

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สรุปรายงานผลการวิจัยสำหรับโครงการวิจัย
จากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์
ประจำปี 2549



การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครสำหรับการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพ
Development of a Micro-Reactor for Biodiesel Synthesis

RCH
TP
359
. B46
ค 857ก

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **84548**
วัน,เดือน,ปี..... **13 ต.ค. 2551**

หัวหน้าโครงการวิจัย **ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์**
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

11๓๑๕๑๒
b.....
i.....

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. หน้าสรุปโครงงาน

การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครสำหรับการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพ Development of a Micro-Reactor for Biodiesel Synthesis

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครที่มีช่องการไหลขนาดพื้นที่หน้าตัด 60×90 ตารางไมครอน โดยอัตราการไหลเชิงปริมาตรของกรดออกทานอิกต่อเมทานอลเท่ากับ 1:4 ในช่วงค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re) น้อยกว่า 10 (-) แสดงถึงลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) จากการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดออกทานอิกและเมทานอลในสัดส่วนดังกล่าวที่อุณหภูมิในช่วง 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส ให้ค่าคอนเวอร์ชันเท่ากับ 15 ถึง 39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ค่าคงที่สมดุลเท่ากับ 1.70×10^{-3} ถึง 1.63×10^{-2} ตามลำดับ ที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 2.07×10^{-9} ถึง 2.86×10^{-9} เมตรต่อวินาที

จากผลการทดลองการผสมที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาแล้วค่าคอนเวอร์ชันจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่มีค่ามากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มค่าคอนเวอร์ชันมีค่าคงที่ประมาณ 22% ทำให้สรุปได้ว่าการแพร่ที่เกิดขึ้นมีอิทธิพลต่อค่าคอนเวอร์ชัน ซึ่งสามารถยืนยันผลการทดลองด้วยการทำแบบจำลองการผสมด้วยโปรแกรม Comsol Multiphysics 3.2a

2. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันน้ำมันเชื้อเพลิง ได้กลายเป็นปัจจัยหลักในการดำรงชีวิตของมนุษย์กันมากขึ้น เนื่องจากน้ำมันได้ถูกนำมาใช้เพื่อประกอบกิจกรรมในด้านต่าง ๆ อย่างมากมาย อย่างไรก็ตามจากสถานการณ์พลังงานที่มีแนวโน้มความต้องการใช้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเติบโตทางเศรษฐกิจจึงส่งผลให้ความต้องการเพิ่มสูงขึ้น จากการทำน้ำมันที่มีอยู่มีปริมาณอย่างจำกัด ทำให้น้ำมันอยู่ในสถานะที่ขาดแคลน จึงได้มีการคิดค้นสิ่งที่สามารถใช้ทดแทนน้ำมันขึ้น

น้ำมันดีเซลชีวภาพหรือไบโอดีเซลเป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่ทำมาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาโดยทั่วไปแล้วน้ำมันดีเซลชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) ระหว่างน้ำมันหรือไขมันที่ได้จากพืชหรือสัตว์กับแอลกอฮอล์ ซึ่งปกติแล้วสารที่มีความหนืดสูง (น้ำมัน) กับสารที่มีความหนืดต่ำ (แอลกอฮอล์) จะมีการผสมและปฏิกิริยากัน ได้ไม่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงต้องมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไป การเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยานี้เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลงจะต้องมีการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจึงจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้บริสุทธิ์ ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่าย

เหตุนี้จึงได้มีการศึกษาการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครเมตร ข้อดีของการผลิตแบบนี้จะใช้เวลาน้อยในการทำปฏิกิริยาให้สมบูรณ์ การผสมและการทำปฏิกิริยาคีขึ้น การควบคุมระบบจะทำได้ง่ายขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้วิธีการผลิตแบบนี้พัฒนาไปสู่การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในระดับอุตสาหกรรมได้ โครงการงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการทำน้ำมันดีเซลชีวภาพแบบเอสเทอร์ โดยเริ่มจากการทดลองทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างแอลกอฮอล์กับกรดน้ำมัน แล้วจึงค่อยพัฒนาไปเป็นปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างแอลกอฮอล์กับเอสเทอร์

3. วัตถุประสงค์

1. เพื่อทราบถึงหลักการพื้นฐานและการใช้เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร (Micro Reactor)
2. เพื่อศึกษาผลของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครต่อการผลิตเอสเทอร์ก่อนนำมาประยุกต์ใช้กับการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
3. เพื่อทราบถึงผลของการทำผสมและทำปฏิกิริยาของสารที่มีความหนืดแตกต่างกันมาก คือแอลกอฮอล์กับกรดน้ำมัน

4. ขอบเขตของงานวิจัย

1. โครงการงานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการเกิดเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร
2. การผลิตเอสเทอร์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร โดยศึกษาถึง ผลของคุณสมบัติทางกายภาพของกรดน้ำมัน ผลของอุณหภูมิ อัตราการไหล และอัตราส่วนของแอลกอฮอล์กับกรดน้ำมัน เพื่อสร้างแบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่เหมาะสมได้

5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. หากผลของการเกิดเอสเทอร์สูง จะมีโอกาสนำมาประยุกต์ใช้เพื่อผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพแบบเอสเทอร์
2. คาดว่าสามารถลดปริมาณการใช้และค่าใช้จ่ายของตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตเอสเทอร์และน้ำมันดีเซลชีวภาพในอนาคตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เพื่อให้สามารถควบคุมปฏิกิริยาได้ง่าย เช่น อุณหภูมิ เนื่องจากหน่วยทำปฏิกิริยามีขนาดเล็ก
4. พัฒนานักวิจัยให้มีความรู้ความสามารถ มีความคิดสร้างสรรค์และนำความรู้ที่มีมาประยุกต์ใช้ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ

6. คำสำคัญของเรื่องที่ทำกรวิจัย

เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน แบบจำลองการไหล

7. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

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

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



7.1 ตัวแปรของกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ตัวแปรที่สำคัญในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ส่งผลกับเวลาและ ค่าคอนเวอร์ชัน (Conversion) [2] คือ

- อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับอุณหภูมิอย่างมากแต่ถ้าหากมีเวลาที่เพียงพอ ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้แม้ในอุณหภูมิห้อง โดยทั่วไปจะถูกควบคุมให้มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับจุดเดือดของเมทา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำหน้าใบแจ้งเบาะเรียนดำเนินการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอล (60 ถึง 70 °ซ) ที่ความดันบรรยากาศซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรง แต่ต้องทำการกำจัดกรดไขมันอิสระออกจากร้าน้ำมัน โดยการสกัดหรือ ฟรีเอสเทอร์ฟิเคชัน (Pre-Esterification) แต่ไม่ต้องปรับปรุงสภาพก่อน (Pre-Treatment)

- อัตราส่วนแอลกอฮอล์กับน้ำมัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ซึ่งตามมวลสารสัมพันธ์ต้องการ 3 โมลของแอลกอฮอล์ ต่อ 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์ จะได้ 3 โมลของเอสเทอร์ และ 1 โมลของกลีเซอริน ถ้าต้องการให้ปฏิกิริยาไปทางขวา อาจใช้แอลกอฮอล์มากเกินไปในการทำปฏิกิริยา หรือทำการดึงผลิตภัณฑ์ตัวหนึ่งออกไป ซึ่งในกรณีหลังทำได้ยากเนื่องจากเป็นของผสม เมื่อใช้เมทานอลเกินพออัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมากขึ้น แต่อัตราส่วนแอลกอฮอล์ที่มากขึ้นทำให้การแยกกลีเซอรินทำได้ยาก

- ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีทั้งต่าง กรด และเอนไซม์ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด ได้แก่ กรดกำมะถัน กรดฟอสฟอริก กรดเกลือกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง (อัลคอกไซด์ของโลหะอัลคาไล) เช่น ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างให้ผลในการเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่าตัวเร่งชนิดกรดประมาณ 4,000 เท่า ในปริมาณเท่ากัน [2, 8] จึงเป็นที่นิยมใช้ต่างในการทำปฏิกิริยาทรานส์เมทิลเลชัน นอกจากนี้ต่างมีการกัดกร่อนเครื่องมือในอุตสาหกรรมน้อยกว่ากรด ที่ความเข้มข้นของค่าที่ใช้อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ผลถึง 94 ถึง 99 เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชัน การเพิ่มความเข้มข้นต่างที่มากกว่านี้ ไม่ทำให้ค่าคอนเวอร์ชันเพิ่มขึ้น และยังเพิ่มค่าใช้จ่ายมากขึ้น

- การผสม

ปัจจัยที่มีความสำคัญของการบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันคือองศาการผสมระหว่างแอลกอฮอล์กับไตรกลีเซอไรด์ เนื่องจากการแยกชั้นเพราะละลายเข้ากันไม่ได้ ดังนั้นการผสมจึงมีบทบาทที่สำคัญที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน สำหรับการผลิตในขนาดใหญ่การออกแบบผลของการผสมจึงมีความสำคัญมาก เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีสารตั้งต้นมีธรรมชาติที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกิดขึ้นได้ที่ระหว่างผิวสัมผัสของของเหลว อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นได้ช้า

7.2 เครื่องปฏิกรณ์ [2]

- เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch Reactor)

สารตั้งต้น (Reactant) ทั้งหมด ถูกป้อนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ไว้ก่อนแล้วจึงเริ่มปฏิกิริยาเมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนดจึงนำของผสม (ผลิตภัณฑ์ที่ได้กับสารทำปฏิกิริยาที่เหลืออยู่)

แยกออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งโดยทั่วไปเป็นแบบถังกวน เมทานอล ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous Reactor)

สารทำปฏิกิริยาถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไหลออกตรงทางออก ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้มีทั้งแบบถังกวนและแบบท่อ

ในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนผสมต่อเนื่อง (Continuous Stirred-Tank Reactor, CSTR) นั้นเนื่องจากตามทฤษฎีมีการผสมกันดีมาก ความเข้มข้นเท่ากันที่ทางเข้าและทางออก อัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นขึ้นกับความเข้มข้น จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ช้าที่ ค่าคอนเวอร์ชันสูง ส่วนเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อนั้น ที่พื้นที่หน้าตัดเดียวกันจะมีความเข้มข้นเท่ากัน โดยความเข้มข้นสารตั้งต้นลดลงตามความยาวในแกนไหล ดังนั้นในตอนต้นจะมีความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงและลดลงเรื่อยๆ ค่าคอนเวอร์ชันจึงขึ้นกับความยาวของเครื่องปฏิกรณ์

โดยทั่วไปการผลิตในอุตสาหกรรมที่ต้องการการผลิตจำนวนมาก จะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอยู่ในสถานะคงตัว (Steady State) ทำให้ควบคุมได้ง่าย ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสม่ำเสมอ นอกจากนั้นยังช่วยลดขั้นตอนการถ่ายเทสารทำปฏิกิริยาเข้า-ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งต้องทำในกรณีแบบกะออกไปได้ จึงประหยัดค่าใช้จ่ายด้านแรงงาน นอกจากนี้กระบวนการแบบกะต้องการปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นจึงต้องการเงินลงทุนสูงกว่า มีความแตกต่างในทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในแต่ละกะ

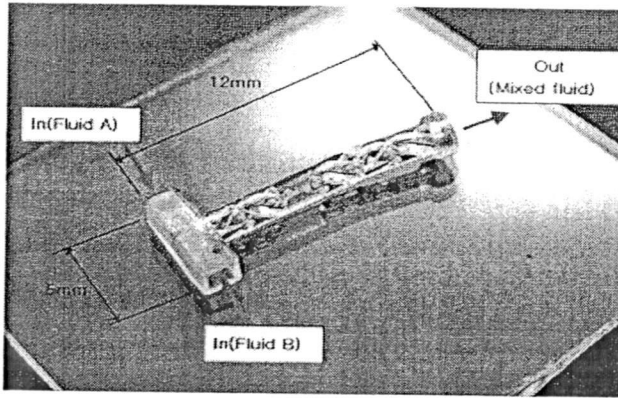
- เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องและแบบท่อ

โดยทั่วไปแล้วเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อมีความต้องการขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เล็กกว่าแบบถังกวนต่อเนื่องที่ ค่าคอนเวอร์ชันเดียวกัน ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อคือ การผสมในท่อสำหรับระบบหลายวัฏภาค (Multiphase) ส่วนเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องนั้นจะได้ค่าคอนเวอร์ชันที่ไม่สูง แม้จะมีการผสมที่ดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเนื่องจากความเข้มข้นที่ต่ำ

7.3 เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ (Static Mixer)

คือ อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการผสมที่อยู่กับที่ไม่ต้องใช้หน่วยขับเคลื่อนใดๆ อาศัยอัตราไหลของของไหลและวัสดุกันภายในท่อทำให้ของไหลไหลสลับกันไปมาระหว่างกลางท่อและผนังท่อทำให้เกิดการผสมอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถนำมาแก้ปัญหาในกระบวนการผสมได้

เมื่อนำเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่มาใช้ในการผสมทำให้เพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ถึง 400% ประหยัดพลังงานและสามารถใช้กับของไหลที่มีความหนืดสูงได้ ทำให้ประหยัดในการติดตั้งและค่าบำรุงรักษาขณะใช้งาน ตลอดจนมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมเหมืองแร่ การผลิตสี และเรซิน การผลิตอาหารและยา โพลีเมอร์และพลาสติก และการบำบัดน้ำเสีย



รูปที่ 1 เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่

7.4 ความรู้พื้นฐานทางฟิสิกส์และเคมีของอุปกรณ์ระดับไมโคร [3]

- การลดลงของอุปกรณ์กระบวนการ

สิ่งที่เห็นได้ชัดเจนของการผลิตที่ย่อขนาดลงมาก คือ พฤติกรรมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดตามกฎฟิสิกส์ ที่มักจะสมมติให้มีลักษณะที่ปกติของการไหล เช่น สมมติให้มีการไหลแบบราบเรียบ เป็นต้น การถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ดังเช่นเมื่อขนาดของช่องการไหลหรือเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครมีขนาดลดลง สัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรจะเพิ่มมากขึ้นและระยะทางเฉลี่ยของปริมาตรของไหลต่อผนังของถังปฏิกรณ์หรือต่อของไหลอีกชนิดหนึ่งจะลดลง เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่ผนังช่องการไหลหรือกับของไหลอีกชนิดเพิ่มมากขึ้นดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบเครื่องผสมขนาดทั่วไปกับขนาดไมโคร

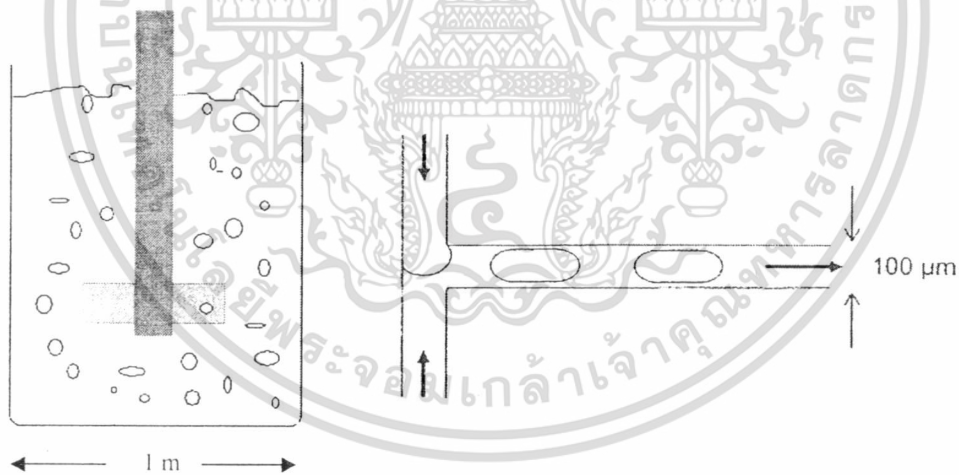
ตัวแปร	เครื่องผสมขนาดทั่วไป	เครื่องผสมระดับไมโคร
ความดัน	ต่ำ	สูง
เวลา (τ)	นาน	สั้น
การถ่ายเทความร้อนและมวล	ต่ำ	สูง
ความปลอดภัย	ต่ำ	สูง
ผลผลิตของผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพของกระบวนการ	ต่ำ	สูง
ของเสีย	สูง	ต่ำ
การซ่อมบำรุง	สะดวก	ลำบาก

โดยทั่วไปแล้วเมื่อของไหลถูกทำในช่องว่างที่จำกัด ปรากฏการณ์สองชนิดที่เกิดขึ้น คือ ผลกระทบจากพื้นผิวและปริมาตร ตัวอย่างของผลกระทบจากพื้นผิวคือการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับเป็นเอกสารเชิงพาณิชย์ การค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบวิวิธพันธ์ จะเกิดขึ้นที่ผนังของถัง ขณะที่การเคลื่อนที่ของของไหลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเป็นผลกระทบจากปริมาตร กล่าวโดยสรุปว่าผลจากพื้นผิวมีความสำคัญเปรียบเทียบกับผลของปริมาตรได้เมื่อขนาดของถังปฏิกรณ์ลดลง แต่การลดขนาดลงจะส่งผลกระทบต่อระยะทางการแพร่ลดลง พื้นผิวสัมผัสระหว่างของไหลและลำดับของความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

- อิทธิพลของขนาดที่ลดลงเกี่ยวกับแรงของการเคลื่อนตัวของของไหล

ปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ระหว่างเทคโนโลยีแบบดั้งเดิมกับเทคโนโลยีระดับไมโครจะช่วยในการเปรียบเทียบลักษณะกระบวนการได้ ในกระบวนการเทคโนโลยีแบบดั้งเดิม ถึงปฏิกรณ์เป็นถึงกวนที่ใช้สำหรับปฏิริยาระหว่างของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว เมื่อมีเป้าหมายเพื่อผสมก๊าซกับของเหลว ใบกวนจะมีที่พ่นก๊าซสำหรับทำให้เกิดฟองก๊าซ จากรูปที่ 2.2 แสดงภาพจำลองของถังกวนและเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร จากรูป 2.2 ข ซึ่งใช้ได้กับปฏิริยาระหว่างของเหลวกับของเหลว และของเหลวกับก๊าซขึ้นกับชนิดของสารป้อนเข้าที่ทางเข้าของเครื่องปฏิกรณ์ ในรูปชี้ให้เห็นการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซผ่านช่องการไหลเพื่อทำปฏิริยา ในทางตรงกันข้ามกับเทคโนโลยีแบบดั้งเดิมที่เป็นกระบวนการแบบกะแต่ในถึงปฏิกรณ์ระดับไมโครเป็นการไหลแบบต่อเนื่อง



(ก.) ถังกวนขนาดทั่วไป

(ข.) เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครรูปตัวที

รูปที่ 2 แสดงลักษณะผลของการกระจายตัวและสภาพหยด

โดยทั่วไปแล้วจะมีความแตกต่างของปรากฏการณ์การไหล การถ่ายเทความร้อนและมวลสารเกิดขึ้นมากมายในระหว่างปฏิริยาของของเหลวกับของเหลวหรือก๊าซกับของเหลว อย่างเช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของปรากฏการณ์การไหลในสารละลายแต่ละวิภาคหรือระบบของอากาศกับน้ำ ซึ่งจุดประสงค์หลักก็คือการหากฎการเปลี่ยนขนาด (Scaling Laws) เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของอุปกรณ์กระบวนการ

สารที่ใช้ศึกษาที่เป็นวิภาคของเหลวคือน้ำ ที่สภาวะ 20 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ สำหรับวิภาคก๊าซจะเป็นอากาศภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยความเร็ว (Velocity Scale, u) เป็น 1 เมตรต่อวินาทีสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนและ 0.01 เมตรต่อวินาทีสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครเมตร ปริมาณสารที่นำมาวิเคราะห์จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของความยาว (L) ของเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองชนิด สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครมีค่าคงที่เท่ากับ 100 ไมครอน เมื่อน้ำและอากาศไหลมาผสมกันจะให้ความยาวอวกาศลักษณะหนึ่ง คือ ความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางฟองอากาศ คุณลักษณะของเส้นผ่านศูนย์กลางฟองอากาศของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนที่มีกำลังการกวนสูงสุดได้ขนาดประมาณ 500 ไมครอน ในขณะที่เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร โดยทั่วไปแล้วจะมีขนาดของฟองอากาศเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหล

จากตารางที่ 2 แสดงกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่บอกถึงลักษณะการไหลทั้งในเครื่องปฏิกรณ์ระดับมาโครและเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร มิติของรูปทรงเป็นความยาว L (1 เมตรและ 100 ไมครอน) การประมาณค่าของบอนด์นัมเบอร์ (Bond Number) จากตารางทั้งของเครื่องปฏิกรณ์ระดับมาโครและไมโครสามารถตั้งแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแรงตึงผิว อย่างไรก็ตาม ฟรูดนัมเบอร์ (Froude Number) ซึ่งให้เห็นว่าแรงโน้มถ่วงมีอิทธิพลเหนือกว่าแรงเฉื่อย ซึ่งถ้านำบอนด์นัมเบอร์หารด้วยฟรูดนัมเบอร์จะได้ตัวแปรไร้มิติอีกตัว คือ เวเบอร์นัมเบอร์ (Weber Number) เพราะฉะนั้นสำหรับช่วงการไหลของก๊าซกับของเหลวจะมีแรงตึงผิว แรงโน้มถ่วง และแรงเฉื่อยเหมือนกันของเครื่องปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิด ส่วนแรงหนืด (Viscous Force) แสดงในแคปิลลารีนัมเบอร์ (Capillary Number) ซึ่งมีความสำคัญเช่นเดียวกับแรงโน้มถ่วงในเครื่องปฏิกรณ์

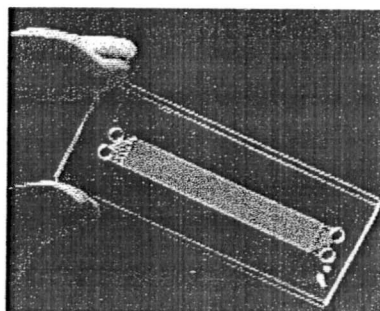
ความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนและเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครก็คือค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างแรงเฉื่อยกับแรงหนืด เรย์-โนลด์นัมเบอร์เป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ใช้ได้ทั้งการไหลของสารวิภาคเดียวและสองวิภาค ในเครื่องปฏิกรณ์ระดับมาโคร แรงหนืดสามารถตั้งได้เมื่อเปรียบเทียบกับแรงเฉื่อยแต่ไม่ใช่ในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร ซึ่งการไหลในอุปกรณ์ระดับมาโครส่วนใหญ่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนขณะที่การไหลในอุปกรณ์ระดับไมโครจะเป็นแบบราบเรียบ

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบกลุ่มตัวแปรไร้มิติระหว่างภายในเครื่องปฏิกรณ์ระบบมาโคร 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

7.5 การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพกับไมโครเทคโนโลยี

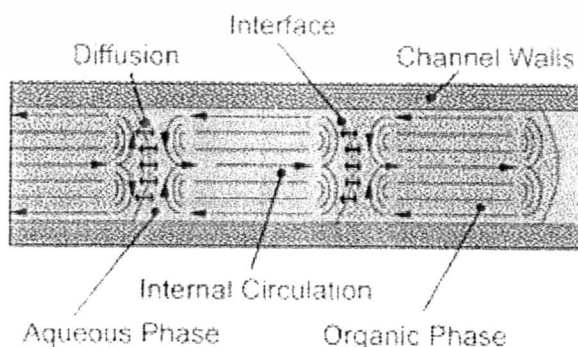
การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันกับแอลกอฮอล์โดยปกติทั่วไปแล้วจะต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากปกติแล้วสารที่มีความหนืดสูง (น้ำมัน) กับสารที่มีความหนืดต่ำ (แอลกอฮอล์) จะมีการผสมและปฏิกิริยากันได้ไม่ดีจึงต้องมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไป การเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยานี้เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลงจะต้องมีการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจึงจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้บริสุทธิ์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



รูปที่ 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 และหากนำการ์ดนี้มาเรียงขนานกัน โดยจัดให้มีขนาดเท่ากับกระเป๋าดินทางขนาดย่อม ๆ ก็จะสามารถผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้มากถึงปีละนับแสนแกลลอน

จากที่ทราบน้ำมันดีเซลชีวภาพเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน ในเทคนิคแบบดั้งเดิมได้ใช้กำลังงานช่วยในการผสมระหว่างเฟส โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร ใช้การลดระยะทางการแพร่ลง และทำให้เกิดการพาและการแพร่ขึ้นในช่องปฏิกรณ์ กลไกการพาและการแพร่ที่เกิดขึ้นในช่องปฏิกรณ์ (Reactor Channel) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 4 กลไกการเคลื่อนที่และการแพร่ของของไหลในท่อระดับไมโคร [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4 แสดงกลไกการพาและการแพร่ที่เกิดขึ้นในช่องปฏิกรณ์ โดยจากรูปเป็นสารสองชนิดที่เป็นสารละลายกับสารอินทรีย์ซึ่งไม่ละลายซึ่งกันและกัน ของเหลวทั้งสองชนิดนี้จะไหลสลับกันเป็นช่วง ๆ ตามช่องการไหลและไหลจากซ้ายไปขวา ในขณะที่ของเหลวไหลนั้นบริเวณผิวสัมผัสของของเหลวทั้งสองชนิดจะมีการแพร่เกิดขึ้น และภายในแต่ละวัฏภาคเองจะเกิดการหมุนเวียนสารจากผิวด้านนอกเข้ามาด้านในตัวของสารเองทำให้เกิดการพาสารอีกชนิดหนึ่งที่แพร่เข้ามายังด้านในอีกวัฏภาคได้

เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครมีหลายชนิดและสามารถช่วยแก้ปัญหาความหนืดสูงในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้ โดยอาศัยข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร คือ ระยะทางของการถ่ายเทมวลสั่นลง และพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสูงขึ้น ได้การผสมที่รวดเร็วโดยปราศจากการแยกกระจายตัวออก การไหลในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) เกิดความดันตกน้อยถ้าเป็นท่อเรียบ และสามารถควบคุมอุณหภูมิ ความดันง่าย ที่สำคัญเกิดของเสียหรือได้ผลิตภัณฑ์ต่ำกว่ามาตรฐานน้อยลง แต่ได้ผลผลิตสูงขึ้น

8. การทดลอง

การทดลองส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย คือ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของสารที่มีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันในช่องการไหลระดับไมโครและความเป็นไปได้ของการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร โดยการศึกษาปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน ซึ่งการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

8.1 การเกิดปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร

การทดลองนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันของออกทานอิกและเมทานอลโดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

- 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)

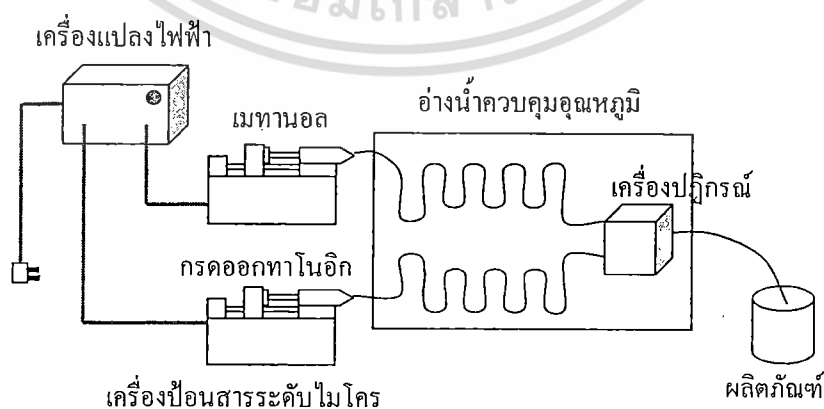
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุปกรณ์การทดลอง

1. กระจกตวง (Graduated Cylinder)
2. บีเปตพร้อมลูกยางแดง (Pipette & Bulb)
3. ปีกเกอร์ (Beaker)
4. หลอดฉีดยา (Syringe)
5. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask)
6. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask)
7. สายยาง
8. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath)
9. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า (Analytical Balance)
10. เครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครแบบไหลตามกัน
11. เครื่องป้อนสารระดับไมโคร (Microfeeder) และเครื่องแปลงไฟฟ้า
12. เครื่องไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิกวิดโครมาโตกราฟ (High Performance Liquid Chromatograph: HPLC)

- วิธีการทดลอง

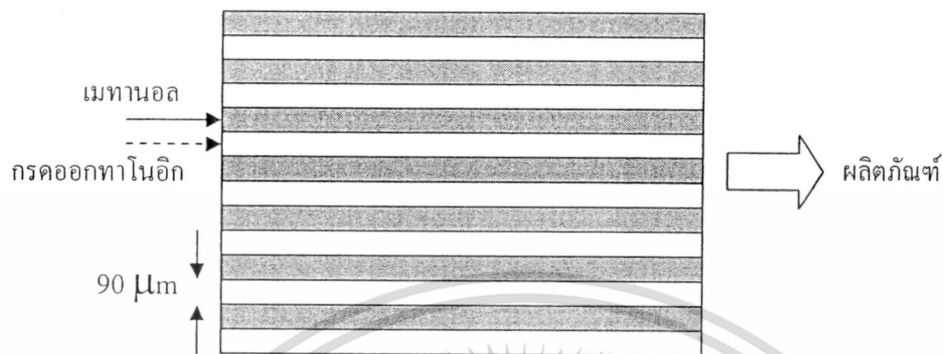
1. การเตรียมสารตั้งต้นสำหรับทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน คือ กรดออกทานอิกและเมทานอลลงในหลอดฉีดยาและใส่ฟองอากาศออกให้หมด
2. จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 5 โดยต่อสายยางจากหลอดฉีดยาตั้งต้นทั้งสองชนิดเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครแบบไหลตามกัน และต่อสายยางเพื่อนำผลิตภัณฑ์ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ พร้อมเปิดเครื่องป้อนสารและใส่ฟองอากาศออก เปิดอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5 ชุดอุปกรณ์การทดลองการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณการเกิดปฏิกิริยาซึ่งการไหลของกรดออกทานอิกและเมทานอลจะเป็นการไหลแบบราบเรียบสลับควบคู่กันไปจนถึงบริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ และปรับเปลี่ยนสัดส่วนอัตราการไหลของกรดออกทานอิกต่อเมทานอลต่าง ๆ ที่ 40 องศาเซลเซียสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำสารผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณของเอสเทอร์โดยใช้เครื่อง HPLC



รูปที่ 7 บริเวณการเกิดปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร

และสมการเคมีของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ดังนี้



ผลของสัดส่วนสารตั้งต้นต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

ผลการศึกษการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครแบบไหลตามกันที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้อัตราการไหลของกรดออกทานอิกคงที่เท่ากับ 3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงและอัตราการไหลของเมทานอลตั้งแต่ 3 ถึง 12 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณของเมทิลแคปปีเลทด้วยเครื่อง HPLC และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชัน และค่าคงที่สมดุล ดังแสดงในตาราง 4

ตารางที่ 4 ผลของสัดส่วนอัตราการไหลของกรดออกทานอิกต่อเมทานอลในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่ 40 °ซ

อัตราส่วน โดยปริมาตร กรดออกทานอิกต่อเมทานอล	ค่าคอนเวอร์ชัน (%)	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}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่ 40 องศาเซลเซียสในสัดส่วนอัตราการใช้ไฮลเชิง ปริมาตรของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน แนวโน้มการเพิ่มสัดส่วนอัตราการใช้ไฮลของกรดออกทานอิกต่อ เมทานอลมากขึ้นจะได้คอนเวอร์ชันเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของเมทานอล ซึ่งเป็นการเพิ่มสารตั้งต้นทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าคงที่สมดุลเพราะค่า สมดุลแสดงถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา

ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

จากข้อมูลข้างบนการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่ 40 °ซ ที่สัดส่วนอัตราการใช้ไฮลเชิง ปริมาตรของสารตั้งต้นกรดออกทานอิกต่อเมทานอลที่ 1:4 นั้นให้ค่าคอนเวอร์ชันสูงกว่าสัดส่วน อื่น ๆ จึงได้นำสัดส่วนดังกล่าวนี้มาปรับค่าอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาใหม่ เพื่อศึกษาผลของ อุณหภูมิ โดยควบคุมอุณหภูมิทั้งหมด 3 ค่า คือ 40 °ซ 50 °ซ และ 60 °ซ และได้มีการปรับปริมาตร ทั้งกรดออกทานอิกและเมทานอลเป็น 1 และ 4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงตามลำดับ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ ที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณของเมทิลแคปปีเลทโดยเครื่อง HPLC และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์คอน เวอร์ชัน และดังตารางที่ 5 ค่าคอนเวอร์ชันที่ได้อยู่ในช่วง 15 ถึง 39 เปอร์เซ็นต์และค่าคงที่สมดุล อยู่ ระหว่าง 1.7×10^{-3} ถึง 16.3×10^{-3}

ตารางที่ 5 ผลของอุณหภูมิต่อค่าคอนเวอร์ชันและค่าคงที่สมดุลในสัดส่วน อัตราการใช้ไฮลเชิงปริมาตรของกรดออกทานอิกต่อเมทานอล 1:4

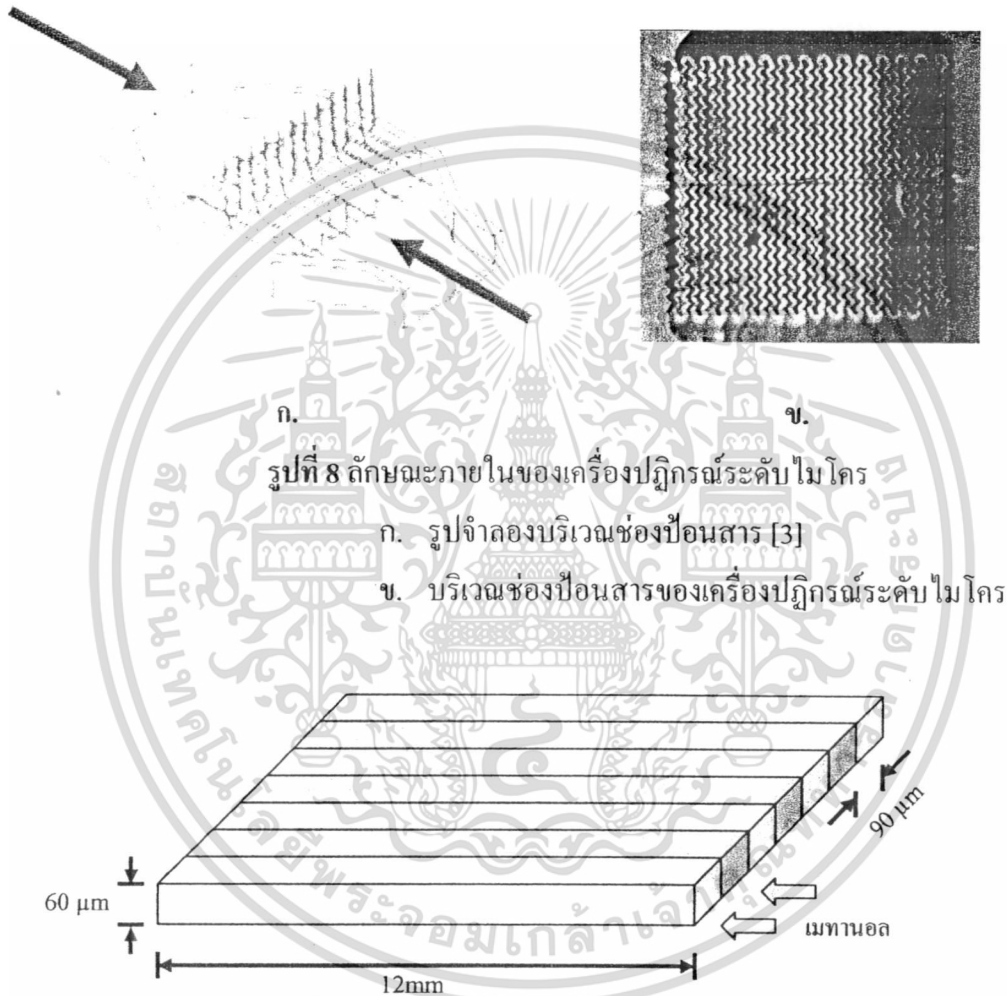
อุณหภูมิ (°ซ)	ค่าคอนเวอร์ชัน (%)	ค่าคงที่สมดุล
40	15	1.70×10^{-3}
50	26	5.76×10^{-3}
60	39	16.31×10^{-3}

9.2 แบบจำลองการผสมในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร

จากผลการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างเมทานอลกับกรดออกทานอิก ในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครดังที่ได้แสดงในข้างต้น ทำให้สามารถพัฒนาแบบจำลองการไหล และการผสมที่เกิดขึ้นในช่องระดับไมโครเพื่ออธิบายผลของสัมประสิทธิ์การแพร่ที่มีผลต่อการ เกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์นี้ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Comsol Multiphysics 3.2a

การสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ศึกษาการแพร่ที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลระดับไมโคร จะ พิจารณาจากรูปแบบการไหลที่เกิดในช่องระดับไมโครซึ่งเป็นการไหลแบบราบเรียบ ลักษณะของ ช่องป้อนสารในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครนี้แสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งจะเห็นว่าสารตั้งต้นป้อนเข้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์ การค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องปฏิกรณ์ในทิศทางตรงกันข้ามกันภายในช่องการไหลระดับไมโครสลับกันไป เมื่อป้อนสารเข้าเครื่องปฏิกรณ์ในทิศทางตามลูกศร สารจะเข้ามาบรรจบกันบริเวณตรงกลางและไหลขึ้นทางด้านบนเข้าช่องการไหลระดับไมโคร โดยมีติของช่องการไหลมีจะหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้งหมด 28 ช่องเรียงต่อกัน โดยแบ่งเป็น 14 ช่องสำหรับกรดออกทานอิกและอีก 14 ช่องเป็นเมทานอลสลับกันไป แต่เนื่องจากช่องมีรูปแบบซ้ำกันจึงจำลองเพียง 7 ช่องหรือ 1 ใน 4 ของช่องทำปฏิกิริยาทั้งหมด แสดงแบบจำลองช่องการไหลนี้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ช่องทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร

เนื่องด้วยช่องทำปฏิกิริยามีขนาดระดับไมโคร ทำให้มีระยะเวลาของสารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์น้อยมาก คือ ประมาณ 1.28 วินาที เพื่อให้ง่ายแก่การคำนวณจึงกำหนดให้ภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่มีการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดขึ้น แต่จะช่วยให้เกิดการผสมระหว่างเมทานอลกับกรดออกทานอิก และหลังจากสารตั้งต้นออกจากช่องการไหลระดับไมโครจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นในท่ออย่างที่นำสารออกจากเครื่องปฏิกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งในปัจจัยที่ช่วยทำให้ปฏิกิริยาเกิดดีขึ้น คือ การสัมผัสกันระหว่างสารตั้งต้นทั้งหมด ซึ่งคาดว่า การถ่ายเทมวลของสารเกิดมากเช่นกัน ในการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร การถ่ายเทมวลของสารจากกรดอกทาทาโนอีกไปยังเมทานอลหรือจากเมทานอลไปยังกรดอกทาทาโนอีก ได้รับอิทธิพลจากการแพร่มากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิ เพื่อลดความหนืดของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา

โดยทั่วไปการไหลที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลระดับไมโครเป็นการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งเกี่ยวข้องกับตัวแปรไร้มิติคือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ [3] โดยปกติแล้วการไหลในช่องแคบจะมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำและเป็นการไหลแบบราบเรียบ ดังสมการ (1)

$$Re = \frac{\rho dv}{\mu} \quad (1)$$

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

$$D_h = \frac{4A}{U} \quad (2)$$

สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม จะได้

$$D_h = \frac{2ab}{(a+b)} \quad (3)$$

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

จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกในสมการที่ 2 แทนในสมการที่ 1 ได้โดย

$$d = D_h \quad (4)$$

ดังนั้นจะได้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของช่องการไหลของเมทานอลดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นหน้าใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$-\nabla \cdot \eta(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} + \nabla p = 0 \quad (5)$$

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

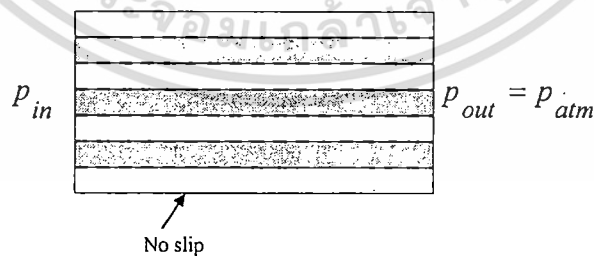
- เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น (น้ำหนักต่อปริมาตร)
 \mathbf{u} คือ เวกเตอร์ความเร็ว (ระยะทางต่อเวลา)
 η คือ ความหนืด (น้ำหนักต่อระยะเวลาต่อเวลา)
 p คือ ความดัน (แรงต่อพื้นที่)

การผสมภายในช่องปฏิกรณ์ระดับไมโครนี้กรดออกทานอกก็จะมี ความเข้มข้นและปริมาณ น้อยมากเมื่อเทียบกับเมทานอลที่ป้อนเข้า จึงสามารถใช้กฎของฟิคส์ (Fick's Law) ในการอธิบาย การแพร่ภายในช่องแคบนี้ได้ สมการดุลมวลสำหรับตัวถูกละลายนี้ใช้ในเทอมการพาและการแพร่ (Convection – Diffusion Mode ในโปรแกรมสำเร็จรูป Comsol Multiphysics 3.2a) มีสมการดังนี้

$$-\nabla \cdot (D\nabla c + c\mathbf{u}) = 0 \quad (6)$$

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

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการคำนวณปรากฏการณ์การแพร่ที่เกิดขึ้นในช่องการไหลระดับไมโครจะเป็นการประยุกต์ใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์ [12] ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 เงื่อนไขขอบเขตของช่องการไหลสำหรับสมการนาเวียร์-สโตกส์

ณ ตำแหน่งหน้าตัดทางเข้าและทางออกจากช่องปฏิกรณ์ ความเร็วจะตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของช่องปฏิกรณ์

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{t} = 0 \quad (7)$$

$$p = p_i \quad \text{เมื่อ } p_i \text{ คือ ความดัน} \quad (8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้อัตราเร็วที่ตำแหน่งทางเข้าของเมทานอลและกรดออกทานอิกเป็นค่าคงที่และสามารถดูวิธีการคำนวณในภาคผนวก ฉ ขณะที่ให้ความดันที่ตำแหน่งทางออกจากช่องปฏิกรณ์เป็นความดันบรรยากาศ ส่วนที่ผนังภายในช่องปฏิกรณ์ให้อัตราเร็วการไหลของสารเป็นศูนย์ในทุกทิศทาง (No slip)

$$(u_x, u_y, u_z) = (0, 0, 0) \quad \text{ที่ผนังช่องปฏิกรณ์} \quad (9)$$

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

และเงื่อนไขขอบเขตสำหรับอุณหภูมิ

$$c = c_{O0} \quad \text{ที่ช่องทางเข้ากรดออกทานอิก} \quad (10)$$

$$c = c_{M0} \quad \text{ที่ช่องทางเข้าเมทานอล}$$

เมื่อ c คือ ความเข้มข้น (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)

c_{O0} คือ ความเข้มข้นของกรดออกทานอิกที่ทางเข้าช่องการไหล (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)

c_{M0} คือ ความเข้มข้นของกรดออกทานอิกที่ทางเข้าช่องการไหล (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)

ที่ผนังของช่องปฏิกรณ์ขอบเขตเงื่อนไขจะเป็นแบบไม่มีการแพร่หรือการเปลี่ยนแปลงของโมลสาร

$$(-D\nabla c + cu) \cdot n = 0 \quad \text{ที่ผนังช่องปฏิกรณ์} \quad (11)$$

เมื่อ n คือ จำนวนโมลของเมทานอล

สมการสถานะนี้ ฟลักซ์ที่ตั้งฉากกับขอบเขตจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และเงื่อนไขที่ตำแหน่งทางออก การเคลื่อนที่ของสาร โดยการพาจะมีมากกว่าการแพร่ที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดทางออกของช่องปฏิกรณ์ ซึ่งแสดงดังสมการ (12) สมการนี้แสดงให้เห็นความแตกต่างของความเข้มข้นของเมทานอลในทิศทางการไหลที่ตำแหน่งทางออก

$$(-D\nabla c + cu) \cdot n = cu \cdot n \quad \text{ที่ทางออก} \quad (12)$$

การหาเกณฑ์บ่งชี้ประสิทธิภาพของการผสม [13]

การกำหนดเกณฑ์ที่จะใช้เป็นค่าบ่งชี้ประสิทธิภาพการผสมเชิงปริมาณในของเหลว 2 ชนิดภายในเครื่องผสมระดับไมโครจะใช้ความเป็นเนื้อเดียวกันของระดับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในตัวทำละลาย โดยการวัดความเบี่ยงเบนของความเข้มแต่ละตำแหน่งของบริเวณที่

สนใจขนาดเล็ก (I) ในการศึกษา เราเลือกใช้ค่าความเข้มเฉลี่ย (I_{mean}) เป็นค่าอ้างอิงของการผสม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เป็นเนื้อเดียวกันเพื่อที่จะอธิบายการผสมที่มีความสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงได้กำหนดเกณฑ์ใช้วัดที่
แก้ไขแล้ว C_{dev} เป็นค่าบ่งชี้ ดังนี้

$$C_{dev} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - I_{mean})^2} \quad (13)$$

เมื่อ N คือ ค่าจำนวนตำแหน่งของบริเวณที่สนใจขนาดเล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์ และเพื่อให้
ได้ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผสมภายในช่วงเงื่อนไขที่กำหนด คือ การกระจายของความ
เข้มข้นตลอดความยาวตามทิศทางไหลของช่องปฏิกรณ์ตั้งแต่ตำแหน่งหน้าตัดทางเข้าจนกระทั่ง
ถึงตำแหน่งใด ๆ ค่า C_{dev} จะปรับให้เป็นบรรทัดฐานสุดท้ายสำหรับเปรียบเทียบ C_{mix} ดังนี้

$$C_{mix} = \frac{(C_{dev_inlet} - C_{dev_outlet})}{C_{dev_inlet}} \quad (14)$$

เมื่อ C_{dev_inlet} และ C_{dev_outlet} เป็นค่าของ C_{dev} ที่ตำแหน่งหน้าตัดทางเข้าและทางออก
ตามลำดับ ถ้าของเหลวทั้ง 2 ชนิดผสมกันอย่างสม่ำเสมอภายในช่องการผสม ค่าความเข้ม I_i ใน
สมการ (13) จะเหมือนกันทุก ๆ พิกเซลหรือมีค่าเท่ากับ I_{mean} ดังนั้น ค่า C_{mix} จะมีค่าเท่ากับ 1 แต่ถ้า
ไม่มีการผสมเกิดขึ้นทั้งหมด ค่า C_{mix} จะมีค่าเท่ากับ 0

ผลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่มีต่อการผสม

ในกรณีของการเกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่
จะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเป็นอย่างมาก ในทางทฤษฎีนั้นสัมประสิทธิ์การแพร่ของกรดออกทาโน
อีกในเมทานอลสามารถประมาณค่าได้จากวิธีของ Wilkey-Chang [6] ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่
ได้นี้จะขึ้นกับอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ผลการคำนวณดังกล่าวแสดงในตารางที่ 6 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์
การแพร่ของออกทาโนอีกในเมทานอลจะมีค่าอยู่ในลำดับ 10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที

ตารางที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากการประมาณค่าโดยวิธี Wilkey-Chang

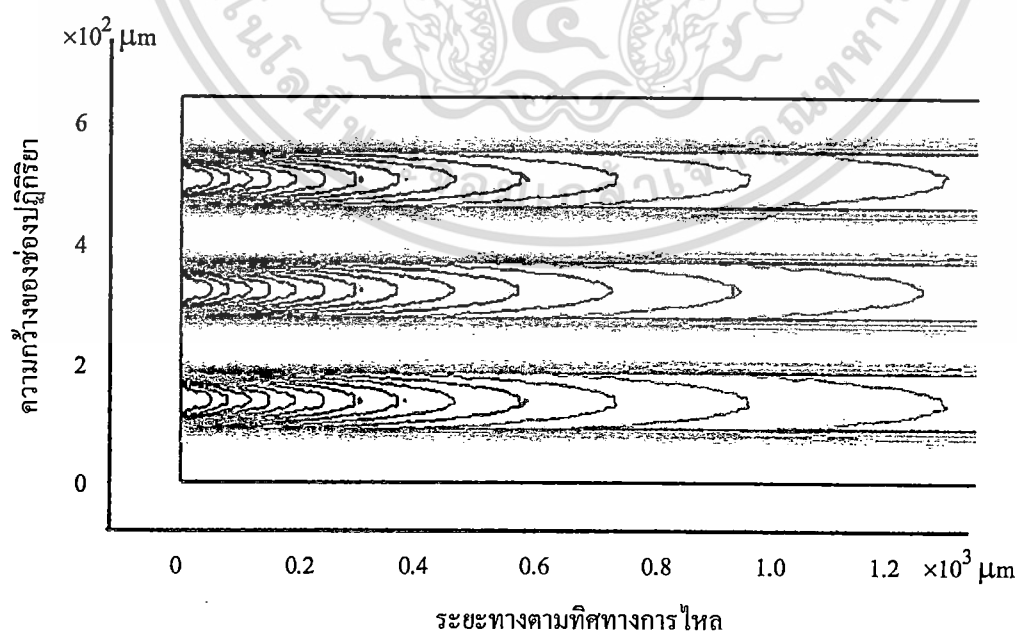
อุณหภูมิ (°C)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)
40	2.08×10^{-9}
50	2.44×10^{-9}
60	2.86×10^{-9}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 ค่าตัวแปรและค่าคงที่ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

ตัวแปรต่าง ๆ	ค่าของตัวแปร	หน่วย
สัมประสิทธิ์การแพร่, D	D	m^2/s
ความเร็วกรดออกทานิก, u_o	2.69×10^{-4}	m/s
ความเร็วของเมทานอล, u_M	1.51×10^{-2}	m/s
ความเข้มข้นกรดออกทานิก, c_o	6.32×10^3	mol / m^3
ความเข้มข้นเมทานอล, c_M	24.78×10^3	mol / m^3
ค่าความร้อนการเกิดปฏิกิริยา, ΔH_{rx}	-98,047	kJ/mol
ค่าคงที่จากสมการอาร์เรเนียส, Keq0	3.99×10^{13}	-
อุณหภูมิ, T_0	T_0	K
ความหนืดเมทานอล, η_M	4.17×10^{-3}	Pa.s
ความหนืดกรดออกทานิก, η_o	3.48×10^{-3}	Pa.s

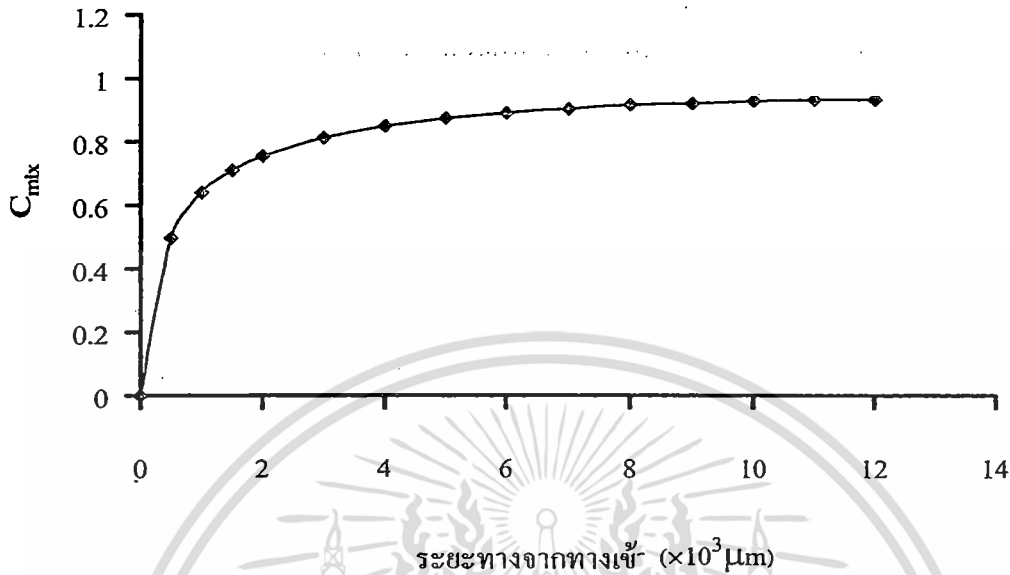
การศึกษาประสิทธิภาพการผสมระหว่างกรดออกทานิกกับเมทานอลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปนี้ใช้สัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 1.0×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที โดยลักษณะการผสมของสารตั้งต้นที่ได้ในรูปที่ 11 แสดงฟลักซ์การแพร่ของกรดออกทานิกตามช่องทางไหล จะเห็นว่าความเข้มข้นของกรดออกทานิกลดลงอย่างชัดเจนแสดงว่ามีการผสมกันของเมทานอลกับกรดออกทานิกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ระยะทางตามทิศทางการไหลตั้งแต่ทางเข้าจนถึงระยะ 1,000 ไมโครเมตร



รูปที่ 11 ฟลักซ์การแพร่ของกรดออกทานิกตามช่องทางไหล

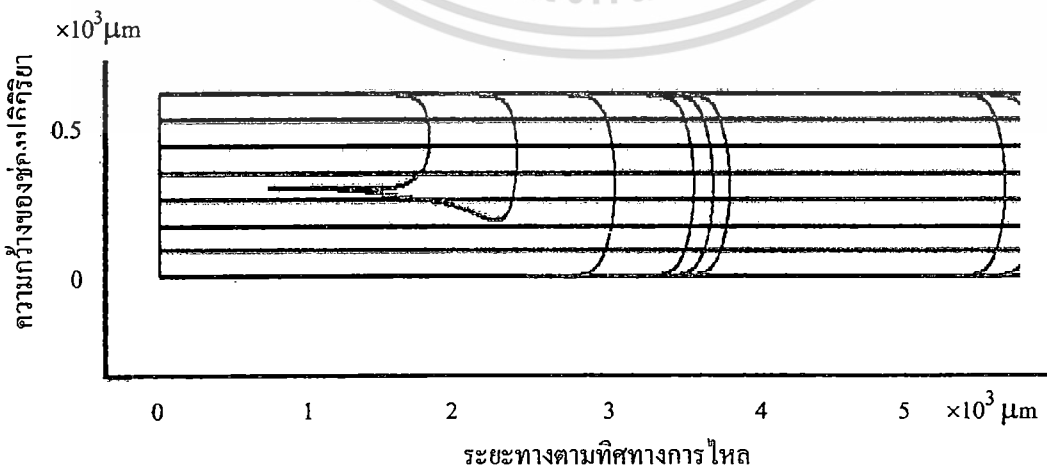
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อพิจารณาการกระจายความเข้มข้นเฉลี่ย แสดงได้ในรูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงของการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเทียบกับระยะทางที่ไหลภายในช่องปฏิกรณ์ พบว่าการผสมระหว่าง เมทานอลกับกรดออกทานอิกจะดีขึ้นเมื่อระยะทางการไหลของสารเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 12 การกระจายความเข้มข้นของเมทานอลในช่องการไหลระดับไมโคร

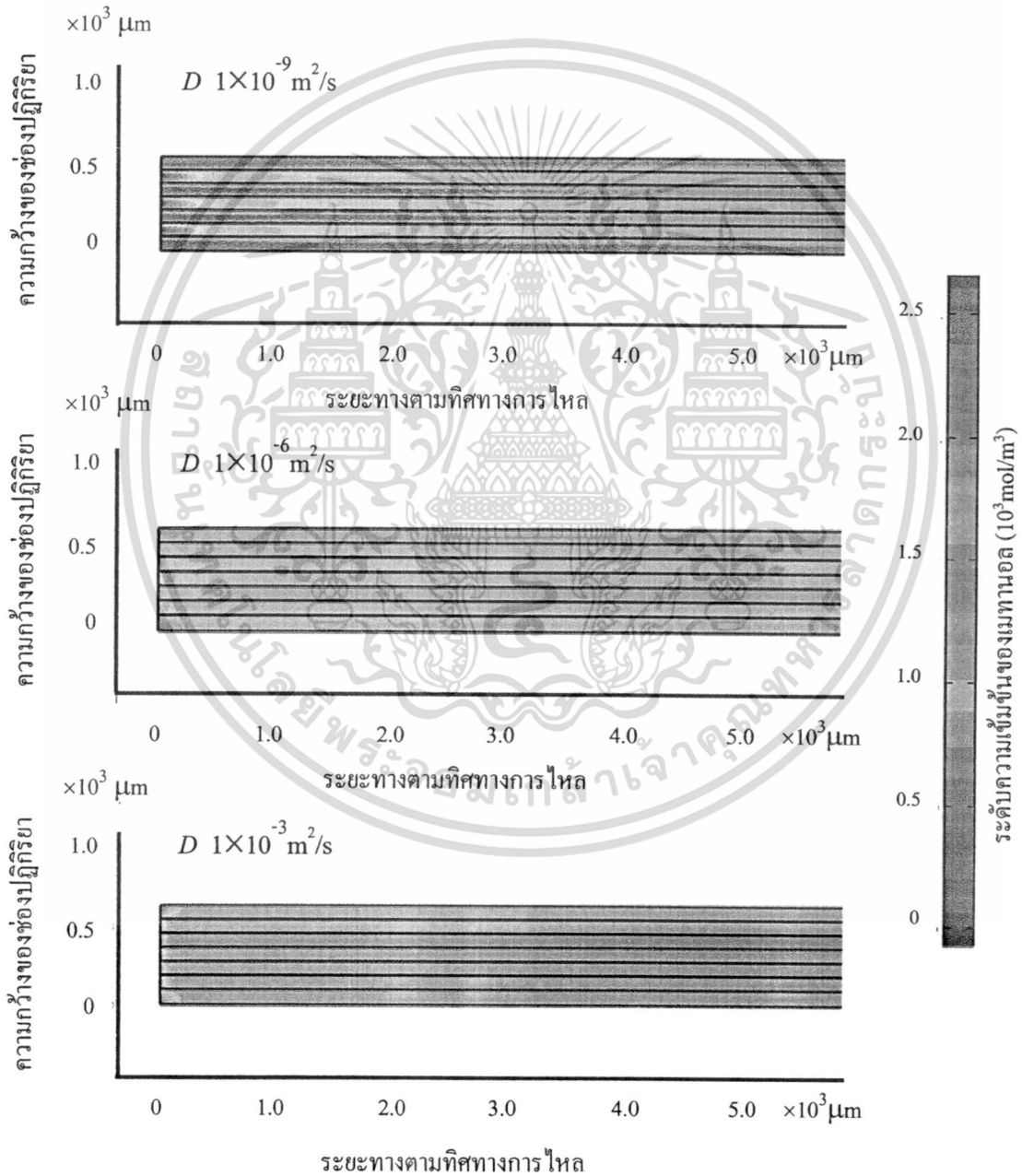
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 12 พบว่าค่า C_{mix} จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากตำแหน่งทางเข้าของช่องปฏิกรณ์จนกระทั่งถึงที่ตำแหน่งทางออก ในช่วงแรกของระยะทางที่สารไหลผ่านตั้งแต่ 0 ถึง ประมาณ 2 มิลลิเมตรจะเกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกันอย่างรวดเร็วของกรดออกทานอิกและเมทานอล ซึ่งค่า C_{mix} ที่ได้จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 0.75 หลังจากระยะ 2 มิลลิเมตรเป็นต้นไป การผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนค่า C_{mix} เท่ากับ 0.93 ที่ตำแหน่งทางออก แสดงให้เห็นว่าที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำจะทำให้ค่าความเป็นเนื้อเดียวกันค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และเนื่องจากการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันถูกจำกัดด้วยสัมประสิทธิ์การแพร่จึงทำให้สารตั้งต้นไม่ผสมกันร้อยเปอร์เซ็นต์ในช่องปฏิกรณ์นี้ และในทำนองเดียวกันนี้สามารถแสดงด้วย Concentration Gradient ในรูปที่ 13



รูปที่ 13 แสดง Concentration Gradient ของเมทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ซึ่งหากมีผู้ใดนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสมมติค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เป็น 1×10^{-6} และ 1×10^{-3} ตารางเมตรต่อวินาที การผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ 1×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที นั่นคือช่วงแรกของระยะทางที่สารไหลผ่านจะมีการผสมกันอย่างรวดเร็ว และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนมีความสม่ำเสมอของการผสม นั่นแสดงว่าถ้าสารที่นำมาผสมกันมีสัมประสิทธิ์การแพร่มากขึ้น จะทำให้การผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันได้รวดเร็วที่ระยะทางการไหลของสารน้อย ๆ และเพื่อให้เห็นภาพได้ชัดเจน รูปที่ 14 จะแสดงความเข้มข้นของเมทานอลที่ผสมกับกรดออกทานอิก โดยใช้ระดับสีแทนความเข้มข้นของเมทานอล ที่ความเข้มข้นของเมทานอลเป็นศูนย์จะแสดงด้วยสีน้ำเงินและที่ความเข้มข้นของเมทานอลสูงสุด (ความเข้มข้นที่ทางเข้าช่องปฏิกรณ์) จะแสดงด้วยสีแดงเข้ม



รูปที่ 14 ผลของสัมประสิทธิ์การแพร่ต่อการกระจายความเข้มข้นที่ระยะทางตามทิศทางการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 14 ขนาดของช่องปฏิกรณ์ตามระยะของการไหลและระยะของช่องป้อนสารจะแสดงในแกนนอนและแกนตั้งของรูป โดยถ้าสารมีการผสมกันสม่ำเสมอแล้วระดับความเข้มข้นจะเป็นสีเดียวกัน 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 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันดีขึ้นและใกล้เคียงกับความเข้มข้นของเมทานอลในอุดมคติที่ระยะทางตามทิศทางการไหลสั้น ๆ จากการศึกษาการผสมของกรดออกทานอนิกกับเมทานอลภายในช่องการไหลระดับไมโคร โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Comsol Multiphysics 3.2a แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีผลต่อการผสมภายในช่องระดับไมโครเป็นอย่างมาก

10. สรุปผลการวิจัย

เมื่อพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสในเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโคร พบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน โดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่สัดส่วนของกรดออกทานอนิกต่อเมทานอล 1 ต่อ 4 ในช่วงอุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าในแต่ละอุณหภูมิจะให้ค่าคอนเวอร์ชันที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนคือ 15 % 26 % และ 39 % ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าความหนืดที่ลดลงและการมีพื้นที่ผิวสัมผัสของสารตั้งต้นมาก รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ถ้าเปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาในระบบกะจะได้ค่าคอนเวอร์ชันคงที่ประมาณ 22% จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่าอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการทำปฏิกิริยามีผลน้อยกว่าอิทธิพลของผิวสัมผัส ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์ระดับไมโครจึงเหมาะสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพโดยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการที่พื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาภายในช่องการไหลระดับไมโคร การศึกษาถึงอิทธิพลดังกล่าวจึงใช้แบบจำลองการไหลในช่องการไหลระดับไมโครเพื่อให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมกรไหลนี้ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของกรดออกทานอนิกในเมทานอลเป็นตัวแปรหลักสำหรับศึกษาพฤติกรรมกรไหลภายในช่องการไหลระดับไมโคร ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่นี้มีค่าประมาณ 2.08×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที พบว่าค่า C_{mix} ที่ตำแหน่งทางออกของช่องการไหลมีค่าเท่ากับ 0.93 ซึ่งใช้แสดงถึงความสามารถการผสมกันระหว่างกรดออกทานอนิกกับเมทานอลภายในช่องการไหลระดับไมโครนี้มีการผสมได้เป็นอย่างดี

11. เอกสารอ้างอิง

- [1] บทความพลังงาน. ไบโอดีเซลน้ำมันเชื้อเพลิงคุณภาพแห่งยุคสมัย
www.green.kmutt.ac.th/news/Question.asp?GID=60
- [2] อนวัช คุรงค์กนิษฐ์. “การสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ.”
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมปิโตรเคมี บัณฑิต
วิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [3] Volker Hessel, Steffen Hardt and Holger Lowe. **Chemical Micro Process Engineering**.
Wiley-VCH. 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. 1988.
- [7] Stanley Middleman. **An Introduction to Mass and Heat Transfer**. John Wiley &
Sons. 1998.
- [8] R. Byron Bird, Warren E. Stewart and Edwin N. Lightfoot. **Transport Phenomena**.
2nd Ed. John Wiley & Sons. 2002
- [9] วิชุดา ไชยเขตต์. “สมดุลปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชั่นของ
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
- [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