac{n_C}{V} \frac{n_D}{V}}{\frac{n_A}{V} \frac{n_B}{V}}$$

เมื่อปริมาตร V คงที่ จะได้

$$K = \frac{n_C n_D}{n_A n_B} \quad (2.28)$$

นำสมการ (2.28) คูณด้วย $\left(\frac{n_T}{n_T}\right)^2$;

$$K = \frac{n_C n_D}{n_A n_B} \times \left(\frac{n_T}{n_T}\right)^2$$

$$K = \frac{y_C y_D}{y_A y_B} \quad (2.29)$$

เมื่อ y_i คือ สัดส่วนโดยโมลของสาร i มีค่าเท่ากับ n_i / n_T

n_T คือ จำนวน โมลรวม

ดังนั้นในสมการ (2.26) ถ้านำ คูณด้วย n_T / n_T จะได้ว่าร้อยละการแปลงผันเป็น

$$x = \frac{y_{i0} - y_i}{y_{i0}} \quad (2.30)$$

โดยค่าร้อยละการแปลงผันที่คำนวณได้จะเป็นตัวบอกระดับความสมบูรณ์ (Degree of Completion) ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 การคำนวณค่าความหนืดของของเหลวที่ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิ [6]

ความหนืดของของเหลวจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไม่ว่าจะอยู่ภายใต้สภาวะที่ความดันคงที่หรือขณะที่เป็นของเหลวอิมิตัว การคำนวณจะใช้สมการ (2.31)

$$\eta_L^{-0.2661} = \eta_K^{-0.2661} + \frac{T - T_K}{233} \quad (2.31)$$

กำหนด η_L คือ ความหนืดของของเหลวที่อุณหภูมิ T (เซนติพอยส์)

η_K คือ ค่าความหนืดของของเหลวที่รู้ค่าที่อุณหภูมิ T_K (เซนติพอยส์)

หน่วยของอุณหภูมิใช้เป็นองศาเซลเซียสหรือเคลวินก็ได้ ในสมการ (2.31) มีเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดประมาณ 5-15 % วิธีนี้ไม่ควรใช้กับสภาวะที่อุณหภูมิเกินจุดเดือดปกติมากเกินไป



บทที่ 3

การทดลอง

การทดลองของโครงการวิจัยนี้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของสารที่มีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันในช่องการไหลระดับไมโครและความเป็นไปได้ของการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร โดยการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การศึกษาพฤติกรรมของการไหลในท่อเล็ก

การทดลองนี้ศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.67 มิลลิเมตรของสารที่มีความหนืดแตกต่างกัน คือ น้ำและพาราฟินส์เหลว ซึ่งพาราฟินส์เหลวจะมีความหนืดมากกว่าน้ำ 180 เท่า โดยการทดลองดังนี้

3.1.1 สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. พาราฟินส์เหลว
3. โพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลต

3.1.2 อุปกรณ์การทดลอง

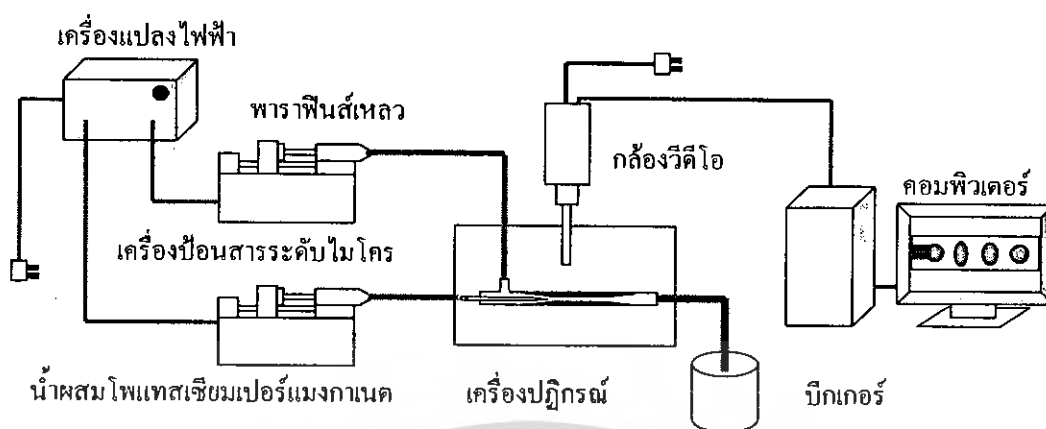
1. กระจกตวง (Graduated Cylinder)
2. บีกเกอร์ (Beaker)
3. หลอดฉีดยา (Syringe)
4. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask)
5. สายยาง
6. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า (Analytical Balance)
7. ชุดแบบจำลองการไหลในท่อแคบระดับไมโคร
8. กล้องวิดีโอ GANZ ZC-Y11PH3 พร้อมฐานตั้งกล้อง
9. เครื่องป้อนสารระดับไมโคร (Microfeeder) และเครื่องแปลงไฟฟ้า
10. คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม TVR สำหรับประมวลผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 วิธีการทดลอง

การทดลองนี้ศึกษาถึงพฤติกรรมของการไหลในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.67 มิลลิเมตรของน้ำและพาราฟินส์เหลว ดังนี้

1. การเตรียมสารเคมี แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ
 - น้ำผสมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดย 0.1 กรัมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในน้ำ 220 มิลลิลิตร
 - พาราฟินส์เหลวปริมาณ 100 มิลลิลิตร
2. นำสารเคมีที่เตรียมไว้ทั้ง 2 ส่วนมาบรรจุลงในหลอดฉีดขนาด 10 มิลลิลิตรและไล่ฟองอากาศออก นำไปวางที่เครื่องป้อนสาร (Microfeeder) โดยน้ำที่ผสมกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจะต่อกับสายยางที่ต่อกับท่อเล็ก ส่วนพาราฟินส์เหลวจะต่อเข้าสายยางที่ต่อกับท่อใหญ่ของเครื่องผสม
3. จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.1 พร้อมเปิดเครื่องป้อนสาร กล้องวิดีโอและโปรแกรม TVR ที่แสดงภาพการผสมในเครื่องคอมพิวเตอร์ ปรับโฟกัสของกล้องวิดีโอให้เห็นภาพการไหลที่ชัดเจน
4. ตั้งค่าอัตราการไหลของเครื่องป้อนสารทั้งสองอัน ประมาณ 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงเพื่อไล่ฟองอากาศออกจากสายยางและเครื่องผสม จากนั้นลดอัตราการไหลลงเรื่อย ๆ จนถึง 10 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
5. ตั้งค่าอัตราการไหลของเครื่องป้อนสารของพาราฟินส์เหลว 9.9 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงและของน้ำผสมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จากนั้นรอให้เข้าสู่สภาวะคงตัวโดยใช้เวลาประมาณ 5 นาที
6. จับภาพการไหลจากกล้องวิดีโอ และถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของหยดน้ำ 10 ภาพ สังเกตและวัดขนาดของอนุภาคหยดน้ำ
7. เปลี่ยนค่าอัตราการไหลของน้ำผสมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็น 1.9 3.2 4.4 และ 6.3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จากนั้นจึงเปลี่ยนอัตราการไหลของพาราฟินส์เหลวเป็น 19.7 29.6 39.5 และ 49.4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพต่อไป



รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์การทดลองพฤติกรรมกรไหล

3.2 การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร

การทดลองนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของออกทานอิกและเมทานอลโดยไมใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

3.2.1 สารเคมี

1. เมทานอล เกรดวิเคราะห์ (Methanol: AR Grade)
2. กรดออกทานอิก (Octanoic Acid)
3. เมทิลแคปรีเลท (Methyl Caprylate)
4. อะซิโตน (Acetone: HPLC Grade)
5. อะซิโตนไนไตรล์ (Acetonitrile: HPLC Grade)
6. น้ำ (HPLC Grade)

3.2.2 อุปกรณ์การทดลอง

1. กระบอกตวง (Graduated Cylinder)
2. ปิเปตพร้อมลูกยางแดง (Pipette & Bulb)
3. บีกเกอร์ (Beaker)
4. หลอดฉีดยา (Syringe)
5. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask)
6. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask)
7. สายยาง
8. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

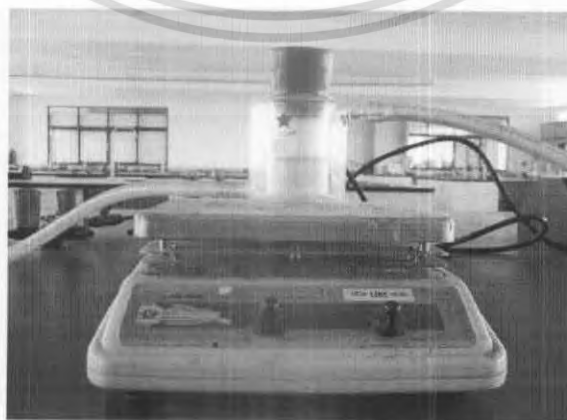
ตารางที่ 3.1 อัตราการไหลของเมทานอลและกรดออกทานอิกที่เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา เอสเทอร์ฟิเคชัน

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)		อัตราส่วน โดยปริมาตร
กรดออกทานอิก	เมทานอล	
3	3	1 : 1
	6	1 : 2
	12	1 : 4

ในการทดลองข้างต้นจะได้อัตราส่วนระหว่างกรดออกทานอิกกับเมทานอลที่เหมาะสม นั่นคือค่าร้อยละการแปลงผันเทียบกับกรดออกทานอิกมีค่าสูงสุด จากนั้นทำการทดลองที่อัตราส่วนดังกล่าวเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันนี้ โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็น 40 50 และ 60 °ซ และนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับ



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์การทดลองการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์การทดลองการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบกะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

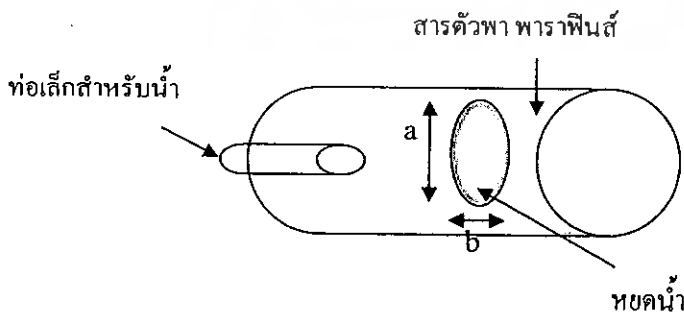
ผลการทดลองและการอภิปรายผลนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัย โดยการทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะของหยดน้ำในพาราฟินส์เหลวที่เป็นตัวพาหยดน้ำเคลื่อนที่ ซึ่งการทดลองนี้จะใช้ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เป็นตัวบ่งบอกถึงความเร็วของสารดังกล่าว และการศึกษาความเป็นไปได้ของการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์พีเคชันของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครแบบไหลตามกัน ซึ่งตารางข้อมูลดิบ การคำนวณเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ และรูปต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวก

4.1 ผลของค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่อพฤติกรรมการไหล

จากการศึกษาการไหลในท่อแคบในรูปที่ 4.1 นำผสมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพื่อให้สังเกตหยดน้ำได้ชัดเจนและสมมติให้มีคุณสมบัติเหมือนน้ำบริสุทธิ์ซึ่งไหลในท่อเล็กและพาราฟินส์เหลวในท่อใหญ่ การคำนวณค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของน้ำ (Re_w) และพาราฟินส์เหลว (Re_p) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1)

$$Re = \frac{\rho dv}{\mu} \quad (4.1)$$

เมื่อ	Re	คือ	ตัวแปรไร้มิติหน่วยเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์
	ρ	คือ	ความหนาแน่น (น้ำหนักต่อปริมาตร)
	d	คือ	คุณลักษณะความยาว ในที่นี้คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของช่องการไหล
	v	คือ	อัตราเร็ว (ระยะทางต่อเวลา)
	μ	คือ	ความหนืดไดนามิกส์



รูปที่ 4.1 การกำหนดขนาดของหยดน้ำ

นิยาม ให้ค่า b/a คือค่า Aspect Ratio

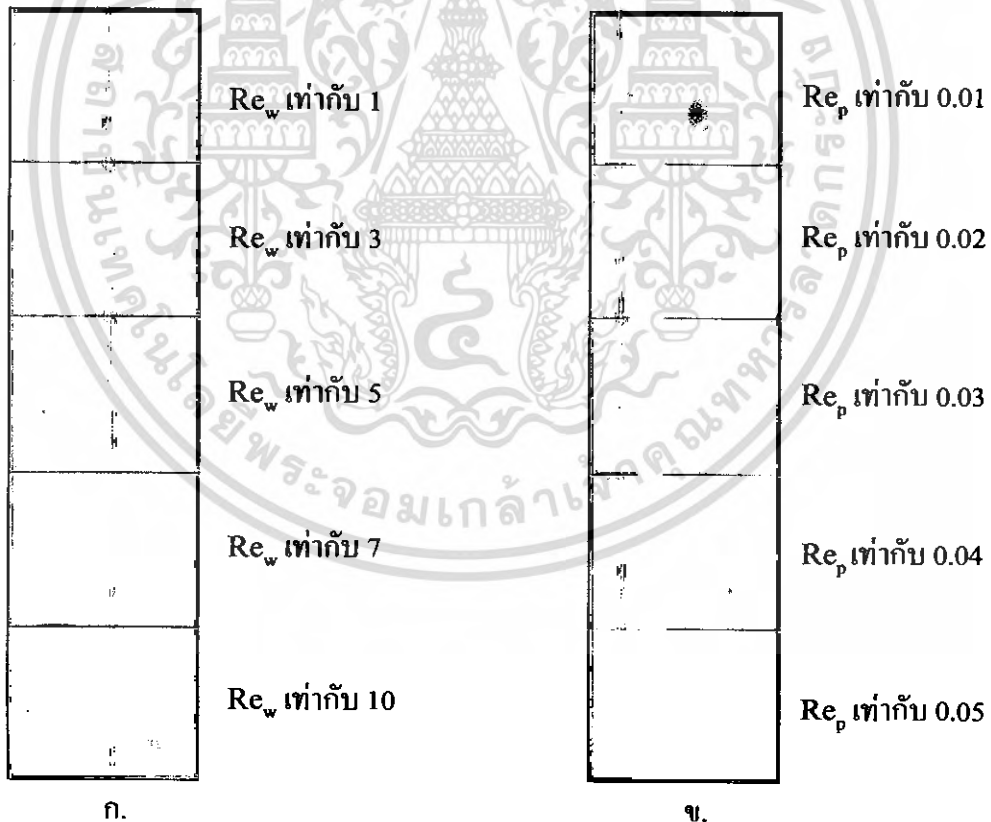
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติที่ใช้ในการคำนวณค่า Re ของสารต่าง ๆ

คุณสมบัติ	พาราฟินส์เหลว	น้ำ
ความหนาแน่น (ρ , kg/m^3)	860	998.000
ความหนืดทางไดนามิกส์ (μ , g/(m.s))	180	1.002

หมายเหตุ อ้างอิงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ

การหา Re_w นี้จะกำหนดค่าคุณลักษณะความยาวเป็นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของช่องการไหลเล็ก (ท่อแคปิลารีที่ใช้ป้อนน้ำ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.222 เซนติเมตรที่หน้าตัดทางออก คิดเป็นพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 3.872×10^{-2} ตารางเซนติเมตร และการหา Re_p จะคำนวณเช่นเดียวกับน้ำ โดยมีสมมติฐาน คือ ภายในท่อใหญ่มีแต่พาราฟินส์เหลวไหลอยู่เท่านั้น และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อใหญ่เท่ากับ 1.667 เซนติเมตร คิดเป็นพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 2.183×10^{-2} ตารางเซนติเมตร ดังนั้นค่า Re จึงขึ้นกับการปรับเปลี่ยนความเร็วของการไหล โดยกำหนดให้ค่า Re_w และ Re_p อยู่ในช่วง 1 ถึง 10 และ 0.01 ถึง 0.05 ตามลำดับ



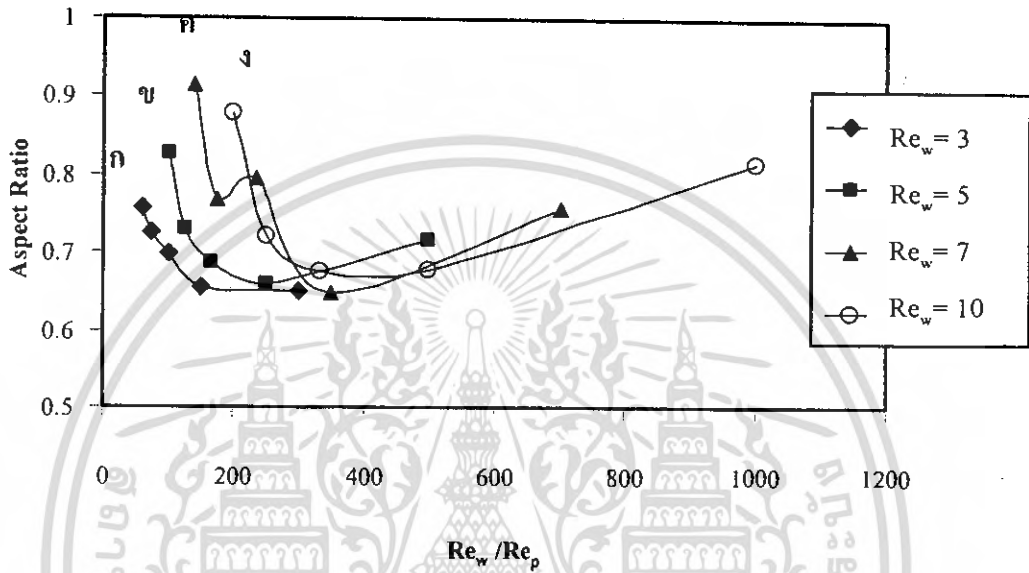
รูปที่ 4.2 รูปร่างของหยดน้ำ (จุดสีม่วง) โดยมีพาราฟินส์เหลวอยู่ด้านนอก

รูป ก. Re_p คงที่เท่ากับ 0.02 และที่ Re_w ต่าง ๆ กัน

รูป ข. Re_w คงที่เท่ากับ 5 และที่ Re_p ต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปร่างของหยดน้ำในรูปที่ 4.2 เป็นผลการสังเกตลักษณะหยดน้ำในท่อแคบโดยกล้องวิดีโอ เมื่อ Re_p คงที่เท่ากับ 0.02 และปรับเปลี่ยน Re_w ตั้งแต่ 1 ถึง 10 ดังรูป 4.2 ก. จะเห็นว่าขนาดของหยดน้ำจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อให้ Re_w คงที่เท่ากับ 5 และปรับเปลี่ยน Re_p ตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.05 จะมีขนาดของหยดน้ำลดลง ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดต่อไป

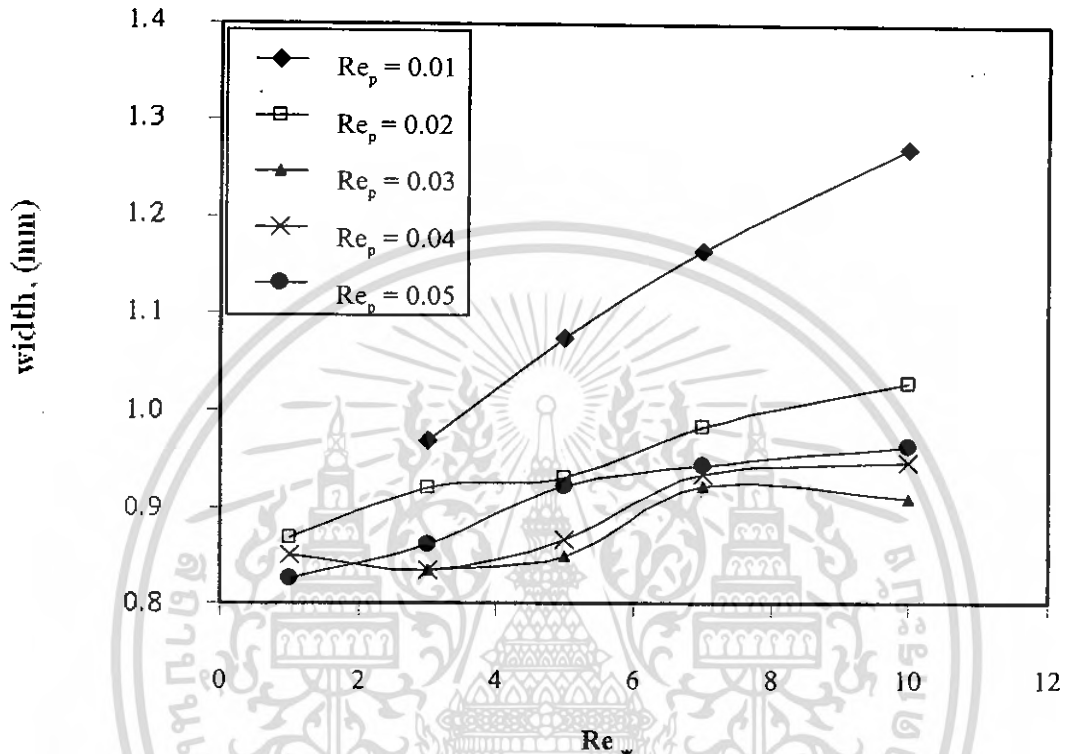


รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Re_w และ Re_p กับค่า Aspect Ratio

ผลของการปรับเปลี่ยน Re ที่มีต่อลักษณะของหยดน้ำแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re_p กับค่า Aspect Ratio โดยแต่ละเส้นกราฟกำหนดให้ Re_w คงที่และมีค่าอยู่ในช่วง 3 ถึง 10 และปรับเปลี่ยน Re_p ในช่วง 0.01 ถึง 0.05 ในการทดลองอัตราส่วนเรย์โนลด์ นัมเบอร์ครอบคลุมค่าตั้งแต่ 60 ถึง 1,000 เส้นกราฟทั้งสี่มีลักษณะเหมือนกันแบบเส้นโค้งหงาย เส้นกราฟทั้งหมดนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือเส้นที่ค่า Aspect Ratio ลดลงแล้วมีแนวโน้มคงที่เมื่ออัตราส่วนระหว่าง Re_w ต่อ Re_p มากขึ้น (เส้นกราฟ ก) กับเส้นที่ค่า Aspect Ratio ลดลงแล้วมีแนวโน้มให้ค่า Aspect Ratio สูงขึ้น (เส้นกราฟ ข ค และ ง) จากการพิจารณาที่จุดต่ำสุดของเส้นกราฟแต่ละเส้นเป็นจุดอ้างอิงนั้น เมื่อเพิ่ม Re_p หรือลดค่าอัตราส่วนเรย์โนลด์นัมเบอร์ของสาร 2 ชนิดค่า Aspect Ratio จะเข้าใกล้ 1 ซึ่งหมายถึงอนุภาคหยดน้ำมีความเป็นทรงกลมมากขึ้น เนื่องจากทรงกลมจะเป็นลักษณะที่มีเสถียรภาพ เพราะเมื่ออนุภาคเป็นทรงกลมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสจะสม่ำเสมอทุกจุด ในทางกลับกันถ้าลด Re_p ค่า Aspect Ratio ก็ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเปรียบเสมือนว่าหยดน้ำเคลื่อนที่ในพลาสมาที่เลวที่อยู่หนึ่ง จึงทำให้มีความเป็นทรงกลมสูงขึ้น ขณะที่ Re_w ที่มีค่าเท่ากับ 7 นั้น จะให้ค่าความเป็นทรงกลมสูงสุด ดังนั้น Re_p และ Re_w ที่คาดว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะให้สภาวะดีที่สุดคือเท่ากับ 0.05 และ 7 ตามลำดับซึ่งมีค่า Aspect Ratio เท่ากับ 0.925 ส่วนที่ Re_p และ Re_w เท่ากับ 0.02 และ 7 จะได้รูปหยดมีลักษณะเป็นทรงวงรีมากกว่าใน Re ที่สภาวะอื่น ๆ โดยมี Aspect Ratio เท่ากับ 0.642



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Re_w กับขนาด b ที่ Re_p ต่าง ๆ กัน

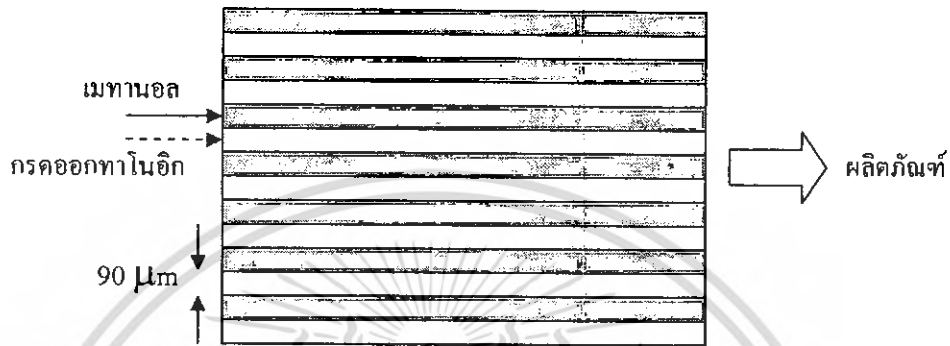
จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re_w กับค่า b ที่แสดงความกว้างของหยดน้ำในแต่ละเส้นกราฟจะมี Re_p คงที่อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.05 จากกราฟเมื่อกำหนด Re_p คงที่และปรับเปลี่ยน Re_w ให้เพิ่มขึ้น ค่า b มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย เป็นผลมาจากเมื่อตัวพาเคลื่อนที่ต่งที่แต่หยดน้ำมีอัตราเร็วเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดของหยดน้ำเพิ่มขึ้น ที่ Re_p เท่ากับ 0.01 จะให้ค่า b สูงสุดซึ่งหมายถึงอนุภาคหยดน้ำมีขนาดใหญ่ที่สุด ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรลดลง ดังนั้น Re_p เท่ากับ 0.05 ควรจะให้พื้นที่ผิวต่อปริมาตรดีที่สุด

4.2 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร

การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครเป็นแบบไหลตามกัน โดยการศึกษาจะใช้กรดออกทานอนิกและเมทานอลเป็นสารตั้งต้น ซึ่งมีการไหลของสารตั้งต้นเพื่อทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ดังรูปที่ 4.5 โดยสารตั้งต้นจะถูกป้อนเข้าสู่บริเวณ

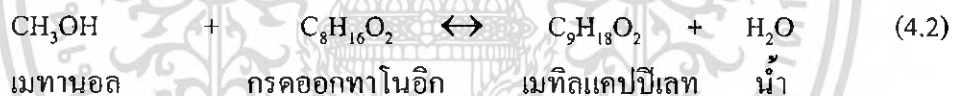
การเกิดปฏิกิริยาซึ่งการไหลของกรดออกทานอนิกและเมทานอลจะเป็นการไหลแบบราบเรียบสลับ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมกัน ไปจนถึงบริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ และปรับเปลี่ยนสัดส่วนอัตราการผลิตของ กรดออกทานอิกต่อเมทานอลต่าง ๆ ที่ 40 องศาเซลเซียสโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำสาร ผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณเอสเทอร์โดยใช้เครื่อง HPLC ในการวิเคราะห์หาร้อยละการ แปลงผันของกรดออกทานอิกและค่าคงที่สมดุล



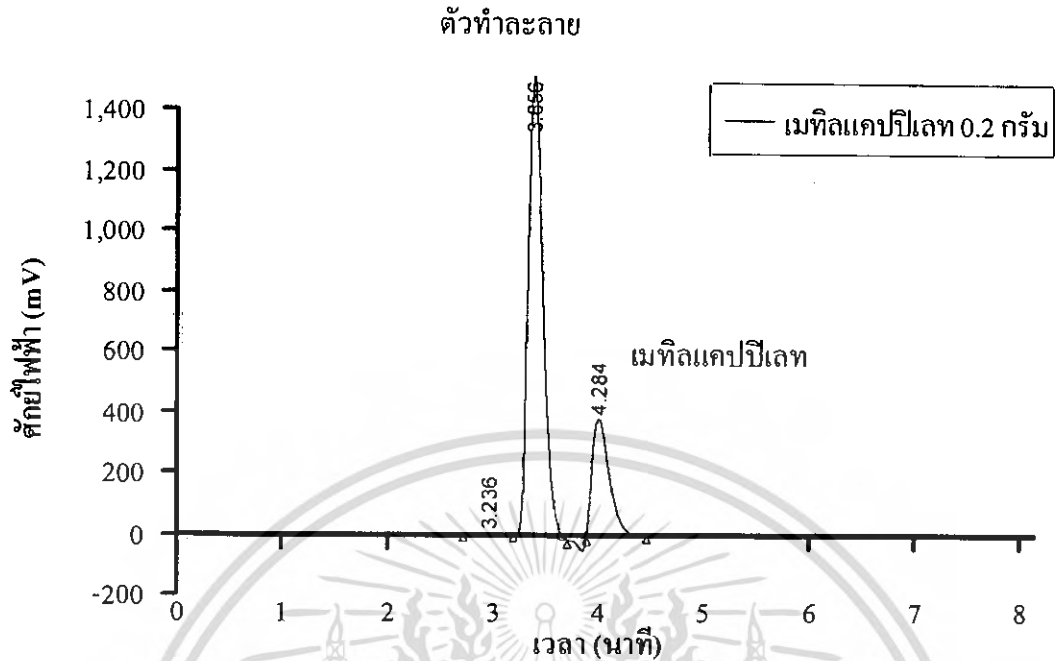
รูปที่ 4.5 บริเวณการเกิดปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร

สมการเคมีของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ดังนี้



4.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง HPLC

เริ่มจากการเตรียมสารเมทิลแคปปีเลท ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้ ความเข้มข้นของเมทิลแคปปีเลทในช่วง 0.10 ถึง 0.20 กรัมในสารละลาย 10 มิลลิลิตรฉีดเข้าเครื่อง HPLC ได้โครมาโตแกรมดังรูปที่ 4.6 จากลักษณะของโครมาโตแกรมของเมทิลแคปปีเลทที่ได้ สามารถใช้บ่งชี้ตำแหน่งของสารผลิตภัณฑ์ได้ที่ ณ ตำแหน่งรีเทนชันไทม์ประมาณ 4.3 ถึง 4.4 นาที รายละเอียดของตำแหน่งสารต่าง ๆ ในโครมาโตแกรมแสดงในตารางที่ 4.2



ตารางที่ 4.2 รีเทนชันไทม์ (Retention Time) ของสารแต่ละชนิดของเครื่อง HPLC เมื่ออัตราการไหล 0.7 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิคอลัมน์ 35 °ซ

สารเคมี	(นาที)
ตัวทำละลาย	3.656-3.660
กรดออกทานอีนิก	4.016-4.054
เมทิลแคปปีเลท	4.284-4.455

4.2.2 ผลของสัดส่วนสารตั้งต้นต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

ผลการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครแบบไหลตามกันที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ศึกษาถึงผลของอัตราส่วนของอัตราการไหลของกรดออกทานอีนิกต่อเมทานอล โดยใช้อัตราการไหลของกรดออกทานอีนิกคงที่เท่ากับ 3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงและอัตราการไหลของเอทานอลตั้งแต่ 3 ถึง 12 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณของเมทิลแคปปีเลทด้วยเครื่อง HPLC ดังเช่นที่อัตราการไหลของสารตั้งต้นหรือสัดส่วนของอัตราการไหลของกรดออกทานอีนิกต่อเมทานอล 1:4 ที่แสดงในภาคผนวกรูปที่ ค.1 จากนั้นนำพื้นที่ใต้กราฟของเมทิลแคปปีเลทมาหาปริมาณของเมทิลแคปปีเลทในผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครจากกราฟมาตรฐานในภาคผนวกรูปที่ ค.2 และคำนวณหาร้อยละการแปลงผัน

ของกรดออกทานโนอีกจากสมการที่ (2.30) และค่าคงที่สมดุลได้จากสมการที่ (2.28) แสดงในตาราง 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลของสัดส่วนอัตราการใช้ของกรดออกทานโนอีกต่อเมทานอลในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่ 40 °ซ

อัตราส่วนโดยปริมาตร กรดออกทานโนอีกต่อเมทานอล	ร้อยละการแปลงผันของ กรดออกทานโนอีก	ค่าคงที่สมดุล (-)
1:1	6.69	1.03×10^{-3}
1:2	11.95	1.73×10^{-3}
1:4	20.04	2.81×10^{-3}

ผลการทดลองปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่ 40 องศาเซลเซียสในสัดส่วนอัตราการใช้ของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน แนวโน้มการเพิ่มสัดส่วนอัตราการใช้ของกรดออกทานโนอีกต่อเมทานอลมากขึ้นจะได้ร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานโนอีกเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของเมทานอล ซึ่งเป็นการเพิ่มสารตั้งต้นทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าคงที่สมดุลเพราะค่าสมดุลแสดงถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา

4.2.3 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

จากข้อมูลการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่ 40 °ซ ที่สัดส่วนอัตราการใช้ของสารตั้งต้นกรดออกทานโนอีกต่อเมทานอลที่ 1:4 นั้นให้ค่าร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานโนอีกสูงกว่าสัดส่วนอื่น ๆ จึงได้นำสัดส่วนดังกล่าวนี้มาปรับค่าอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาใหม่ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ โดยควบคุมอุณหภูมิทั้งหมด 3 ค่า คือ 40 50 และ 60 °ซ และได้มีการปรับปริมาตรทั้งกรดออกทานโนอีกและเมทานอลเป็น 1 และ 4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงตามลำดับ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณของเมทิลแคปปีเลทโดยเครื่อง HPLC มีตัวอย่างผลวิเคราะห์จากเครื่องที่อุณหภูมิ 60 °ซ ในภาคผนวกรูปที่ ค.3 และคำนวณหาร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานโนอีก และตั้งตารางที่ 4.4 ร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานโนอีกที่ได้อยู่ในช่วง 15 ถึง 39 และค่าคงที่สมดุล อยู่ระหว่าง 1.7×10^{-3} ถึง 16.3×10^{-3}

ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานอิกและค่าคงที่สมดุลใน สักส่วนอัตราการไหลเชิงปริมาตรของกรดออกทานอิกต่อเมทานอล 1:4

อุณหภูมิ (°ซ)	ร้อยละการแปลงผันของ กรดออกทานอิก	ค่าคงที่สมดุล (-)
40	15	1.70×10^{-3}
50	26	5.76×10^{-3}
60	39	16.31×10^{-3}

4.3 การเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในระบบต่างกัน

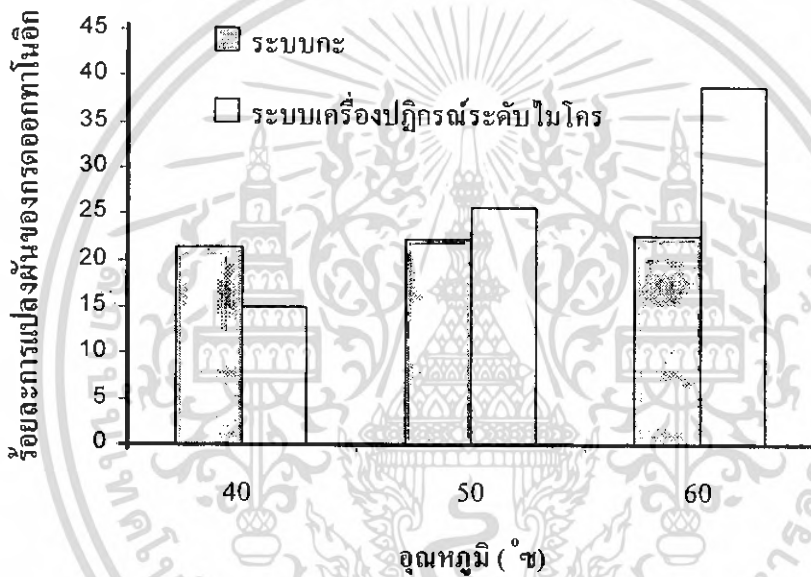
จากตารางที่ 4.4 ร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานอิกในระบบต่อเนื่องมีค่าแตกต่างกันในแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ส่วนค่าคงที่สมดุลมีค่ามากขึ้นเช่นกัน และเนื่องจากต้องการศึกษาว่าหากเพิ่มอุณหภูมิเหมือนกันแต่พื้นที่ผิวสัมผัสไม่เท่ากันจะมีผลต่อร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานอิกและค่าคงที่สมดุลหรือไม่ เราจึงทดลองทำปฏิกิริยาในระบบกะคือถังปั่นกวนขนาด 50 มิลลิลิตร โดยเริ่มจากการใส่สารเมทานอลจำนวน 16 มิลลิลิตรและกรดออกทานอิก 4 มิลลิลิตร ใช้เวลาปั่น 45 นาทีต่อกะ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกันได้ จึงควบคุมอุณหภูมิตามการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร (แบบต่อเนื่อง) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานอิกและค่าคงที่สมดุลในถังปั่นกวนแบบกะขนาด 50 มิลลิลิตร

อุณหภูมิ (°ซ)	ร้อยละการแปลงผันของกรด ออกทานอิก	ค่าคงที่สมดุล (-)
40	21.53	3.83×10^{-3}
50	22.21	4.11×10^{-3}
60	22.69	4.32×10^{-3}

ในตารางที่ 4.5 สังเกตร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานอิกในถังปั่นกวนที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินั้น ไม่ค่อยมีผลต่อร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานอิกและค่าคงที่สมดุลมากนัก คือมีค่าประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์ และ 4.10×10^{-3} ตามลำดับ แต่ยังคงเพิ่มขึ้นในระดับต่ำทั้งนี้ เป็นเพราะปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาควบคุมความร้อน

เมื่อทำการทดลองทั้งสองระบบคือ ระบบกะกับระบบต่อเนื่องแล้ว หากพิจารณาในแต่ละระบบนั้น ระบบกะหรือในถึงปั่นกวณธรรมชาติให้ร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานอิกและค่าคงที่สมดุลประมาณเดียวกันถึงแม้จะมีการเพิ่มอุณหภูมิก็ตามดังแสดงในรูปที่ 4.7 สาเหตุที่ทำการเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องมาจากค่าความหนืดจะมีค่าลดลง ทำให้การแพร่ของสารหนึ่งเข้าไปอีกสารหนึ่งทำได้ง่ายขึ้น ซึ่งบอกเป็นนัยว่า โอกาสเกิดการทำปฏิกิริยามีมากขึ้นด้วย แต่ระบบกะนั้นมีข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่ผิวสัมผัสเพราะหากสารตั้งต้นแต่ละตัวสัมผัสกันน้อย การแพร่จะน้อยตามลงเช่นกัน ขณะที่ระบบเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครเกิดการผสมแบบราบเรียบ [3] พื้นที่ผิวสัมผัสมีมากกว่าระบบกะทำให้อธิพผลจากการแพร่มีผลต่อร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานอิกมากกว่าอิทธิพลจากอุณหภูมิ



รูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานอิกของระบบเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครกับระบบกะ

พิจารณาในสมการ (2.25) สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K$ กับ $1/T$ ส่วนค่าความร้อนของปฏิกิริยา ได้จากความชันของกราฟดังรูปที่ 4.8

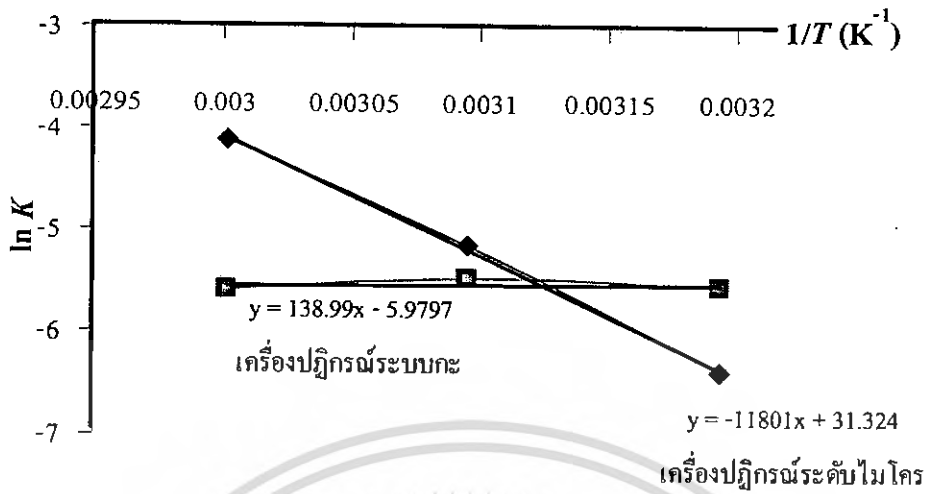
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความร้อนของปฏิกิริยาแต่ละระบบ

เครื่องปฏิกรณ์	ค่าความชัน	ค่าความร้อนปฏิกิริยา (กิโลจูลต่อโมล)
ระดับไมโคร	-11,801	98.1
ระบบกะ	139	-1.2

หมายเหตุ - ค่า R เท่ากับ 8.314 จูลต่อ (โมล.เคลวิน)

- ค่าความร้อนของปฏิกิริยาทางทฤษฎี [14] เท่ากับ 58 กิโลจูลต่อโมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K$ กับ $1/T$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

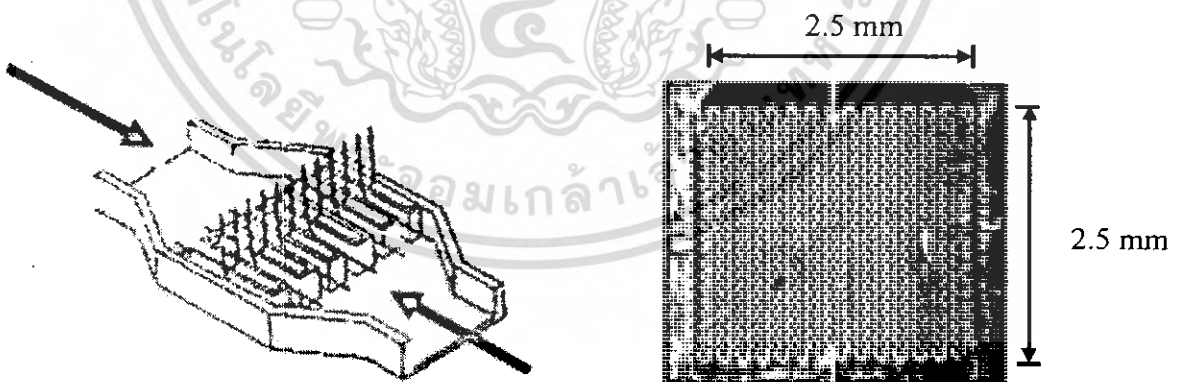
บทที่ 5

แบบจำลองการผสมในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร

จากผลการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันระหว่างเมทานอลกับกรดออกทานอิกในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครดังที่ได้แสดงในบทที่ 4 ทำให้สามารถพัฒนาแบบจำลองการไหลและการผสมที่เกิดขึ้นในช่องระดับไมโครเพื่ออธิบายผลของสัมประสิทธิ์การแพร่ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์นี้ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Comsol Multiphysics 3.2a

5.1 แบบจำลองลักษณะการไหลภายในช่องการไหลของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร

การสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ศึกษาการแพร่ที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลระดับไมโคร จะพิจารณาจากรูปแบบการไหลที่เกิดในช่องระดับไมโครซึ่งเป็นการไหลแบบราบเรียบ ลักษณะของช่องป้อนสารในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครนี้แสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งจะเห็นว่าสารตั้งต้นป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ในทิศทางตรงกันข้ามกันภายในช่องการไหลระดับไมโครสลับกันไป เมื่อป้อนสารเข้าเครื่องปฏิกรณ์ในทิศทางตามลูกศร สารจะเข้ามาบรรจบกันบริเวณตรงกลางและไหลขึ้นทางด้านบนเข้าช่องการไหลระดับไมโคร โดยมีลักษณะของช่องการไหลจะมีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้งหมด 28 ช่องเรียงต่อกัน โดยแบ่งเป็น 14 ช่องสำหรับกรดออกทานอิกและอีก 14 ช่องเป็นเมทานอลสลับกันไป แต่เนื่องจากช่องมีรูปแบบซ้ำกันจึงจำลองเพียง 7 ช่องหรือ 1 ใน 4 ของช่องทำปฏิกิริยาทั้งหมด แสดงแบบจำลองช่องการไหลนี้ดังรูปที่ 5.2



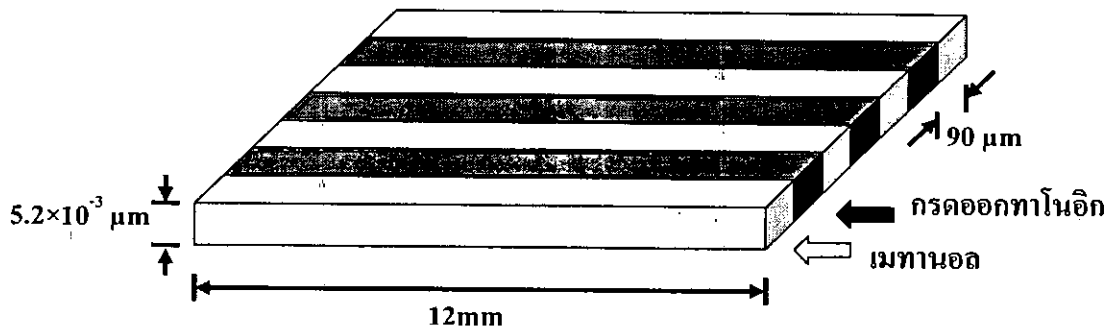
ก.

ข.

รูปที่ 5.1 ช่องป้อนสารในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร

ก. รูปจำลองบริเวณช่องป้อนสาร [3]

ข. บริเวณช่องป้อนสารของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร



รูปที่ 5.2 ช่องทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร

เนื่องด้วยช่องทำปฏิกิริยามีขนาดระดับไมโคร ทำให้มีระยะเวลาของสารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์น้อยมาก คือ ประมาณ 1.28 วินาที เพื่อให้ง่ายแก่การคำนวณจึงกำหนดให้ภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่มีการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดขึ้น แต่จะช่วยให้เกิดการผสมระหว่างเมทานอลกับกรดออกทานอิก และหลังจากสารตั้งต้นออกจากช่องการไหลระดับไมโครจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นในท่อที่ยานำสารออกจากเครื่องปฏิกรณ์

หนึ่งในปัจจัยที่ช่วยทำให้ปฏิกิริยาเกิดคั้นั้น คือ การสัมผัสกันระหว่างสารตั้งต้นทั้งหมด ซึ่งคาดว่า การถ่ายเทมวลของสารเกิดมากเช่นกัน ในการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร การถ่ายเทมวลของสารจากกรดออกทานอิกไปยังเมทานอลหรือจากเมทานอลไปยังกรดออกทานอิกได้รับอิทธิพลจากการแพร่มากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อลดความหนืดซึ่งสังเกตจากการทำปฏิกิริยาแบบกะ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4

โดยทั่วไปการไหลที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลระดับไมโครจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งเกี่ยวข้องกับตัวแปรไร่นวคือค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ [3] โดยปกติแล้วการไหลในช่องแคบจะมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำและเป็นการไหลแบบราบเรียบ ดังสมการ (4.1)

$$Re = \frac{\rho dv}{\mu} \quad (4.1)$$

ในกรณีนี้ช่องการไหลไม่ได้มีหน้าตัดเป็นวงกลม แต่เป็นช่องการไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนั้นจึงประมาณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลโดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic Diameter, D_h) [10, 11] ในการคำนวณแทนเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม โดยมีสมการในการคำนวณ ดังนี้

$$D_h = \frac{4A}{U} \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม จะได้

$$D_h = \frac{2ab}{(a+b)} \quad (5.2)$$

เมื่อ	A	คือ พื้นที่หน้าตัด
	U	คือ เส้นรอบวงของพื้นที่หน้าตัดผิวเปียก
	a	คือ ความสูงหรือความกว้างของช่องหน้าตัดสี่เหลี่ยม
	b	คือ ความกว้างหรือความสูงของช่องหน้าตัดสี่เหลี่ยม

จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกในสมการที่ 5.2 แทนในสมการที่ 4.1 ได้โดย

$$d = D_h \quad (5.3)$$

ดังนั้นจะได้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของช่องการไหลของเมทานอลดังนี้

$$Re = \frac{793 \text{ kg}}{\text{m}^3} \left| \frac{2 \times 0.059 \times 0.089 \times 10^{-3} \text{ m}}{(0.059 + 0.089)} \right| \left| \frac{0.015 \text{ m}}{\text{s}} \right| \frac{\text{m.s}}{4.1690 \times 10^{-4} \text{ kg}} = 2.02$$

จากสมการข้างต้นจะได้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 2 ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 2,100 จึงเป็นการไหลแบบราบเรียบ ทำให้ง่ายต่อการแก้ปัญหาเชิงตัวเลข ในสมการสมมูลโมเมนตัมและสมการความต่อเนื่องสำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ จะใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes) [12] โดยคิดที่สภาวะคงตัว ดังนี้

$$-\nabla \cdot \eta(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = 0 \quad (5.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

เมื่อ	ρ	คือ ความหนาแน่น (น้ำหนักต่อปริมาตร)
	\mathbf{u}	คือ เวกเตอร์ความเร็ว (ระยะทางต่อเวลา)
	η	คือ ความหนืด (น้ำหนักต่อระยะเวลาต่อเวลา)
	p	คือ ความดัน (แรงต่อพื้นที่)

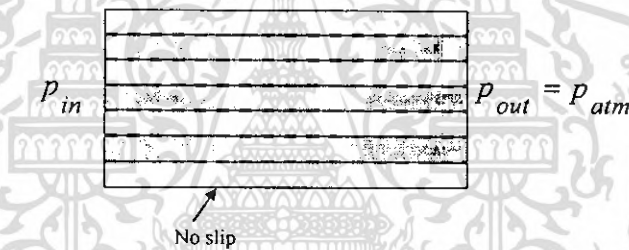
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผสมภายในช่องปฏิกรณ์ระดับไมโครนี้กรดอกทาทานอกจะมีความเข้มข้นและปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับเมทานอลที่ป้อนเข้า จึงสามารถใช้กฎของฟิคส์ (Fick's Law) ในการอธิบายการแพร่ภายในช่องแคบนี้ได้ สมการดุลมวลสำหรับตัวถูกละลายนี้ใช้ในเทอมการพาและการแพร่ (Convection – Diffusion Mode ในโปรแกรมสำเร็จรูป Comsol Multiphysics 3.2a) มีสมการดังนี้

$$-\nabla \cdot (D\nabla c + cu) = 0 \quad (5.5)$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (พื้นที่ต่อเวลา)
 c คือ ความเข้มข้น (โมลต่อปริมาตร)

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการคำนวณปรากฏการณ์การแพร่ที่เกิดขึ้นในช่องการไหลระดับไมโครจะเป็นการประยุกต์ใช้สมการนาเวียร์-สโตรค [12] ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 เงื่อนไขขอบเขตของช่องการไหลสำหรับสมการนาเวียร์-สโตรค

ณ ตำแหน่งหน้าตัดทางเข้าและทางออกจากช่องปฏิกรณ์ ความเร็วจะตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของช่องปฏิกรณ์

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{t} = 0 \quad (5.6)$$

$$p = p_i \quad \text{เมื่อ } p_i \text{ คือ ความดัน} \quad (5.7)$$

กำหนดให้อัตราเร็วที่ตำแหน่งทางเข้าของเมทานอลและกรดอกทาทานอกเป็นค่าคงที่และสามารถวิธีการคำนวณในภาคผนวก จ ขณะที่ทำให้ความดันที่ตำแหน่งทางออกจากช่องปฏิกรณ์เป็นความดันบรรยากาศ ส่วนที่ผนังภายในช่องปฏิกรณ์ให้มีอัตราเร็วการไหลของสารเป็นศูนย์ในทุกทิศทาง (No slip)

$$(\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y, \mathbf{u}_z) = (0,0,0) \quad \text{ที่ผนังช่องปฏิกรณ์} \quad (5.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ u_x, u_y, u_z เป็นความเร็วในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ

และเงื่อนไขขอบเขตสำหรับคูลมวล

$$\begin{aligned} c &= c_{O0} && \text{ที่ช่องทางเข้ากรดออกทาโนอิก} \\ c &= c_{M0} && \text{ที่ช่องทางเข้าเมทานอล} \end{aligned} \quad (5.9)$$

เมื่อ c คือ ความเข้มข้น (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)
 c_{O0} คือ ความเข้มข้นของกรดออกทาโนอิกที่ทางเข้าช่องการไหล (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)
 c_{M0} คือ ความเข้มข้นของเมทานอลที่ทางเข้าช่องการไหล (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)

ที่ผนังของช่องปฏิกรณ์ขอบเขตเงื่อนไขจะเป็นแบบไม่มีการแพร่หรือการเปลี่ยนแปลงของโมลสาร

$$(-D\nabla c + cu) \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{ที่ผนังช่องปฏิกรณ์} \quad (5.10)$$

เมื่อ \mathbf{n} คือ จำนวน โมลของเมทานอล

สมการสถานะนี้ ฟลักซ์ที่ตั้งฉากกับขอบเขตจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และเงื่อนไขที่ตำแหน่งทางออก การเคลื่อนที่ของสารโดยการพาจะมีมากกว่าการแพร่ที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดทางออกของช่องปฏิกรณ์ ซึ่งแสดงดังสมการ (5.10) สมการนี้แสดงให้เห็นความแตกต่างของความเข้มข้นของเมทานอลในทิศทางการไหลที่ตำแหน่งทางออก

$$(-D\nabla c + cu) \cdot \mathbf{n} = cu \cdot \mathbf{n} \quad \text{ที่ทางออก} \quad (5.11)$$

5.2 การหาเกณฑ์บ่งชี้ประสิทธิภาพของการผสม [13]

การกำหนดเกณฑ์ที่จะใช้เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการผสมเชิงปริมาณในของเหลว 2 ชนิดภายในเครื่องผสมระดับไมโครจะใช้ความเป็นเนื้อเดียวกันของระดับความเข้มของความเข้มข้นของตัวถูกละลายในตัวทำละลาย โดยการวัดความเบี่ยงเบนของความเข้มแต่ละตำแหน่งของบริเวณที่สนใจขนาดเล็ก (J_f) ในการศึกษานี้ เราเลือกใช้ค่าความเข้มเฉลี่ย (J_{mean}) เป็นค่าอ้างอิงของการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเพื่อที่จะอธิบายการผสมที่มีความสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงได้กำหนดเกณฑ์ใช้วัดที่แก้ไขแล้ว C_{dev} เป็นค่าบ่งชี้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_{dev} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - I_{mean})^2} \quad (5.12)$$

เมื่อ N คือ ค่าจำนวนตำแหน่งของบริเวณที่สนใจขนาดเล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์ และเพื่อให้ได้ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผสมภายในช่วงเงื่อนไขที่กำหนด คือ การกระจายของความเข้มข้นตลอดความยาวตามทิศทางไหลของช่องปฏิกรณ์ตั้งแต่ตำแหน่งหน้าตัดทางเข้าจนกระทั่งถึงตำแหน่งใด ๆ ค่า C_{dev} จะปรับให้เป็นบรรทัดฐานสุดท้ายสำหรับเปรียบเทียบ C_{mix} ดังนี้

$$C_{mix} = \frac{(C_{dev_inlet} - C_{dev_outlet})}{C_{dev_inlet}} \quad (5.13)$$

เมื่อ C_{dev_inlet} และ C_{dev_outlet} เป็นค่าของ C_{dev} ที่ตำแหน่งหน้าตัดทางเข้าและทางออกตามลำดับ ถ้าของเหลวทั้ง 2 ชนิดผสมกันอย่างสม่ำเสมอภายในช่องการผสม ค่าความเข้ม I_i ในสมการ (5.12) จะเหมือนกันทุก ๆ พิกเซลหรือมีค่าเท่ากับ I_{mean} ดังนั้น ค่า C_{mix} จะมีค่าเท่ากับ 1 แต่ถ้าไม่มีการผสมเกิดขึ้นทั้งหมด ค่า C_{mix} จะมีค่าเท่ากับ 0

5.3 ผลของการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่มีต่อการผสมของกรดออกทานอิกและเมทานอล

ในกรณีของการเกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเป็นอย่างมาก ในทางทฤษฎีนั้นสัมประสิทธิ์การแพร่ของกรดออกทานอิกในเมทานอลสามารถประมาณค่าได้จากวิธีของ Wilke-Chang [6] ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้นี้จะขึ้นกับอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ในกรณีนี้เพื่อให้สอดคล้องกับการผลการทดลองบทที่ 4 จึงใช้ค่าอุณหภูมิเดียวกันกับการทดลอง ผลการคำนวณดังกล่าวแสดงในตารางที่ 5.1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของออกทานอิกในเมทานอลจะมีค่าอยู่ในลำดับ 10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก จ จากค่าประมาณทางทฤษฎีของสัมประสิทธิ์การแพร่นี้จะใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการศึกษาการผสมภายในช่องการไหลระดับไมโคร ค่าคงที่และตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากการประมาณค่าโดยวิธี Wilke-Chang

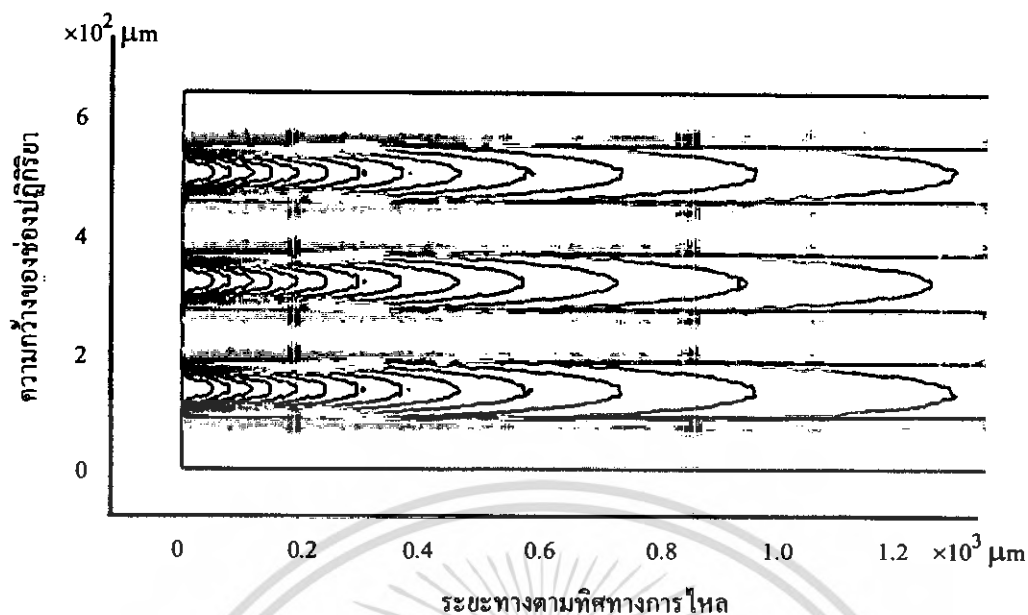
อุณหภูมิ (°C)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (m ² /s)
40	2.08×10^{-9}
50	2.44×10^{-9}
60	2.86×10^{-9}

ตารางที่ 5.2 ค่าตัวแปรและค่าคงที่ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

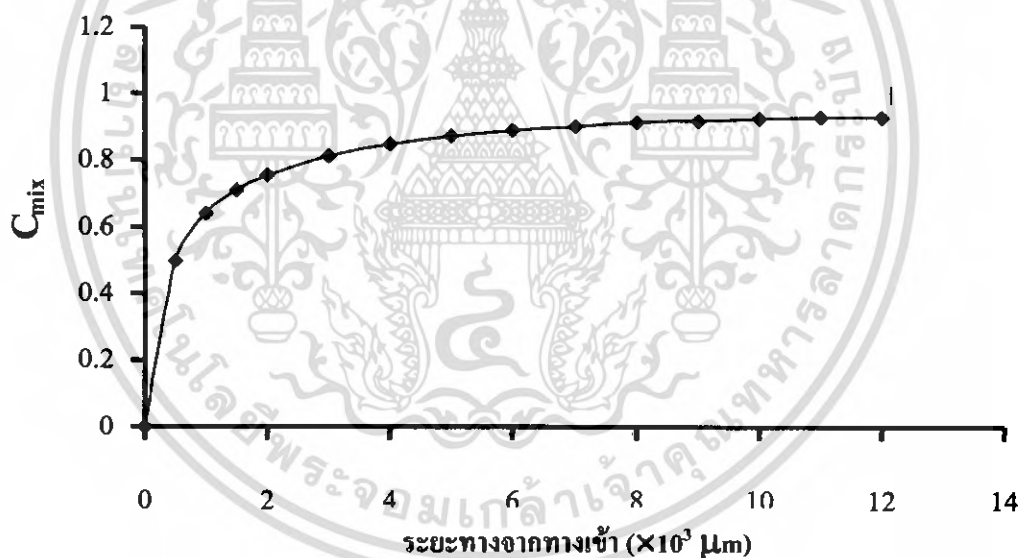
ตัวแปรต่าง ๆ	ค่าของตัวแปร	หน่วย
สัมประสิทธิ์การแพร่, D	D	m ² /s
ความเร็วกรดออกทานอิก, u_o	2.69×10^{-4}	m/s
ความเร็วของเมทานอล, u_M	1.51×10^{-2}	m/s
ความเข้มข้นกรดออกทานอิก, c_O	6.32×10^3	mol / m ³
ความเข้มข้นเมทานอล, c_M	24.78×10^3	mol / m ³
ค่าความร้อนปฏิกิริยา, ΔH_{rx}	98.05	kJ/mol
ค่าคงที่จากสมการแวนฮอฟฟ์, K_{eq0}	3.99×10^{13}	-
อุณหภูมิ, T_0	T_0	K
ความหนืดเมทานอล, η_M	4.17×10^{-3}	Pa.s
ความหนืดกรดออกทานอิก, η_O	3.48×10^{-3}	Pa.s

การศึกษาประสิทธิภาพการผสมระหว่างกรดออกทานอิกกับเมทานอลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปนี้จะใช้สัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 1.0×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าประมาณจากวิธีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยลักษณะการผสมของสารตั้งต้นที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปดังกล่าว แสดงตารางที่ 5.1 และในรูปที่ 5.4 แสดงฟลักซ์การแพร่ของกรดออกทานอิกตามช่องการไหล จะเห็นว่าความเข้มข้นของกรดออกทานอิกลดลงอย่างชัดเจนแสดงว่ามีกรผสมกันของเมทานอลกับกรดออกทานอิกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ระยะทางตามทิศทางการไหลตั้งแต่ทางเข้าจนถึงระยะ 1,000 ไมโครเมตร และเมื่อพิจารณาการกระจายความเข้มข้นเฉลี่ยโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปนี้จะแสดงได้ในรูปที่ 5.5 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเทียบกับระยะทางที่ไหลภายในช่องปฏิกรณ์ที่สัมประสิทธิ์การแพร่ 1.0×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที พบว่าการผสมระหว่างเมทานอลกับกรดออกทานอิกจะดีขึ้นเมื่อระยะทางการไหลของสารเพิ่มมากขึ้นเมื่อสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ ซึ่งสามารถแสดงการผสมที่สม่ำเสมอด้วยค่า C_{mix} ในแกนตั้งและระยะทางจากตำแหน่งทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์จนถึงทางออกในแกนนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารหลวงวินเวสท์หรือการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 ฟลักซ์การแพร่ของกรดอนอกทาทานิกตามช่องการไหล

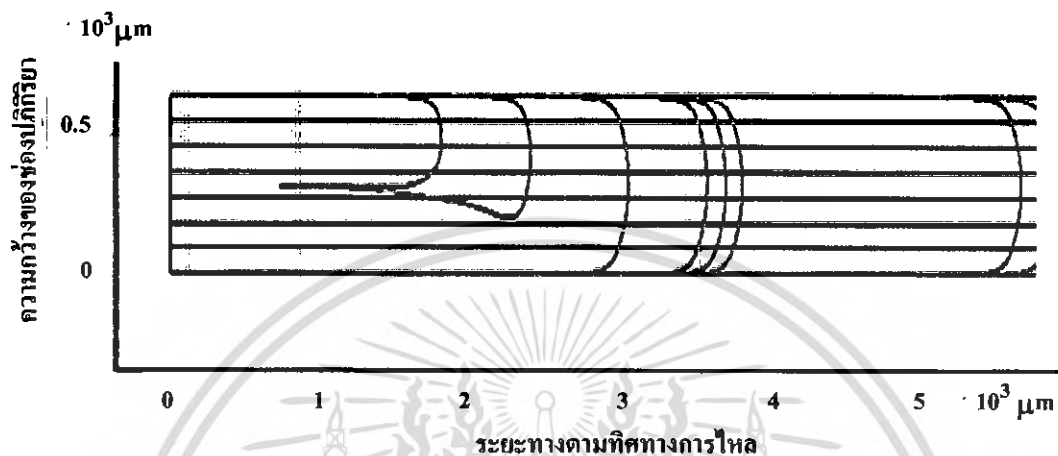


รูปที่ 5.5 ผลของสัมประสิทธิ์การแพร่ต่อการกระจายของความเข้มข้น
เมทานอลในช่องการไหลระดับไมโคร

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.5 พบว่าค่า C_{mix} จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากตำแหน่งทางเข้าของช่องปฏิกรณ์จนกระทั่งถึงที่ตำแหน่งทางออก ในช่วงแรกของระยะทางที่สารไหลผ่านตั้งแต่ 0 ถึง ประมาณ 2 มิลลิเมตรจะเกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกันอย่างรวดเร็วของกรดอนอกทาทานิกและเมทานอลซึ่งค่า C_{mix} ที่ได้จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 0.75 หลังจากระยะ 2 มิลลิเมตรเป็นต้นไป การผสมให้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

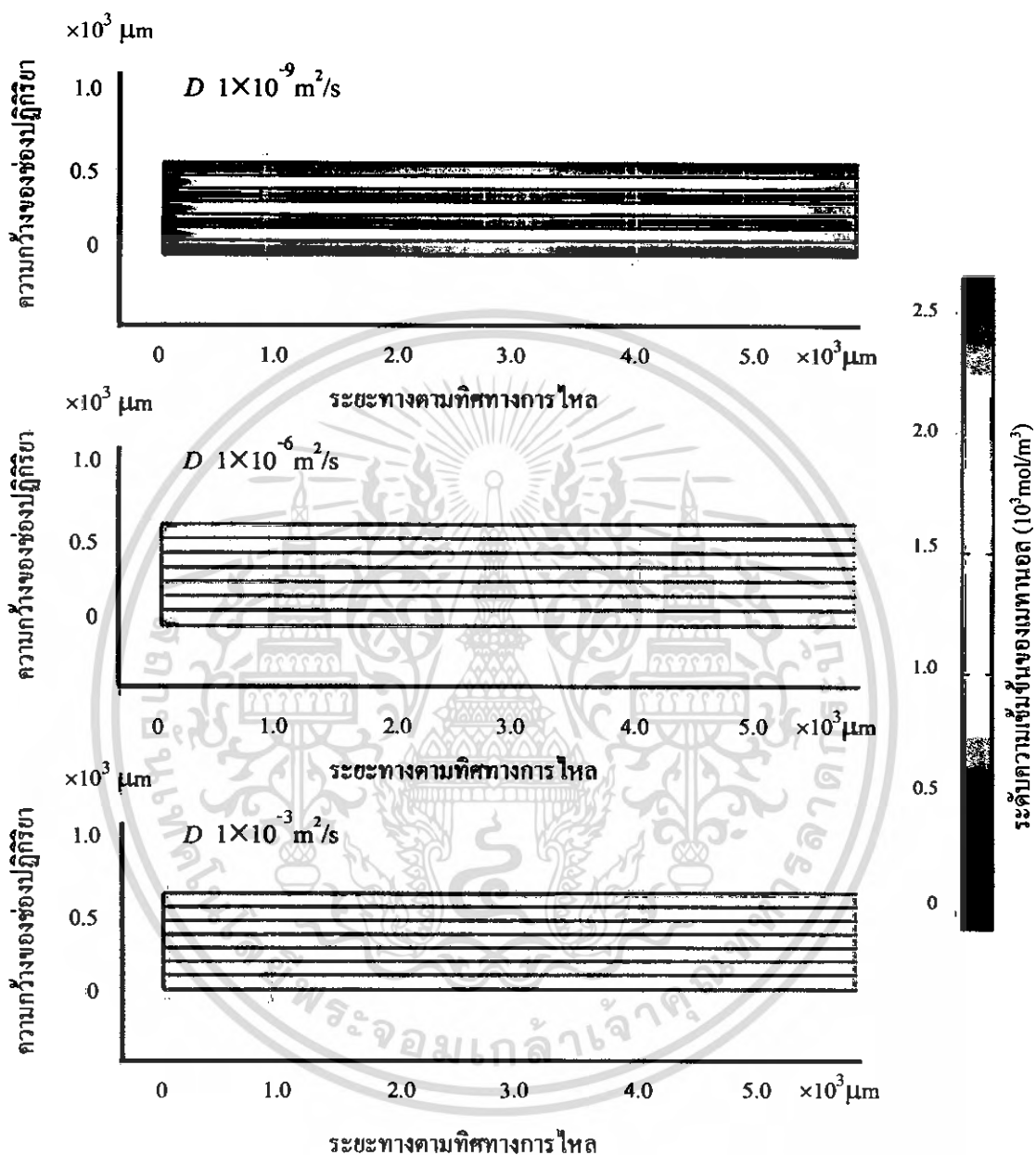
เนื้อเดียวกันจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนค่า C_{mix} เท่ากับ 0.93 ที่ตำแหน่งทางออก แสดงให้เห็นว่าที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำจะทำให้ค่าความเป็นเนื้อเดียวกันค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และเนื่องจากการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันถูกจำกัดด้วยสัมประสิทธิ์การแพร่จึงทำให้สารตั้งต้น ไม่ผสมกันร้อยเปอร์เซ็นต์ในช่องปฏิกรณ์นี้ และในทำนองเดียวกันนี้สามารถแสดงด้วย Concentration Gradient ในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดง Concentration Gradient ของเมทานอล

ถ้าสมมติค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เป็น 1×10^{-6} และ 1×10^{-3} ตารางเมตรต่อวินาที การผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ 1×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที นั่นคือช่วงแรกของระยะทางที่สารไหลผ่านจะมีการผสมกันอย่างรวดเร็ว และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนมีความสม่ำเสมอของการผสม นั่นแสดงว่าถ้าสารที่นำมาผสมกันมีสัมประสิทธิ์การแพร่มากขึ้น จะทำให้การผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันได้รวดเร็วที่ระยะทางการไหลของสารน้อย ๆ และเพื่อให้เห็นภาพได้ชัดเจน รูปที่ 5.7 จะแสดงความเข้มข้นของเมทานอลที่ผสมกับกรดออกทาโนอิก โดยใช้ระดับสีแทนความเข้มข้นของเมทานอล ที่ความเข้มข้นของเมทานอลเป็นศูนย์จะแสดงด้วยสีน้ำเงินและที่ความเข้มข้นของเมทานอลสูงสุด (ความเข้มข้นที่ทางเข้าช่องปฏิกรณ์) จะแสดงด้วยสีแดงเข้ม จากรูปที่ 5.7 ขนาดของช่องปฏิกรณ์ตามระยะของการไหลและระยะของช่องป้อนสารจะแสดงในแกนนอนและแกนตั้งของรูป โดยถ้าสารมีการผสมกันสม่ำเสมอแล้วระดับความเข้มของสีจะเป็นสีเดียวกัน จากรูปพบว่าที่สัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 1×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที ได้ความเข้มข้นที่ตำแหน่งทางออกของเมทานอลเท่ากับ 22,503 โมลต่อลูกบาศก์เมตร และที่สัมประสิทธิ์การแพร่ที่สมมติขึ้นมา คือ 1×10^{-6} และ 1×10^{-3} ตารางเมตรต่อวินาทีจะได้ความเข้มข้นที่ตำแหน่งทางออกของเมทานอลเท่ากับ 16,340 และ 14,162 โมลต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ ถ้าเป็นการผสมในอุดมคติจะได้ความเข้มข้นของเมทานอลประมาณ 14,160 โมลต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อ

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันดีขึ้นและใกล้เคียงกับความเข้มข้นของเมทานอลในอุดมคติที่ระยะทางตามทิศทางกรไหลสั้น ๆ



รูปที่ 5.7 ผลของสัมประสิทธิ์การแพร่ต่อการกระจายความเข้มข้นที่ระยะทางตามทิศทางกรไหล

จากการศึกษาการผสมของกรดอกททานโอินกับเมทานอลภายในช่องกรไหลระดับไมโครโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Comsol Multiphysics 3.2a จะแสดงให้เห็นว่า สัมประสิทธิ์การแพร่มีผลต่อการผสมภายในช่องระดับไมโครเป็นอย่างมาก

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร พบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่สัดส่วนของกรดออกทานอิกต่อเมทานอล 1 ต่อ 4 ในช่วงอุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าในแต่ละอุณหภูมิจะให้ร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานอิกแตกต่างกันอย่างชัดเจนคือ 15 26 และ 39 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าความหนืดที่ลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นและพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรที่สูงของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร ถ้าเปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาในระบบกะจะได้อัตราการแปลงผันของกรดออกทานอิกคงที่ประมาณ 22 จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่าอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการทำปฏิกิริยามีผลน้อยกว่าอิทธิพลของพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครจึงเหมาะสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพโดยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการที่พื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาภายในช่องการไหลระดับไมโคร การศึกษาถึงอิทธิพลดังกล่าวจึงใช้แบบจำลองการไหลในช่องการไหลระดับไมโครเพื่อให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมกรการไหลนี้ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของกรดออกทานอิกในเมทานอลเป็นตัวแปรหลักสำหรับศึกษาพฤติกรรมกรการไหลภายในช่องการไหลระดับไมโคร ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่นี้มีค่าประมาณ 2.08×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที พบว่าค่า C_{mix} ที่ตำแหน่งทางออกของช่องการไหลมีค่าเท่ากับ 0.93 ซึ่งใช้แสดงถึงความสามารถการผสมกันระหว่างกรดออกทานอิกกับเมทานอลภายในช่องการไหลระดับไมโครนี้มีการผสมได้เป็นอย่างดี

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการนำสารอื่น ๆ ที่มีความหนืดสูงหรือปฏิกิริยาที่มีความซับซ้อนมากกว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันมาประยุกต์ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร
2. การพัฒนารูปทรงของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครแบบอื่น ๆ หรือการนำเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครมาต่อเป็นอนุกรมหรือขนาน เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] บทความพลังงาน. ไปโอดีเซลน้ำมันเชื้อเพลิงคุณภาพแห่งยุคสมัย
www.green.kmutt.ac.th/news/Question.asp?GID=60
- [2] อนวัช ดรงค์ภินนท์. “การสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ.”
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมปิโตรเคมี บัณฑิต
วิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [3] Volker Hessel, Steffen Hardt and Holger Löwe. **Chemical Micro Process Engineering**.
Wiley-VCH. Weinheim. 2004
- [4] Novel Micro. “**Reactor Makes Biodiesel.**” [Online]. Available:
www.biofuels4oregon.org/sitenews/microreactor
- [5] Protensive the Process Intensification Company. “**Microreactor**” [Online]. Available:
www.protensive.co.uk/pages/equipment/category/categoryid=MR
- [6] Robert C. Reid, John M. Prausnitz and Bruce E. Poling. **The properties of GASES &
LIQUIDS**. 4th Ed. McGraw-Hall. New York. 1988.
- [7] Stanley Middleman. **An Introduction to Mass and Heat Transfer**. John Wiley &
Sons. New York. 1998.
- [8] R. Byron Bird, Warren E. Stewart and Edwin N. Lightfoot. **Transport Phenomena**.
2nd Ed. John Wiley & Sons. New York. 2002
- [9] วิชิตา ไชยเชตต์. “สมมูลปฏิริยาแบบเอกพันธ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของ
น้ำมันปาล์มกับเมทานอล.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง. 2549.
- [10] Wikipedia “**Hydraulic diameter.**” [Online]. Available:
http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_diameter
- [11] Engineering Tool Box. “**Hydraulic Diameter.**” [Online]. Available:
http://www.engineeringtoolbox.com/hydraulic-equivalent-diameter-d_458.html

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] COMSOL Multiphysics model Library @ COPYRIGHT 1994-2005
- [13] Ying Zheng Liu, Byoung Jae Kim and Hyung Jin Sung. **Two-fluid mixing in a microchannel**. International Journal of Heat and Fluid Flow, Volume 25, Issue 6, December 2004, Pages 986-995
- [14] Robert H. Perry, Don W. Green. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 6th Ed. McGraw-Hill. New York. 1984.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง 3.1

การศึกษาผลของอัตราการไหลที่มีต่อขนาดหยดน้ำ

ภาคผนวก ก แสดงผลของอัตราการไหลที่มีผลต่อขนาดของหยดน้ำโดยมีพาราฟินส์เป็นตัวพา

ตารางที่ ก.1 ขนาดของหยดที่อัตราความเร็วของน้ำและพาราฟินส์ต่าง ๆ กัน

พาราฟินส์		น้ำผสมโพแทสเซียม- เปอร์แมงกาเนต		ขนาดของหยดพาราฟินส์ (มิลลิเมตร)	
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์	ความยาวด้าน a	ความยาวด้าน b
9.9	0.01	0.6	1	-	-
		1.9	3	1.4900	0.9696
		3.2	5	1.5000	1.0748
		4.4	7	1.5400	1.1645
		6.3	10	1.5600	1.2718
19.7	0.02	0.6	1	1.3617	0.8688
		1.9	3	1.4073	0.9213
		3.2	5	1.4102	0.9311
		4.4	7	1.5187	0.9836
		6.3	10	1.5164	1.0288
29.6	0.03	0.6	1	-	-
		1.9	3	1.1954	0.8348
		3.2	5	1.2365	0.8492
		4.4	7	1.1620	0.9235
		6.3	10	1.3471	0.9096

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาราฟินส์		น้ำผสมโพแทสเซียม- เปอร์แมงกาเนต		ขนาดของหยดพาราฟินส์ (มิลลิเมตร)	
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ค่าเรย์โนลด์ส์ นัมเบอร์	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง)	ค่าเรย์โนลด์ส์ นัมเบอร์	ความยาวด้าน a	ความยาวด้าน b
39.5	0.04	0.6	1	1.0524	0.8511
		1.9	3	1.1522	0.8347
		3.2	5	1.1902	0.8676
		4.4	7	1.2183	0.9349
		6.3	10	1.3133	0.9479
49.4	0.05	0.6	1	0.9874	0.8244
		1.9	3	1.1397	0.8623
		3.2	5	1.1148	0.9221
		4.4	7	1.0321	0.9443
		6.3	10	1.0996	0.9652

หมายเหตุ ความยาวด้าน a และ b แสดงดังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การหาค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของการไหลในท่อแคบ

สารเคมีที่ใช้และคุณสมบัติทางกายภาพ

1. น้ำผสมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดย 0.1 กรัมของ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในน้ำ ปริมาตร 220 มิลลิลิตร ซึ่งมีปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตน้อยมากจึงสมมติให้คุณสมบัติของสารละลายนี้เหมือนกับน้ำบริสุทธิ์โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ดังนี้
 - 1.1 ความหนาแน่น (ρ) เท่ากับ 998 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
 - 1.2 ความหนืดทางไดนามิกส์ (μ) เท่ากับ 1.002 กรัมต่อเมตรต่อวินาที
2. พาราฟินส์เหลว

คุณสมบัติทางกายภาพของพาราฟินส์เหลวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ดังนี้

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

การคำนวณค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์

การทดลองนี้จะคำนวณค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์แยกกันระหว่างน้ำกับพาราฟินส์เหลว โดยมี การคำนวณดังนี้

$$Re = \frac{\rho d v}{\mu} \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ	Re	คือ	ตัวแปรไร้มิติหน่วยเรย์โนลด์์นัมเบอร์
	ρ	คือ	ความหนาแน่น (น้ำหนักต่อปริมาตร)
	d	คือ	คุณลักษณะความยาว ในที่นี้คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของช่องการไหล
	v	คือ	อัตราเร็ว (ระยะทางต่อเวลา)
	μ	คือ	ความหนืดไดนามิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำ

การหาค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำผสมนี้จะกำหนดค่าคุณลักษณะความยาวเป็นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของช่องการไหลเล็ก (ท่อแคปิลารีที่ใช้ป้อนน้ำ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.222 มิลลิเมตรที่หน้าตัดทางออก คิดเป็นพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 3.872×10^{-2} ตารางมิลลิเมตร

คำนวณที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร 0.6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จะได้อัตราเร็วของน้ำเท่ากับ 4.52 มิลลิเมตรต่อวินาที และแทนค่าลงในสมการ (ข.1)

$$Re = \frac{998 \text{ kg} \left| \frac{0.222 \times 10^{-3} \text{ m} \right| \left| \frac{4.52 \times 10^{-3} \text{ m} \right|}{\text{m}^3 \left| \text{s} \right|} \frac{\text{m.s}}{1.002 \times 10^{-3} \text{ kg}}$$

$$Re = 0.999 \approx 1$$

ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของฟาราฟินส์เหลว

การหาค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของฟาราฟินส์เหลวจะคำนวณเช่นเดียวกับน้ำ โดยมีสมมติฐานคือ ภายในท่อใหญ่มีแต่ฟาราฟินส์เหลวไหลอยู่เท่านั้น และกำหนดค่าคุณลักษณะความยาวเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อใหญ่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.667 มิลลิเมตร คิดเป็นพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 2.183 ตารางมิลลิเมตร

คำนวณที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของฟาราฟินส์เหลว 9.9 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จะได้อัตราเร็วเท่ากับ 1.26 มิลลิเมตรต่อวินาทีแทนค่าลงในสมการ (ข.1)

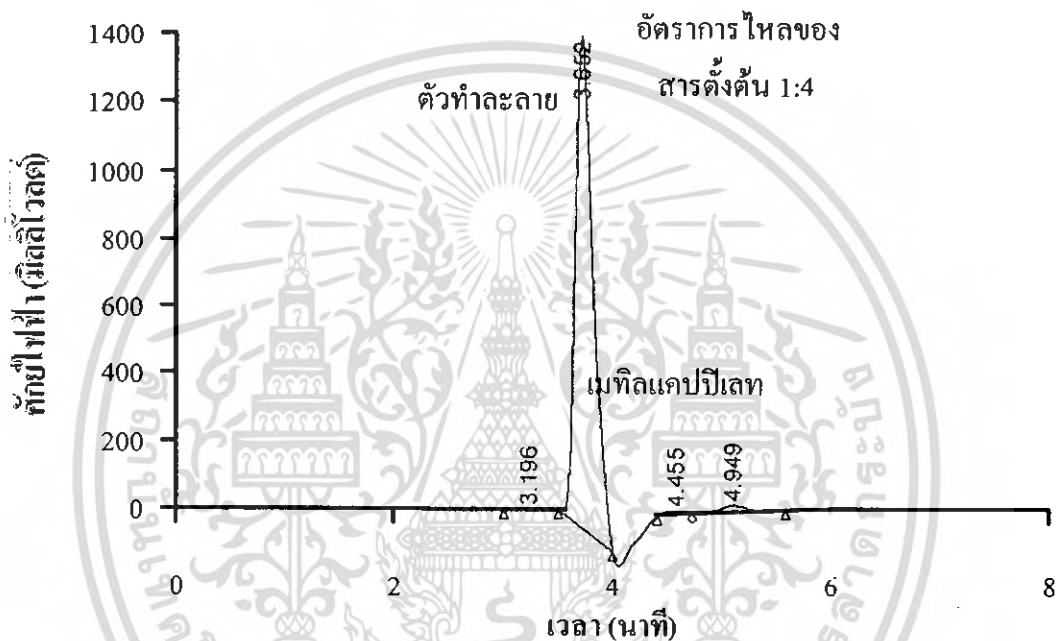
$$Re = \frac{860 \text{ kg} \left| \frac{1.667 \times 10^{-3} \text{ m} \right| \left| \frac{1.26 \times 10^{-3} \text{ m} \right|}{\text{m}^3 \left| \text{s} \right|} \frac{\text{m.s}}{180 \times 10^{-3} \text{ kg}}$$

$$Re = 0.01$$

ภาคผนวก ค

โครมาโตแกรมของเมทิลแคปปีเลทและกราฟมาตรฐานของ
เมทิลแคปปีเลท

รูปที่ ค.1 แสดง โครมาโตแกรมสัดส่วนของอัตราการไหลของกรดออกทาโนอิกต่อเมทานอล 1:4



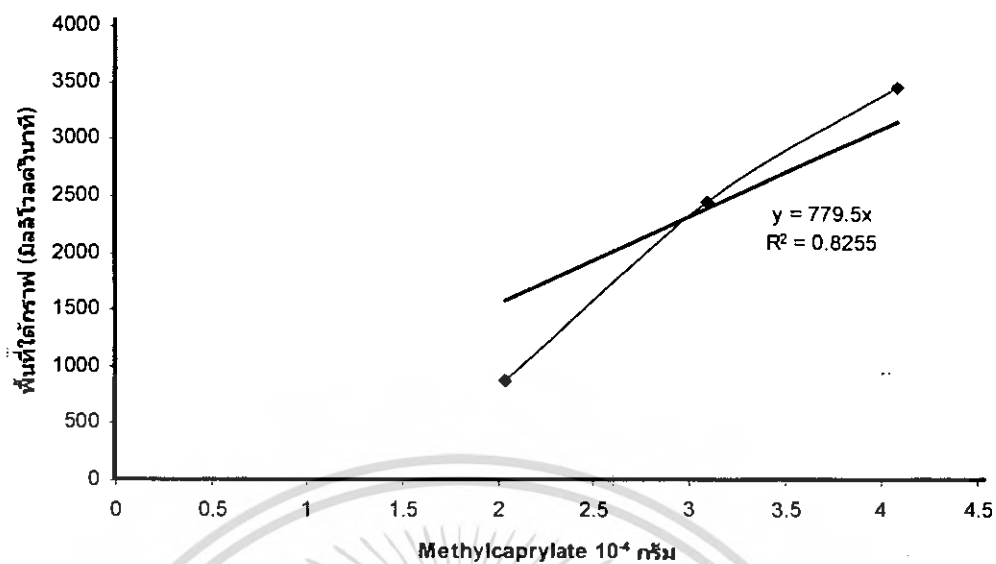
รูปที่ ค.1 HPLC โครมาโตแกรมของเอสเทอร์ที่อุณหภูมิการทำงาน 40 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ค.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟกับปริมาณของเมทิลแคปปีเลทและกราฟมาตรฐานดังรูปที่ ค.2

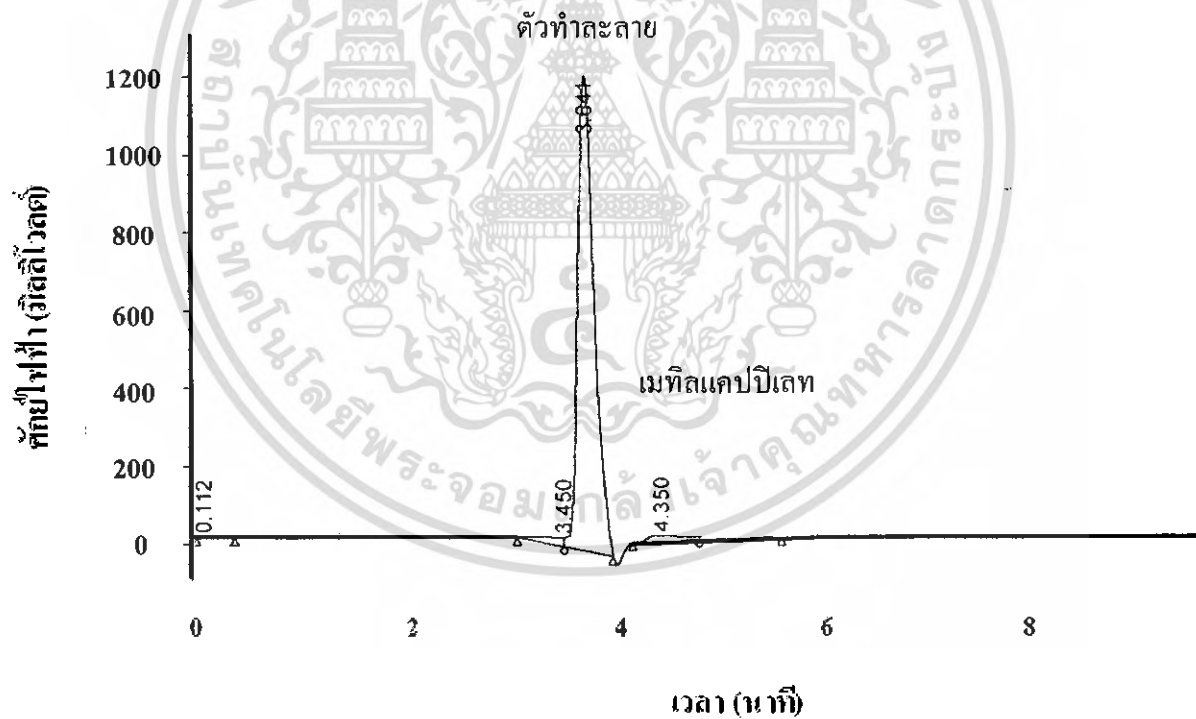
ตารางที่ ค.1 ปริมาณสารเมทิลแคปปีเลทกับพื้นที่ใต้กราฟ HPLC โครมาโตแกรม

ปริมาณสารเมทิลแคปปีเลทที่ใช้ (กรัมต่อสารละลาย 10 มิลลิลิตร)	พื้นที่ใต้กราฟ (มิลลิโวลต์วินาที)	เอสเทอร์ในสารละลาย 20 ไมโครลิตร (10^{-4} กรัม)
0.1015	870.6	2.0306
0.1545	2,471.5	3.0900
0.2037	3,483.5	4.0746

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๒.2 กราฟมาตรฐานของเมทิลแคปรีเลท



รูปที่ ๓.3 HPLC โครมาโตแกรมของเอสเทอร์ที่อุณหภูมิการทำงาน 60 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ผลการทดลอง 3.2

การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร

ตารางที่ ง.1 เปรียบเทียบพื้นที่ได้กราฟกับปริมาณเมทิลแคปปีเลทในสัดส่วนของอัตราการใช้ของกรดออกทานอิกต่อเมทานอลต่างกัน

อัตราส่วน โดยปริมาตร กรดออกทานอิกต่อเมทานอล	พื้นที่ได้กราฟ (mV.s)	ปริมาณเมทิลแคปปีเลท ($\times 10^{-3}$ กรัม)
1:1	139.45	1.79
1:2	173.17	2.22
1:4	201.82	2.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การหาค่าร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานोनิกและ ค่าคงที่สมดุลในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

1. การหาค่าร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานोनิกของกรดออกทานोनิก

พิจารณาที่ระบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 40°C

ดึงสารขาออกที่มาจากเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร 0.2738 กรัม มาเจือจางด้วยอะซิโตน จนได้สารละลาย 10 มิลลิลิตร เพื่อเตรียมสารละลายนี้ไปฉีดในเครื่อง HPLC 20 ไมโครลิตร เมื่อได้โครมาโตแกรมแล้ว สามารถหาปริมาณเอสเทอร์เกิดได้เท่ากับ 2.009×10^{-5} กรัม

$$\begin{aligned} \text{สารละลาย 20 ไมโครลิตร เกิดเอสเทอร์} & 2.009 \times 10^{-5} \text{ กรัม} \\ \text{ถ้าสารละลาย 10 มิลลิลิตร เกิดเอสเทอร์} & \frac{2.009 \times 10^{-5} \times 10 \times 10^{-3}}{20 \times 10^{-6}} \\ & = 1.004 \times 10^{-2} \text{ กรัม} \\ & = 6.357 \times 10^{-5} \text{ โมล} \end{aligned}$$

กำหนด

- $Mw_{\text{กรด}} = 144$, $Mw_{\text{แอลกอฮอล์}} = 32$, $Mw_{\text{เอสเทอร์}} = 158$, $Mw_{\text{น้ำ}} = 18$
- ความหนาแน่นของเมทานอลที่ $25^{\circ}\text{C} = 0.791 \text{ g/ml}$
- ความหนาแน่นของกรดออกทานोनิกที่ $25^{\circ}\text{C} = 0.910 \text{ g/ml}$
- ให้ค่า A_1 เป็นปริมาตรของกรดออกทานोनิกที่เข้าทำปฏิกิริยา
- สัดส่วนอัตราการไหลเชิงปริมาตรของกรดออกทานोनิกต่อเมทานอลคงที่ที่ 1:4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จึงสมมติฐานว่าทุก ๆ ปริมาตรมีอัตราส่วน 1:4 เท่ากันหมด

	CH_3OH	+	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$	\longleftrightarrow	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOCH}_3$	+	H_2O
เริ่มต้น	$\frac{4 \times 0.791 A_1}{32}$		$\frac{1 \times 0.910 A_1}{144}$		0		0
เปลี่ยนไป	6.357×10^{-5}	—	6.357×10^{-5}		6.357×10^{-5}	+	6.357×10^{-5}
สมดุล (ที่เหลือ)	$\frac{C}{32}$		$\frac{D}{144}$		6.357×10^{-5}		6.357×10^{-5}

$$\begin{aligned} \text{สารขาออก} &= \text{เอสเทอร์ที่เกิด} + \text{น้ำที่เกิด} + \text{กรดที่เหลือ} + \text{แอลกอฮอล์ที่เหลือ} \\ 0.2738 &= (2 \times 1.004 \times 10^{-2}) + C + D \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C + D = 0.2537 \text{ กรัม} \quad (\text{ก.1})$$

$$\begin{aligned} \text{คำนวณหาค่า } A_1 \text{ สมการเคมีและสมการ (ก.1) ได้} &= 6.721 \times 10^{-2} \text{ มิลลิลิตร} \\ &= 6.116 \times 10^{-2} \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\text{แสดงว่าใน กรด } 6.116 \times 10^{-2} \text{ กรัม เกิดเอสเทอร์} = 6.357 \times 10^{-5} \text{ โมล}$$

$$\text{สารขาออก } 0.2738 \text{ กรัม มีเอสเทอร์} = 6.357 \times 10^{-5} \text{ โมล}$$

สารขาออกทั้งหมดที่ชั่งน้ำหนักได้ 1.831 กรัม จะมีเอสเทอร์

$$= \frac{6.357 \times 10^{-5} \times 1.831}{0.2738}$$

$$= 4.251 \times 10^{-4} \text{ โมล}$$

$$= 6.717 \times 10^{-2} \text{ กรัม}$$

และคำนวณหาค่า A_2 แต่เปรียบกับสารขาออก 1.831 กรัม แทน จะได้

$$= 0.409 \text{ กรัม}$$

$$= 0.449 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$= 2.840 \times 10^{-3} \text{ โมล}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (2.25) ได้ค่าร้อยละการแปลงผันของกรดออกทานอิก} &= \frac{4.251 \times 10^{-4} \times 100}{2.84 \times 10^{-3}} \\ &= 14.97\% \end{aligned}$$

2. การหาค่าคงที่สมดุล

ค่าคงที่สมดุล, K คำนวณได้จากจากสมการ (2.27 หรือ 2.28)

$$K = \frac{(4.251 \times 10^{-4})^2}{(2.840 \times 10^{-3} - 4.251 \times 10^{-4}) \left(\frac{0.791 \times 4}{32} \times 0.449 - 4.251 \times 10^{-4} \right)}$$

$$K = 0.0017$$

ภาคผนวก ฉ

การคำนวณอัตราเร็วภายในช่องการไหลระดับไมโคร

การศึกษาการผสมภายในช่องการไหลของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครในบทที่ 5 จะใช้อัตราเร็วของสาร ณ ตำแหน่งทางเข้าช่องการไหลเป็นค่าคงสำหรับการคำนวณในสมการนาเวียร์-สโตรค และเพื่อให้สอดคล้องกับการทดลองจึงคำนวณหาอัตราเร็วจากอัตราการไหลของสารที่ป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์และพื้นที่หน้าตัดของช่องปฏิกรณ์ โดยมีการคำนวณดังนี้

จากที่ได้กล่าวไปแล้วเบื้องต้นในบทที่ 5 ช่องการไหลระดับไมโครในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครจะมีทั้งหมด 28 ช่อง โดยแบ่งเป็น 14 ช่องการไหลสำหรับกรดและอีก 14 ช่องการไหลสำหรับกรคอกทาโนอีกและจากรูปที่ 5.2 ขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องการไหลแต่ละช่องเท่ากับ $60 \times 90 \mu\text{m}^2$ และจากการทดลองบทที่ 3 ตอนที่ 3.2 ใช้อัตราการไหลของกรคอกทาโนอีกและเมทานอลเท่ากับ 1.0 และ 4.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ดังนั้นจะสามารถคำนวณอัตราเร็วภายในช่องการไหลแต่ละช่องของสารดังกล่าวได้ดังนี้

สำหรับกรคอกทาโนอีก

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลของกรคอกทาโนอีก} &= \frac{1.0 \text{ ml}}{h} \left| \frac{1}{60 \times 90 \mu\text{m}^2} \right. \\ &= 0.0514 \text{ m/s} \\ \text{และในทำนองเดียวกัน อัตราการไหลของเมทานอล} &= 0.2058 \text{ m/s} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ข

การหาค่าความหนืดและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

การคำนวณค่าความหนืด [6]

อ้างอิง เมทานอลที่ 20 °ซ ความดันบรรยากาศ มีจุดเดือด 64.7 °ซ ความหนาแน่น 0.791 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความหนืด 0.55 เซนติพอยซ์

ในสมการ (2.30)

$$\begin{aligned} \text{อุณหภูมิที่ } 40^\circ\text{ซ จะ ได้ค่าความหนืดเป็น } \eta_L^{-0.2661} &= (0.55)^{-0.2661} + \frac{(40-20)}{223} \\ \eta_L &= 3.476 \text{ cP} \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

กำหนด ตัวถูกละลาย A คือ กรดออกทาโนอิก

ตัวทำละลาย B คือเมทานอล

ถ้าใช้วิธีของ Wilke-chang ในสมการ (2.3)

$$\text{ค่า } \phi_{\text{methanol}} = 1.9 \quad M_B = 32$$

อุณหภูมิที่ 40 °ซ จะ ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เป็น

$$D_{AB} = \frac{7.4 \times 10^{-8} (1.9 \times 32)^{1/2} \times (273.1 + 40)}{3.476 \times \left(\frac{144}{32}\right)^{0.6}} = 2.076 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

ตารางที่ ข.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°ซ)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ D_{AB} (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
40	2.076×10^{-5}
50	2.443×10^{-5}
60	2.859×10^{-5}

ตารางที่ ข.2 ค่าความหนืด ณ อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°ซ)	ค่าความหนืด η_B (เซนติพอยซ์)
40	0.4169
50	0.3657
60	0.3221



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้