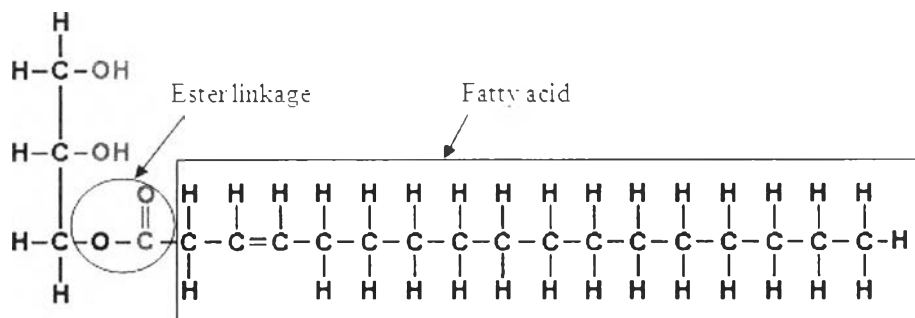


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โมโนกลีเซอไรด์ (monoglycerides)

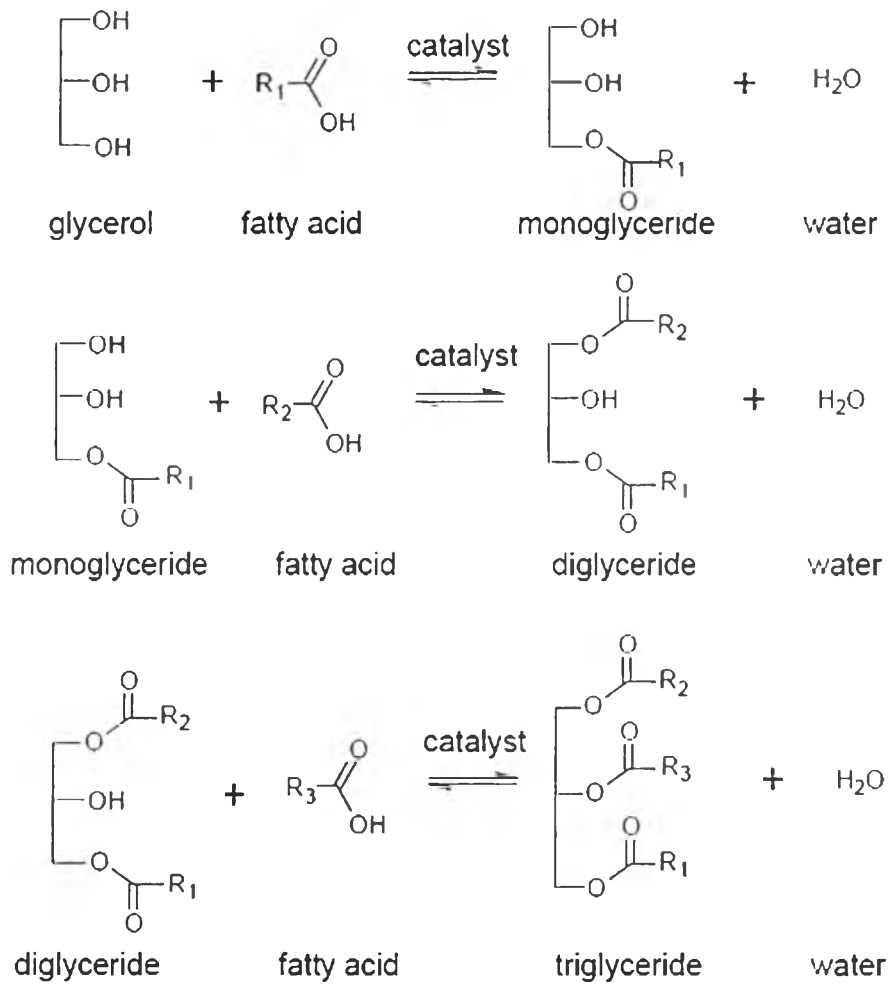
โมโนกลีเซอไรด์เกิดจากกรดไขมัน 1 โมเลกุลเชื่อมต่อกับโมเลกุลของกลีเซอรอลด้วยพันธะเอสเทอร์ (ester linkage) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในโมเลกุลของโมโนกลีเซอไรด์มีทั้งส่วนที่ชอบน้ำคือหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) 2 หมู่ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำคืออนุพันธ์ของกรดไขมัน ทำให้โมเลกุลของโมโนกลีเซอไรด์มีสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactant) และสารอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง ในอุตสาหกรรมผลิตอาหาร อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมผลิตสารหล่อลื่น และอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เป็นต้น (Pouilloux, Métayer et al., 2000)



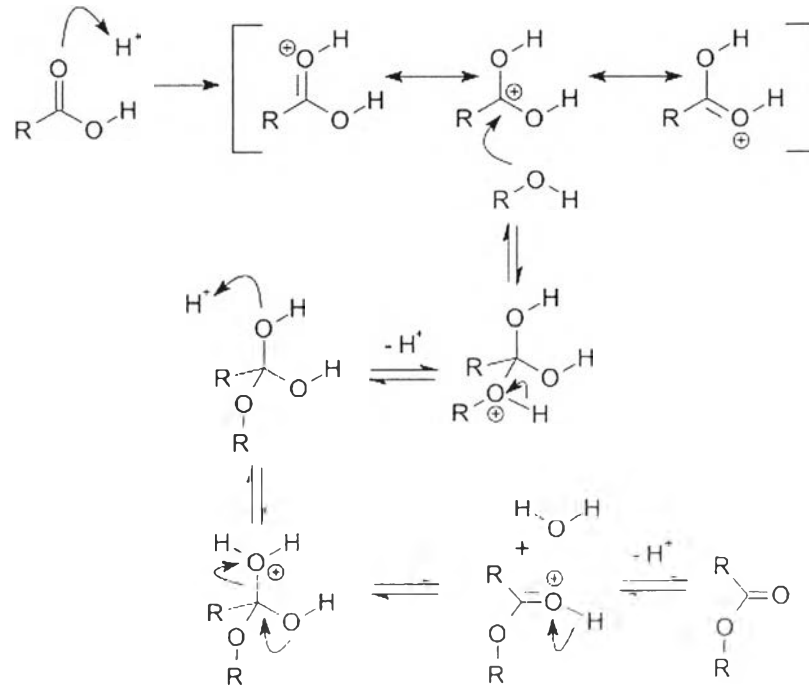
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของโมโนกลีเซอไรด์

โดยทั่วไปโมโนกลีเซอไรด์สามารถสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาเคมีได้ 2 วิธี ได้แก่ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (transesterification) โดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เกิดจากกลีเซอรอลทำปฏิกิริยากับกรดไขมันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โมโนกลีเซอไรด์จะเกิดในขั้นตอนแรกของปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดต่อเนื่องได้ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ รูป 2.2 และ 2.3 แสดงการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรอลกับกรดไขมัน และกลไกการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของแอลกอฮอล์กับกรดไขมันตามลำดับ การสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ผ่านปฏิกิริยานี้ จำเป็นต้องควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ อัตราส่วนของสารตั้งต้น รวมทั้งเวลาในการทำปฏิกิริยาให้เหมาะสมเพื่อยังไม่ให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องป้องกันไม่ให้เกิดฟองจากไอน้ำในปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องควบคุมความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเคมีให้เหมาะสม อย่างไรก็ตามการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เพื่อไม่ให้

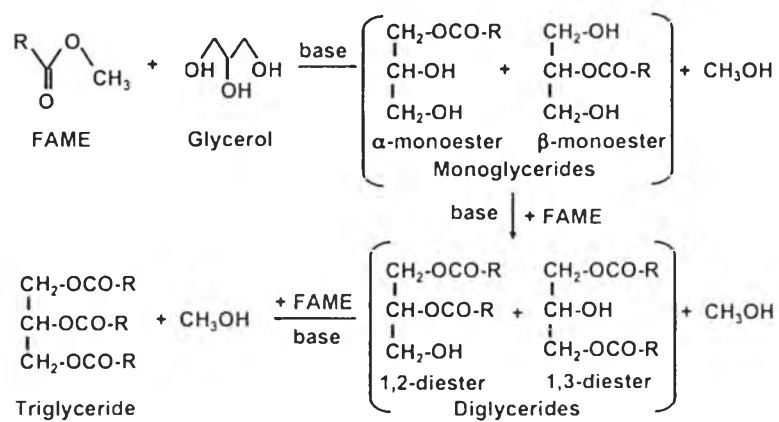
เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมนั้นทำได้ค่อนข้างยาก



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกลีเซอรอลกับกรดไขมัน



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของแอลกอฮอล์กับกรดไขมัน



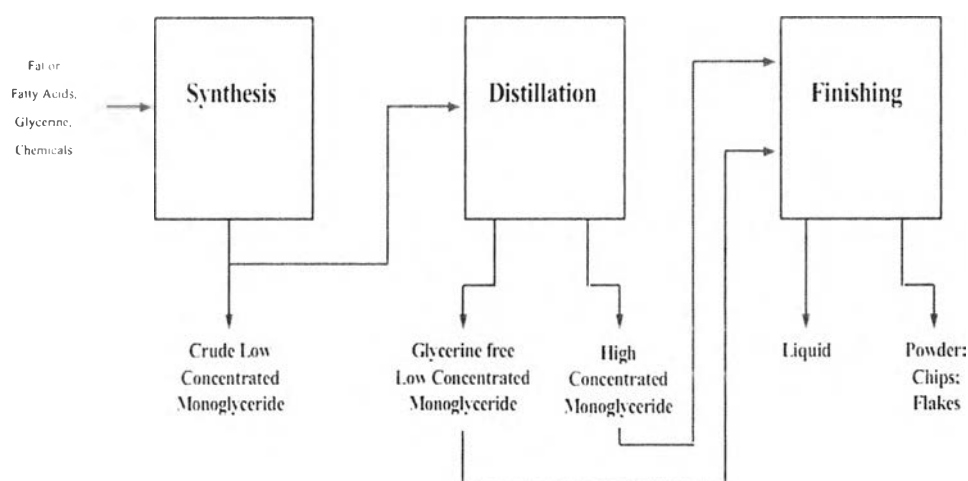
รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรอลกับเอสเทอร์ของกรดไขมัน

(Kaewthong, Sirisansaneeyakul et al., 2005)

สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดจากการใช้กลีเซอรอลทำปฏิกิริยากับ ไตรกลีเซอไรด์หรือเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid methyl ester , FAME) โดยมีเบสเป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาแสดงดังรูป 2.4

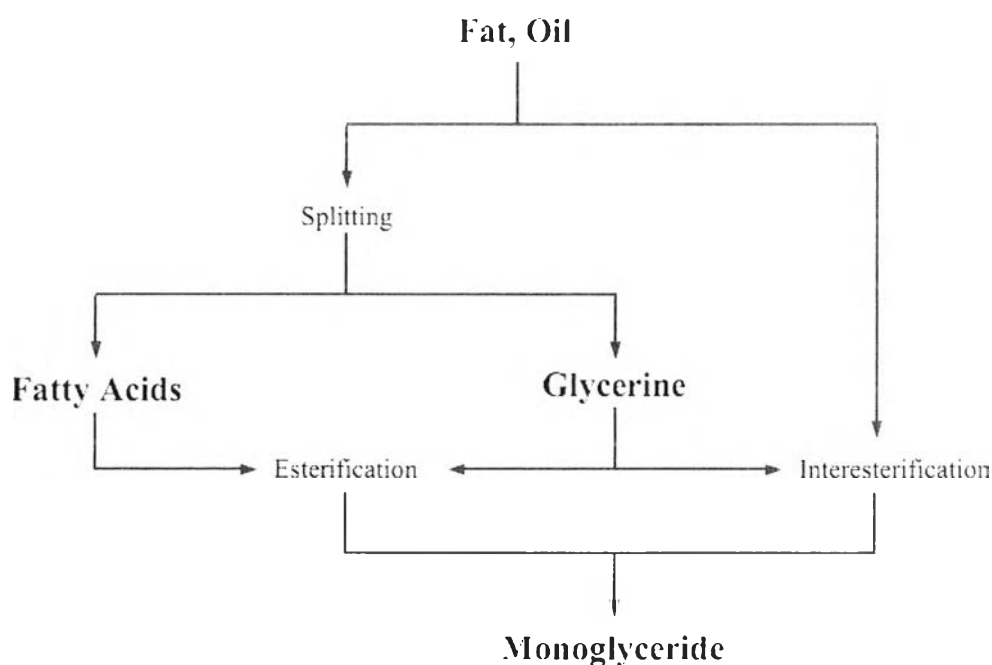
2.1.1 กระบวนการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ในอุตสาหกรรม

โมโนกลีเซอไรด์ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะ อุตสาหกรรมอาหารที่มีความต้องการในปริมาณสูง โดยโมโนกลีเซอไรด์ที่ใช้จะมีหมู่ฟังก์ชันของกรดไขมันอยู่ในช่วง C_{16} ถึง C_{18} ในปัจจุบันการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในอุตสาหกรรมนิยมสังเคราะห์ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างไขมันหรือน้ำมันกับกลีเซอรอลในถังปฏิกรณ์แบบผสมกวนชนิดต่อเนื่อง (continuous- stirred-tank reactor, CSTR) ที่อุณหภูมิสูง (220–250 องศาเซลเซียส) ซึ่งกระบวนการนี้ต้องใช้กลีเซอรอลจำนวนมาก และโมโนกลีเซอไรด์ที่ได้จะมีสีดำเพราะใช้อุณหภูมิสูง ถ้าใช้ปริมาณกรดไขมันไม่สัมพันธ์ปริมาณสูงจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหนืดหรือวุ้นที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าใช้กรดไขมันปริมาณน้อย โมโนกลีเซอไรด์ที่สังเคราะห์ได้จะมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 70 องศาเซลเซียส ความบริสุทธิ์อยู่ในช่วง 40-60 % ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับต่ำ (Kaewthong, Sirisansaneeyakul et al., 2005) จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการตกผลึก (crystallization) หรือการกลั่น (distillation) เพื่อให้ได้โมโนกลีเซอไรด์ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ถึงจะสามารถนำมาใช้หรือผลิตขายตามท้องตลาดได้ รูป 2.5 แสดงกระบวนการทำให้โมโนกลีเซอไรด์มีความบริสุทธิ์มากขึ้น



รูปที่ 2.5 กระบวนการทำให้โมโนกลีเซอไรด์ให้บริสุทธิ์ (Fischer and Magdeburg., 1998)

ในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์สิ่งที่ส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตคือราคาของสารตั้งต้น โดยที่กลีเซอรอลและกรดไขมันจะมีราคาสูงกว่าไตรกลีเซอไรด์ ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะใช้กลีเซอรอลเพียง 0.67 โมล สำหรับการเกิดโมโนกลีเซอไรด์ 1 โมล ในขณะที่ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันต้องใช้กลีเซอรอล 1 โมลในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์ 1 โมล ดังนั้นปฏิกิริยาการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์แบบเอสเทอร์ฟิเคชันใช้ต้นทุนสูงกว่าแบบทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน แต่ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันสามารถกำหนดการกระจายตัวของกรด (acid distribution) ส่วนปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจำเป็นต้องใช้ไตรกลีเซอไรด์ที่จำเพาะ เพื่อสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ที่มีการกระจายตัวของกรดไขมันตามที่ต้องการ การแก้ไขข้อจำกัดเหล่านี้จึงมีการผสมผสานทั้งสองวิธีเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยสารตั้งต้นที่ใช้คือไขมันและน้ำมัน ก่อนนำไปใช้จะต้องผ่านกระบวนการแยกกรดไขมันกับกลีเซอรอลออกจากกัน โดยที่กรดไขมันจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ส่วนกลีเซอรอลสามารถนำไปใช้ได้ทั้ง 2 ปฏิกิริยาเพื่อผลิตโมโนกลีเซอไรด์ การสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์จะใช้กรดไขมัน 73 % โดยมวล และกลีเซอรอล 27 % โดยมวลหลังจากเกิดปฏิกิริยา กลีเซอรอล 15 % ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาและกลีเซอรอลที่ละลายในชั้นของผลิตภัณฑ์มีเพียง 6 ถึง 7% ซึ่งสามารถแยกกลีเซอรอลออกมาได้ 8 ถึง 9 % โดยวิธีตกตะกอน ในชั้นของผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยโมโนกลีเซอไรด์ 50% กลีเซอรอลอิสระ 7 % ไตรกลีเซอไรด์ 40 % และอีก 3 % เป็นสารผสมของไตรกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เจือปนอยู่ (Fischer and Magdeburg., 1998)

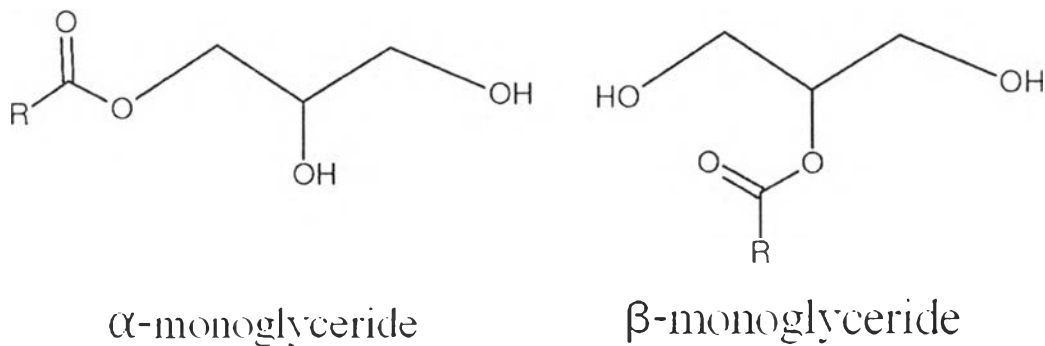


รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์จากไขมันและน้ำมัน (Fischer and Magdeburg., 1998)



2.1.2 การกระจายตัวของโมโนกลีเซอไรด์

ในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์ กรดไขมันจะเข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับกลีเซอรอลที่ตำแหน่งแอลฟา (α) หรือ ตำแหน่งบีตา (β) ดังในรูปที่ 2.7 ซึ่งไอโซเมอร์ (isomer) ที่ต้องการคือโมโนกลีเซอไรด์ในตำแหน่งแอลฟา เนื่องจากมีสมบัติเป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่ดีกว่าไอโซเมอร์ในตำแหน่งบีตา แต่ในการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีไอโซเมอร์ในตำแหน่งบีตาเพียง 7 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น เนื่องจากในระหว่างการเก็บไอโซเมอร์บีตาจะเปลี่ยนไปเป็นไอโซเมอร์แอลฟา และหากปล่อยไว้จนเกิดการเปลี่ยนอย่างเต็มที่ จะเหลือไอโซเมอร์บีตาอยู่เพียง 2 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ดังนั้นปริมาณของไอโซเมอร์บีตาจึงไม่สามารถคาดการณ์ได้ขึ้นอยู่กับเวลาก่อนการนำสารไปวิเคราะห์



รูปที่ 2.7 ไอโซเมอร์ของโมโนกลีเซอไรด์

2.2 เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

วิศวกรรมกระบวนการไมโครเกิดจากผสมผสานกันระหว่างความรู้ทางเคมี วิศวกรรมกระบวนการและวิศวกรรมระบบไมโครเพื่อสร้างผลงานที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร ถือว่าเป็นวิศวกรรมไมโครโดยเครื่องปฏิกรณ์ไมโครคือเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร เครื่องปฏิกรณ์ไมโครมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาเคมีต่อปริมาณสูงจึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลและความร้อนให้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีให้สูงขึ้นโดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูง การเพิ่มอัตราการผลิตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครทำได้โดยการเพิ่มจำนวนของเครื่องปฏิกรณ์และอัตราเร็วการไหลเข้า เนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดเล็กจึงมีความปลอดภัย และง่ายต่อการควบคุมอันตรายจากสารที่ไม่เสถียร และปฏิกิริยาเคมีที่มีการคายความร้อนสูง รวมถึงสามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้ง่าย และให้การตอบสนองที่รวดเร็ว

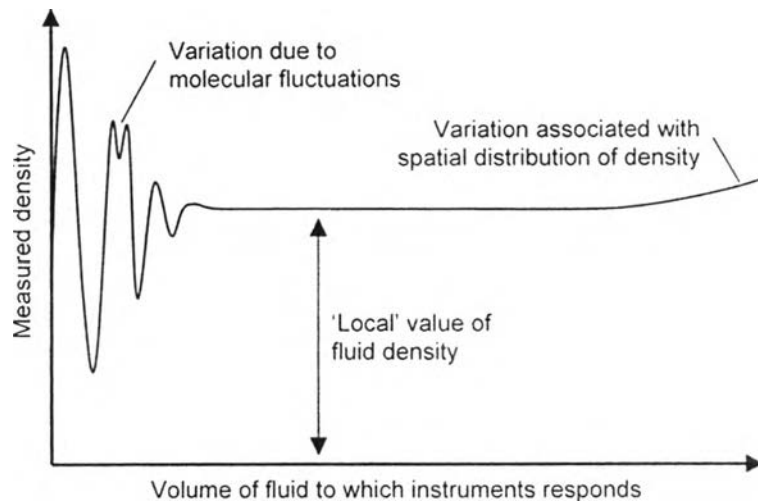
2.2.1 ข้อได้เปรียบของเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

- 2.2.1.1 ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย
- 2.2.1.2 ใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ
- 2.2.1.3 ติดตั้งง่ายและไม่ต้องระวังว่าชิ้นส่วนจะหลุดหายเป็นการลดค่าการบำรุงรักษา
- 2.2.1.4 เป็นระบบปิด
- 2.2.1.5 สารใช้เวลาในการผสมกันน้อยและมีการผสมกันทั่วถึง
- 2.2.1.6 ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ไม่ขึ้นกับความดันและอุณหภูมิ

2.2.2 ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

สิ่งที่เป็นจุดเด่นของเครื่องปฏิกรณ์ไมโครคืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง การที่ขนาดของท่อมีขนาดเล็กจึงเป็นการลดระยะทางการถ่ายโอนมวลและความร้อนให้สั้นลง ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนสูงขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีนอกเหนือจากความเข้มข้นของสารตั้งต้นแล้วยังมีเรื่องของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งสามารถคำนวณได้จากความยาวของท่อและอัตราเร็วในการไหล ถ้าความยาวของเครื่องปฏิกรณ์น้อยเวลาที่สารใช้ในการทำปฏิกิริยาจะสั้นลง เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะแตกต่างกันไปในแต่ละปฏิกิริยาเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะแปรผันตรงกับค่าคงที่ และอันดับของปฏิกิริยาเคมี โดยที่ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเคมีจะแปรผันตามอุณหภูมิ จากลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ไมโครอาจทำให้สารที่เกิดปฏิกิริยาเคมีช้าเกิดไม่สมบูรณ์เนื่องจากสารมีเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยเกินไป แต่สำหรับสารที่เกิดเร็วนับว่าเป็นข้อได้เปรียบมากจากความสามารถในการถ่ายโอนมวลและความร้อน การลดปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ส่งผลต่อสมบัติของของไหล และการวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ในระบบเช่น ความหนาแน่น ความเร็ว หรืออุณหภูมิ ถ้าปริมาตรมากความหนาแน่นของของไหลที่วัดได้จะไม่คงที่เป็นเพราะผลกระทบจากอิทธิพลภายนอก เช่นเดียวกับกรณีที่มีปริมาตรน้อยเกินไป การลดปริมาตรของระบบจะทำให้โมเลกุลที่ไม่เสถียรและมีการเปลี่ยนแปลงไปรบกวนผลการวัดทำให้ค่าที่วัดได้ไม่คงที่ ต่างจากในกรณีที่มีปริมาตรของระบบมาก การวัดที่เกี่ยวข้องกับจำนวนของโมเลกุลที่มาก การเปลี่ยนแปลงโมเลกุลเพียงไม่กี่โมเลกุลจึงไม่ส่งผลต่อค่าที่วัดได้ รูปที่ 2.8 ได้แสดงให้เห็นความเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้ที่ปริมาตรต่าง ๆ เครื่องมือที่ให้ค่าที่สม่ำเสมอที่สุดจะมีปริมาตรอยู่ที่ 103 ลูกบาศก์ไมโครเมตร โดยที่เครื่องปฏิกรณ์ไมโครอยู่ในช่วงนี้





รูปที่ 2.8 ผลของปริมาตรต่อความหนาแน่นที่วัดได้ (Kockmann., 2007)

2.2.3 ปัญหาที่พบในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

ปัญหาที่มักเกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครคือการอุดตันของท่อ เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งปัญหาดังกล่าวเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการทดลอง เพื่อแก้ไขปัญหานี้ต้องมีการติดตั้งเครื่องปรับความดันที่ขาออกของเครื่องปฏิกรณ์ อีกวิธีหนึ่งคือใช้ปั๊มแรงดันช่วยแต่มีข้อเสียคือเป็นการรบกวนการไหลของสารและต้องใช้พลังงานมากเพื่อลดผลกระทบจากการรบกวนนี้

2.2.4 การประยุกต์ใช้เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์สารเนื่องจากมีความได้เปรียบในเรื่องการถ่ายโอนมวลและความร้อนที่ดี และอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูง และยังสามารถแก้ไขปัญหาของสารที่ไม่เสถียรได้ดี ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการประยุกต์ใช้เครื่องปฏิกรณ์ไมโครในการศึกษาปฏิกิริยาเคมีเชิงแสง (photochemistry) การสังเคราะห์เซลล์อิเล็กโทรเคมี (electro synthesis) การทำปฏิกิริยาระหว่างสารมากกว่า 2 ชนิด (multi-component reactor) และปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ใช้ได้กับระบบของเหลว-ของเหลว ระบบแก๊ส-ของเหลว หรือแม้แต่ระบบของเหลว-ของแข็ง เช่น ปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalyst) เครื่องปฏิกรณ์ไมโครในห้องทดลองทางวิทยาศาสตร์และเครื่องปฏิกรณ์ไมโครที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะมีอัตราเร็วของการไหลตั้งแต่ 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงไปจนถึง 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสามารถเพิ่มอัตราการไหลให้เทียบเท่ากับเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตได้

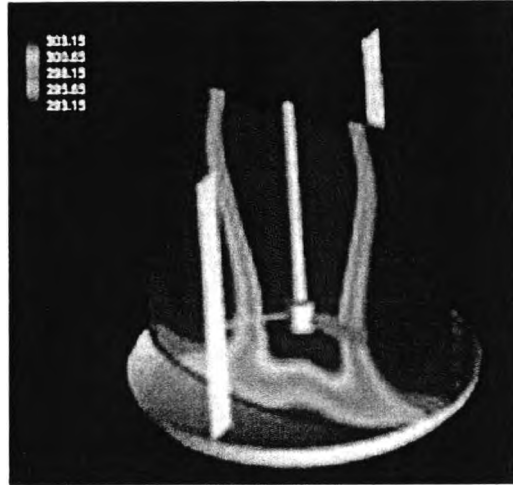
2.3 เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์ไมโครและเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์

ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์การสังเคราะห์สารให้ได้ปริมาณมากและมีความบริสุทธิ์จำเป็นต้องใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์นั้นขนาดของเครื่องปฏิกรณ์จะเป็นตัวกำหนดและควบคุมปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ การเพิ่มขนาดเครื่องปฏิกรณ์ให้ใหญ่ขึ้นทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น ในทางกลับกันระบบที่มีการควบคุมอัตราการไหลของสารตั้งต้นอย่างเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร ตัวแปรที่ควบคุมปฏิกิริยาเคมีคือ เวลา สารตั้งจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องโดยที่สารตั้งต้นจะผสมกันและเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเครื่องปฏิกรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจะมีการไหลอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นปริมาณของผลิตภัณฑ์จึงถูกกำหนดด้วยอัตราเร็วในการไหลของสารตั้งต้นและเวลาเท่านั้น นอกจากนี้ตัวแปรด้านขนาดแล้วยังมีตัวแปรอื่นที่แสดงให้เห็นว่าเครื่องปฏิกรณ์ไมโครมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ เช่น วัสดุที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์ไมโครมีความหลากหลาย อาทิเช่น เหล็ก อลูมิเนียม และแก้วหรือซิลิกอน เป็นต้น โดยที่วัสดุแต่ละชนิดล้วนแต่มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน

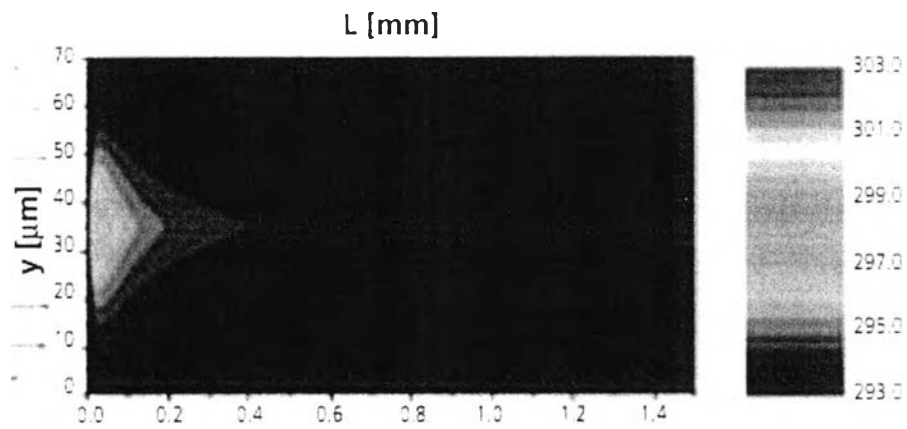
2.3.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์กับเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

เครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์มีการระบายความร้อนของระบบเกิดขึ้นที่ผิวของเครื่องปฏิกรณ์เท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นแบบจำลองการกระจายความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร มีอัตราการกวน 500 รอบต่อนาที จากรูปแสดงให้เห็นการกระจายความร้อนจากผิวนอกไปจนถึงแกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าควบคุมอุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ให้กลับมาอยู่ในอุณหภูมิที่กำหนดไว้ทำได้ยากเมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร จากรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นผลการตรวจจัดการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร ซึ่งพบว่าตรวจจัดการกระจายความร้อนจากการผสมกันของสารทั้งสองได้น้อยมาก และยังใช้ระยะทางน้อยมากในการระบายความร้อนให้อุณหภูมิกลับมาอยู่ในค่าที่ควบคุมไว้ เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ไมโครมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงทำให้ระบบระบายความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาคายความร้อนได้ดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ไมโครดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์

ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนมีความสำคัญในเรื่องของความปลอดภัย โดยที่เครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์การเกิดปฏิกิริยาเคมีที่คายความร้อนออกมาสูงจำเป็นต้องเพิ่มเวลาในการปรับอุณหภูมิให้กลับมาอยู่ที่ค่าที่กำหนด โดยที่ปฏิกิริยาส่วนใหญ่ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์มักจะไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นได้ แต่ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครการที่ปริมาตรภายในต่อต่อความยาวน้อย ประกอบกับประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนที่สูงเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการทำงานที่เสถียรและความปลอดภัยในการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีการคายความร้อน



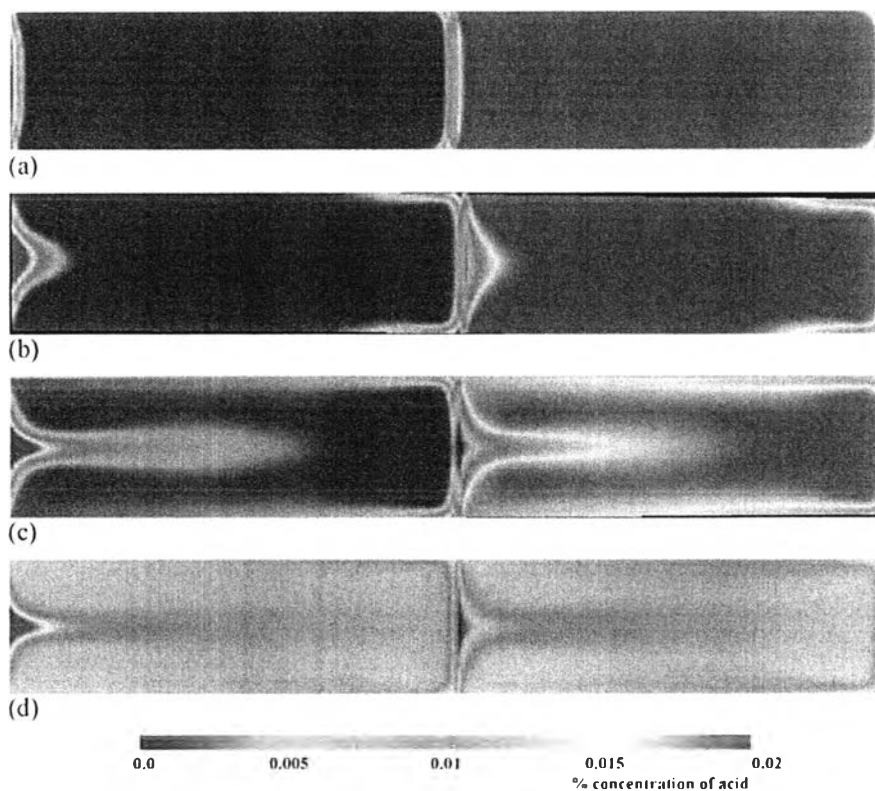
รูปที่ 2.9 แบบจำลองการกระจายความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์
(Weiler and Junkers., 2009)



รูปที่ 2.10 แบบจำลองการกระจายความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร
(Weiler and Junkers., 2009)

2.3.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ และเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

จุดเด่นของเครื่องปฏิกรณ์ไมโครอีกอย่างหนึ่งก็คือ การถ่ายโอนมวล การผสมกันของสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาเคมีมีความสำคัญมากในทุก ๆ ปฏิกิริยาเคมีเพราะต้องมีการควบคุมอัตราส่วนโดยโมลระหว่างสารตั้งต้นให้คงที่เพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ตัวอย่างของการถ่ายโอนมวลของปฏิกิริยาเคมีระหว่างกรดแอซีติกกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 2.11 สีแดงแสดงถึงความเข้มข้นของกรดแอซีติกที่มากที่สุด ส่วนสีน้ำเงินแสดงถึงความเข้มข้นของสารละลายเบสที่มากที่สุด โดยสีเขียวจะแสดงถึงสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าโมเลกุลของกรดจะแทรกตัวเข้าไปในสารละลายของเบสแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีและเมื่อเวลาผ่านไปเมื่อเวลาผ่านไปเพียงแค่ 6 วินาที ปฏิกิริยาเคมีก็จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการถ่ายโอนมวลของเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร



รูปที่ 2.11 แผนที่แสดงการกระจายตัวของกรดแอซีติก (acetic acid) ในสารละลายเบสที่อัตราเร็วในการไหลเท่ากับ 0.1 mm/s; (a) 0.1 วินาที, (b) 0.5 วินาที, (c) 2.0 วินาที และ (d) 6.0 วินาที (Harries, Burns et al., 2003)

2.4 อุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

อุทกพลศาสตร์คือการศึกษาพฤติกรรมของการไหลของของไหล โดยพฤติกรรมในการไหลของของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ การแพร่ (diffusion) และการนำพามวล (mass convection) การแพร่เกิดจากการถ่ายเทมวลของของไหลจากบริเวณที่มีความหนาแน่นของโมเลกุลสูงไปยังบริเวณที่มีความหนาแน่นต่ำ ส่วนใหญ่การไหลภายในท่อมักเกิดทั้งการแพร่และการนำพาควบคู่กันไป แต่การนำพามวลจะส่งผลต่อการไหลมากกว่า ในการศึกษาการไหลของของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครนั้นรูปแบบการไหลจะขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของของไหลภายในท่อเป็นสำคัญ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบหลักคือ การไหลแบบวัฏภาคเดียวกัน (single-phase flow) และการไหลแบบหลายวัฏภาค (multi-phase flow)

2.4.1 การไหลแบบวัฏภาคเดียวกัน

การไหลแบบวัฏภาคเดียวกันเกิดขึ้นเมื่อของไหลทั้งหมดในระบบสามารถกลายเป็นเนื้อเดียวกันได้เนื่องจากมีสภาพข้อเหมือนกัน ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของความสัมพันธ์ระหว่างการไหลกับความหนาแน่น ความหนืดของของไหล ความเร็วของของไหลภายในท่อ และรัศมีของท่อเป็นไปตามสมการที่ 2.1 เพื่อหาค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ของการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร เนื่องจากขนาดของท่อภายในของเครื่องปฏิกรณ์ไมโครมีขนาดเล็กทำให้การไหลภายในท่อมีความเร็วสูง โดยที่แก๊สจะมีความเร็วในการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครอยู่ในช่วง 1 ถึง 50 เมตรต่อวินาที ส่วนของเหลวมีความเร็วอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 10 เมตรต่อวินาที ส่งผลให้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร มีค่าประมาณ 0.01-1000

$$Re = \frac{\rho w L}{\eta} \quad (2.1)$$

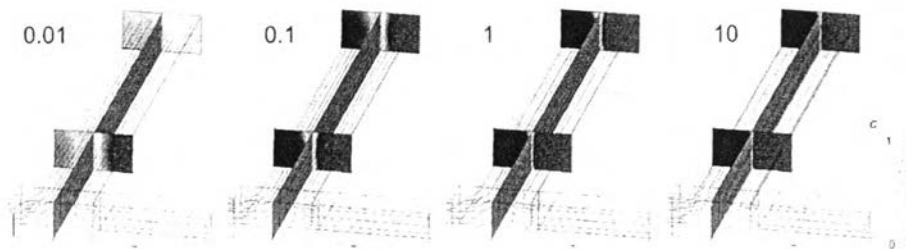
โดยที่ η คือ ความหนืดพลวัตของของไหล , w คือ อัตราการไหลภายในท่อ

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, L คือ ความยาวท่อ

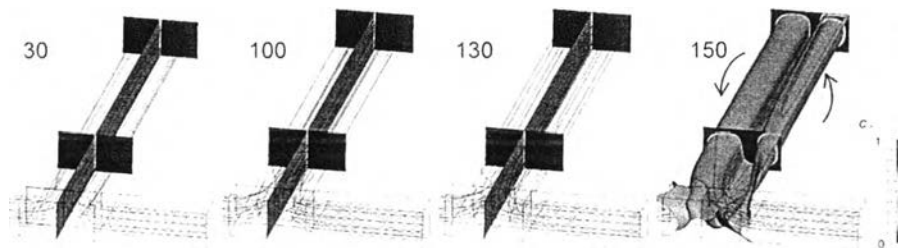
ปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการไหลภายในท่อ นอกจากสมบัติทางกายภาพของของไหลแล้วยังจำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะของท่อที่ส่งผลต่อความเร็วของการไหลด้วย เช่น ความขรุขระของผิวท่อ รูปทรงของท่อ เป็นต้น การไหลโดยทั่วไปสามารถแบ่งรูปแบบการไหลได้ 3 แบบตามค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วงต่ำ การไหลแบบขณะเกิดการเปลี่ยนแปลง (transition flow) มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วงปานกลาง และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ซึ่งมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วงสูง ในที่นี้จะยกตัวอย่างภาพจำลองการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครแบบตัว T ที่มีขนาดท่อ 600×300×300 ไมครอนภายใต้เงื่อนไขการผสมกันของของไหลในอัตราส่วนหนึ่งต่อหนึ่ง ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่าง ๆ โดยใช้ computational

fluid dynamics ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์อุทกพลศาสตร์ของของไหลด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ (Kockmann., 2007)

(a) แบบที่ 1 : $Re < 10$, straight laminar flow



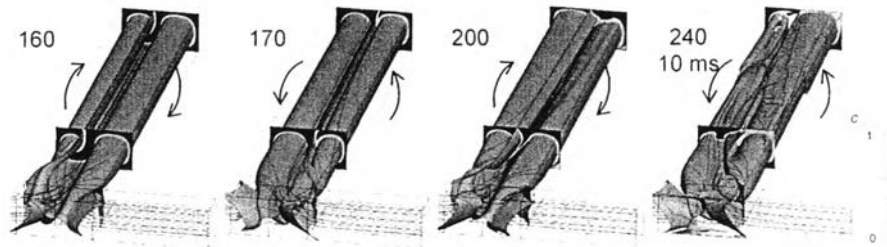
(b) แบบที่ 2 : $10 < Re < 130$, vortex or dean flow



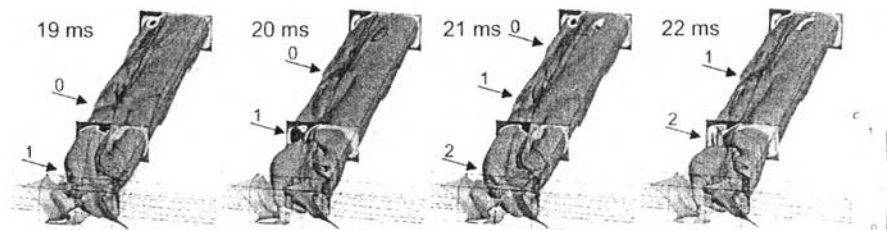
รูปที่ 2.12 การไหลแบบ (a) engulfment flow (b) vortex หรือ dean flow ในท่อขนาด

(Kockmann., 2007)

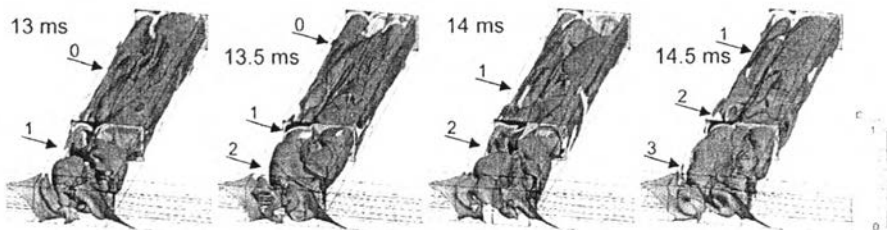
(c) แบบที่ 3 : $130 < Re < 240$, engulfment flow



(d) แบบที่ 4 : $240 < Re < 400$, periodic pulsating flow



(e) แบบที่ 5 : $400 < Re < 500$, quasi-periodic pulsating flow



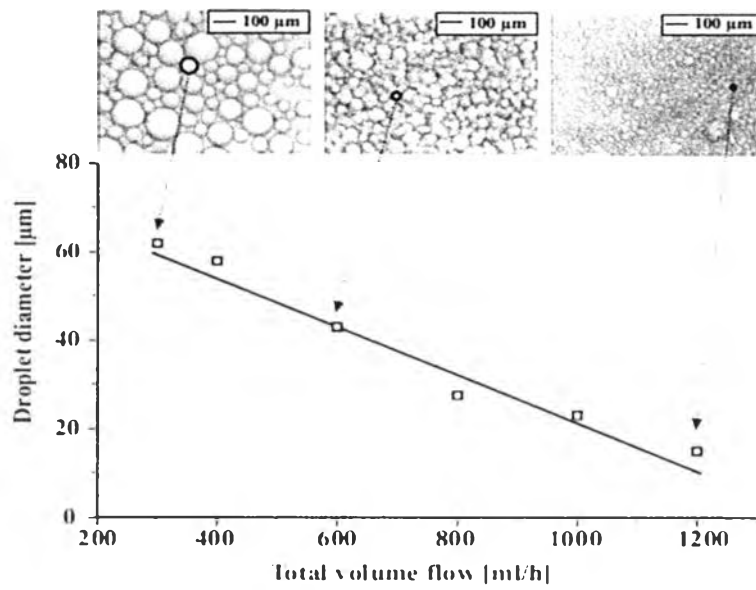
รูปที่ 2.13 การไหลแบบ (c) periodic pulsating flow (d) quasi-periodic pulsating flow (e) chaotic pulsating flow ในท่อขนาด $600 \times 300 \times 300$ ไมครอน (Kockmann., 2007)

2.4.2 การไหลแบบหลายวัฏภาค

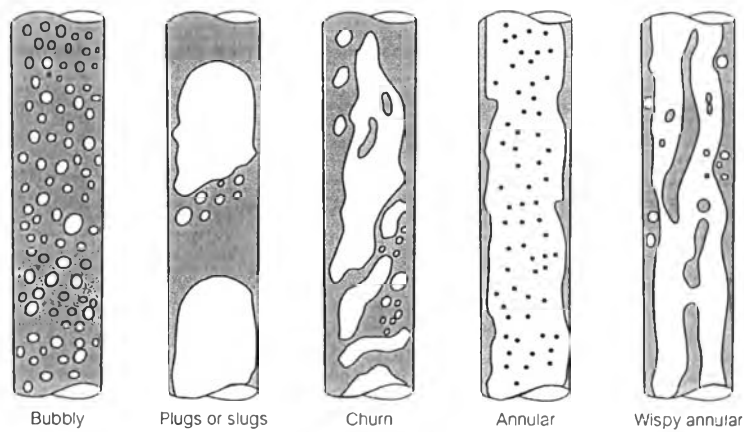
การไหลแบบหลายวัฏภาคเกิดจากของไหลภายในระบบมีสมบัติทางกายภาพต่างกัน เช่น แรงตึงผิว (surface tension) สภาพผิวของของไหล เป็นต้น ส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล พฤติกรรมการเปียกน้ำ (wetting) และมุมกระทำระหว่างของไหลกับผนังท่อ โดยลักษณะเฉพาะที่สำคัญมากสำหรับระบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครคือรูปแบบการไหล (flow regimes) และรูปร่างระหว่างผิว (interfacial shapes) ซึ่งระบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์สามารถแบ่งออก 2 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบการไหลของของเหลวกับแก๊ส และระบบการไหลของของเหลวกับของเหลว โดยส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรมระบบการไหลจะเป็นระบบของของเหลวกับของเหลว เนื่องจากระบบการไหลชนิดนี้มักเกิดจากการที่ของไหลไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้หรือเป็นสารอิมัลชัน เพราะมีสภาพผิวที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแรงกระทำระหว่างผิวของของไหล (interfacial force) หากของไหลมีแรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุล (cohesive force) สูง แรงกระทำระหว่างผิวของของไหลจะสูงขึ้นด้วย กล่าวคือหากของไหลมีสภาพผิวที่แตกต่างกันมาก จะเกิดแรงกระทำระหว่างวัฏภาคทำให้ของไหลแยกออกเป็นสองวัฏภาคอย่างชัดเจน ด้วยเหตุนี้ของไหลชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลสูงกว่า จะเกิดการรวมตัวกลายเป็นลักษณะหยดรูปร่างต่างๆ เช่นในกรณีของน้ำและน้ำมัน น้ำมันจะรวมตัวเป็นรูปหยดทรงกลม เพื่อต้องการลดแรงกระทำระหว่างผิวของของเหลว หรือทำให้ของเหลวรวมตัวกันได้บางส่วนสามารถทำได้ด้วยการใส่สารลดแรงตึงผิว (surfactant) หรือเพิ่มอุณหภูมิเพื่อลดแรงกระทำระหว่างผิวของของเหลว

การไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครที่มีขนาดเล็กสามารถกำหนดรูปแบบการไหลให้เป็นหยดในลักษณะต่าง ๆ ได้โดยการปรับอัตราเร็วของของไหลทั้ง 2 ชนิด ให้ความเร็วที่เหมาะสม โดยปกติแล้วขนาดของผลของของเหลวที่เป็นวัฏภาคกระจาย (dispersed phase) จะมีขนาดเล็กลง แต่ขนาดของของเหลวที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วในการไหลของของไหลเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีโมเมนตัมมากพอที่จะทำให้โมเลกุลของของไหลสามารถกระจายตัวออกจากกันได้มากขึ้น รูป 2.14 เป็นตัวอย่างแสดงถึงผลของอัตราเร็วในการไหลที่ส่งผลต่อขนาดของหยดอนุภาคในระบบน้ำและน้ำมันซิลิโคนในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราเร็วในการไหลเพิ่มมากขึ้น ขนาดของหยดอนุภาคเล็กลง (Ehrfeld, Hessel et al., 2005)

นอกจากนี้พฤติกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญในระบบของเหลว-เหลวคือพฤติกรรมการเปียกน้ำซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของผนังท่อกับของเหลว โดยปกติแล้วถ้าแรงระหว่างโมเลกุลของของเหลวกับพื้นผิวที่เป็นของแข็งมีค่ามากกว่าแรงภายในโมเลกุลของของเหลวจะทำให้เกิดแรงตึงผิวแบบอ่อนขึ้น ส่งผลให้ของไหลสามารถกระจายตัวบนพื้นผิวของของแข็งได้เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเปียกน้ำซึ่งจะเกิดขึ้นมากน้อยสามารถสังเกตได้จากมุมที่หยดอนุภาคของไหลสัมผัสกับผิวของวัสดุ (Wirth., 2008) พฤติกรรมการเปียกน้ำยังส่งผลต่อรูปแบบการไหล และความดันลดในเครื่องปฏิกรณ์ ถ้ามุมสัมผัสระหว่างของเหลวกับผิวหน้าของของแข็งมากจะทำให้ความดันลดที่เกิดในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครลดลง เนื่องจากหยดของของไหลมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับท่อไมโครน้อย



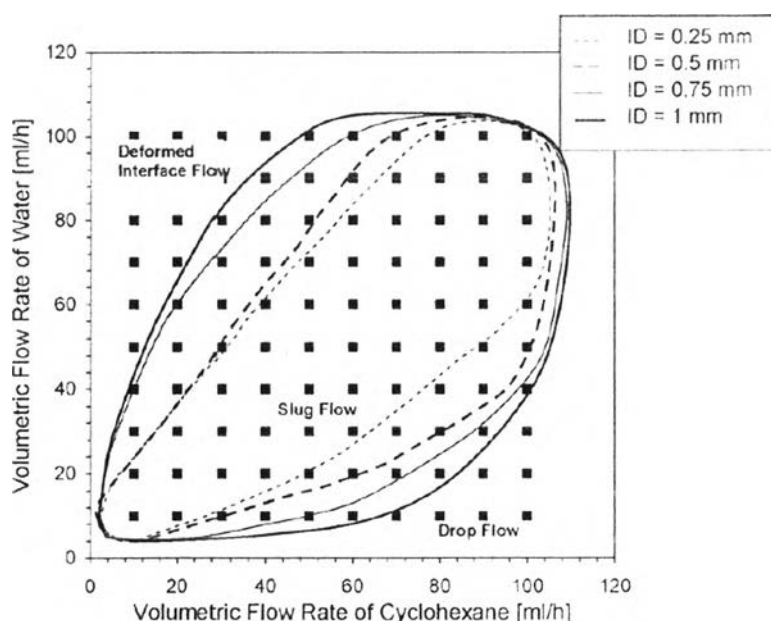
รูปที่ 2.14 ผลของอัตราการไหลที่ส่งผลต่อขนาดของหยดอนุภาคในระบบน้ำและน้ำมันซิลิโคน (Wirth., 2008)



รูปที่ 2.15 ลักษณะการไหลรูปแบบต่างๆภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร (Nguyen., 2011)

เมื่อพิจารณาถึงภาพรวมของการไหลของของเหลวสองวัฏภาคภายในท่อของเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร พบว่าแรงต่างๆเช่นแรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational force) แรงเฉื่อย (inertial force) แรงหนืด (viscous force) และแรงระหว่างโมเลกุล เป็นต้น ล้วนเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรูปร่างของอนุภาคในการไหลได้หลายรูปแบบดังแสดงในภาพ 2.15 หลักสำคัญในการเกิดรูปแบบการไหลแบบต่าง ๆ คือการเลือกชนิดของเหลวที่จะนำมาเป็นวัฏภาคกระจาย ให้มีสมบัติทางกายภาพของพื้นผิวแตกต่างจากผิวท่อ เช่น ท่อมีสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิกควรเลือกใช้ระบบอิมัลชันที่เป็นแบบน้ำในน้ำมัน และในทางกลับกันหากท่อที่ใช้มีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิกควรใช้ระบบอิมัลชันที่เป็นน้ำมันในน้ำ โดยรูปแบบที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยามากที่สุดคือรูปแบบการไหลแบบสลัก (slug flow) ที่ลักษณะของหยดอนุภาคของไหลมีขนาดสม่ำเสมอเมื่อเข้าสู่ภาวะคงตัวและมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาสูง (Kumacheva and Garstecki)

การที่สามารถบอกได้ว่าการไหลภายในท่อของของไหลหลายวัฏภาคเป็นไปแบบสลักหรือไม่ สามารถทำได้ค่อนข้างยาก ซึ่งต่างจากการไหลแบบวัฏภาคเดียวที่สามารถใช้ตัวเลขเรย์โนลด์มาอธิบายว่าเป็นการไหลชนิดใดได้เลย วิธีที่สามารถได้ข้อมูลที่ค่อนข้างแม่นยำในการกำหนดอัตราการไหลของสารตั้งต้นให้ผสมกันเป็นลักษณะของสลัก คือการทำกราดลองเก็บข้อมูลแล้วนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของสารตั้งต้นสองชนิด ดังรูปที่ 2.16 จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ท่อขนาดต่างกัน ช่วงบริเวณที่จะเกิด slug ก็เปลี่ยนแปลงไปด้วย (Fischer and Magdeburg., 1998)



รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของสารตั้งต้นสองชนิดในการไหลรูปแบบต่าง ๆ ของระบบไซโคลเฮกเซน-น้ำ ที่ความยาวท่อต่างกัน (Fischer and Magdeburg., 1998)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kulkarni, A.A. และคณะ (Kulkarni, Gorasia et al., 2007) ศึกษาผลของอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic) และการกระจายตัวของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมี (residence time) ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร (Microreactor) โดยเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีการออกแบบเป็นแบบตาข่าย (Mesh microreactor) ที่มีการทออย่างประณีตเป็นแนววิหระหว่างสองแผ่นแบนเรียบ และมีทางเข้าเฉพาะสำหรับก๊าซ และของเหลว จากผลการทดลองพบว่าลักษณะการไหลของก๊าซ - ของเหลว ในเครื่องปฏิกรณ์นี้มีลักษณะแยกกันเป็น 2 ภูมิภาคคือ ภูมิภาคของก๊าซและภูมิภาคของของเหลว โดยที่ ภูมิภาคของก๊าซจะมีขนาดใหญ่ไม่เป็นที่ต้องการทำให้การถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลมีค่าต่ำลง ส่วนเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะมีค่าประมาณ 0.774 ชั่วโมง

Fang, W.F. และคณะ (Fang and Yang., 2009) ศึกษาการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ไมโครที่มีการไหลแบบหมุนเวียน 3 มิติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเคมี และการผสมกันของของไหลชนิด พบว่าประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดที่ผิวสัมผัส (Interface) ระหว่างไอโอดีน (Iodine) และ วิตามินซี (L-ascorbic acid) มากที่สุดเพราะเป็นบริเวณที่มีการสัมผัสกันมากที่สุด ซึ่งสังเกตได้จากสีของไอโอดีนที่เปลี่ยนแปลงไป การกระจายตัวของของเหลวที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่ดีเพราะของเหลวไม่สามารถไหลได้ทั่วทั้งพื้นที่ในเครื่องปฏิกรณ์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีความยุ่งยากในการควบคุมอัตราการไหลของของเหลว และการผสมกันระหว่างสารตั้งต้น เนื่องจากเกิดความดันลด (Pressure drop) ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์

Chung, C.K. และคณะ (Chung, Shih et al., 2011) ศึกษาการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ไมโครที่มีความยาวในการผสมที่สั้น (short - mixing - length) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมให้ดีขึ้น พบว่าถ้าความกว้างของรู (Gap sizes) ที่ของไหลไหลผ่าน น้อยจะทำให้การผสมดีกว่าความกว้างของรูที่ของไหลไหลผ่านมาก นอกจากนี้ ความยาวของสิ่งที่กีดขวางการไหล (Baffle sizes) มากจะทำให้การผสมดีกว่าความยาวของสิ่งที่กีดขวางการไหลน้อย จากการทดลองยังพบว่าถ้าอัตราการไหลของของไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมีลดลง และเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกา โดยที่ขนาดของอนุภาคของซิลิกาจะแปรผกผันกับอัตราการไหลและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

Zhao, C.X. และคณะ (Zhao, He et al., 2011) ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคซีโอไลต์ (Zeolite) ขนาดนาโนเมตรในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร ที่มีฟังก์ชันเป็นเอกลักษณ์แตกต่างกัน เช่น core-shell, janus และ hybrid capsule หรือ micro gel particles แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียในการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ก็คือขั้นตอนในการเตรียมและการแยกอนุภาคนาโนซีโอไลต์มีหลายขั้นตอน และต้องใช้เครื่องปฏิกรณ์หลายเครื่อง ซึ่งจะมีความซับซ้อนและยุ่งยากต่อการใช้งานจริงแต่ถ้าทำการออกแบบให้ดีก็สามารถที่จะช่วยลดขั้นตอนในการเตรียมและการแยกอนุภาคนาโนซีโอไลต์ให้สั้นลงได้ เพื่อลดความซับซ้อนในการผลิตอนุภาคนาโนซีโอไลต์

Dummann, G. และคณะ (Dummann, Quittmann et al., 2003) ศึกษาการใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดไมโครเมตรแบบคัพพิลลารี (Capillary-microreactor) ในการศึกษาปฏิกิริยาไนเตรชัน (nitration reaction) ของสารพวกอะโรมาติกวงเดี่ยว (Single ring aromatic) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบคายความร้อน (exothermic) ลักษณะการไหลของของเหลวทั้ง 2 วัฏภาคเป็นการไหลแบบปลั๊ก (plug-flow) โดยรูปแบบของการไหลจะเป็นการไหลสลับปลั๊กของของเหลวทั้ง 2 วัฏภาค โดยมีขนาดของวัฏภาคแต่ละ วัฏภาคจะคงที่ การถ่ายโอนมวลระหว่างของเหลวทั้ง 2 วัฏภาคจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วของการไหล ถ้าอัตราเร็วของการไหลมากขึ้นการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาค 2 วัฏภาค ก็เพิ่มขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพของการถ่ายโอนมวลที่เพิ่มขึ้นสามารถพิจารณาได้จากรูปแบบการไหลแบบหมุนวนภายในสลัก

Ufer, A. และคณะ (Ufer, Sudhoff et al., 2011) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ของเมตา-ไนโตรโทลูอิน (m-nitrotoluene) ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคัพพิลลารี โดยโพแทสเซียมฟอแมต (Potassium formate) และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalysis) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารเรืองแสง (fluorescent particals) และ อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ในการศึกษาพฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์ และลักษณะการไหลของอนุภาคต่าง ๆ ภายในสลัก (Slug) โดยลักษณะการไหลภายในสลักเป็นการไหลแบบหมุนวน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วของสลัก ถ้าความเร็วของสลักเพิ่มขึ้นสัดส่วนการผสมภายในสลักก็จะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าแรงตึงผิวของสลักมีอิทธิพลต่อการผสม ถ้าแรงตึงผิวของสลักน้อยความหนืดของของเหลวต่อการผสมภายในสลักจะเกิดขึ้นได้ดี นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ชนิดท่อคัพพิลลารีกับเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (stirred tank) พบว่าที่ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไปของสารตั้งต้น (%Conversion) เดียวกันเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน จะใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคัพพิลลารี แต่ถ้าอัตราเร็วของสลักในเครื่องปฏิกรณ์แบบคัพพิลลารีเพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองเครื่องมีค่าเข้าใกล้กันมากขึ้น อย่างไรก็ตามเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนจะใช้พลังงานสูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคัพพิลลารี

Kashid, M. N. และคณะ (Kashid and Agar., 2007) ศึกษาอุทกพลศาสตร์ของการไหลแบบสลักของของเหลว ตัวแปรที่ศึกษามีดังต่อไปนี้ ขนาด, ลักษณะของสลัก และความดันลด จากการทดลองพบว่าถ้าเครื่องปฏิกรณ์ ไมโครชนิดท่อคัพพิลลารีมีขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.5 mm) การไหลแบบสลักจะสังเกตได้ไปจนถึงที่อัตราเร็วการไหล 70 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง หลังจากนั้นรูปแบบการไหลของของไหลจะไม่เป็นการไหลแบบสลักอีกต่อไป แต่ในกรณีของเครื่องปฏิกรณ์แบบคัพพิลลารีขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.75 และ 1 มิลลิเมตร) จะสังเกตเห็นการไหลแบบสลักที่สม่ำเสมอไปจนถึงอัตราเร็วการไหลสูงสุดที่ 100 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราเร็วในการไหลที่สูงที่สุดสำหรับของไหลทั้งสองวัฏภาคในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคัพพิลลารี

Plazl, I. และคณะ (Znidaršič-Plazl and Plazl., 2009) ศึกษาการใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กในการสังเคราะห์ไอโซเอมีลแอซีเตต (Isoamyl acetate) โดยใช้เอนไซม์ไลเปส (lipase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สิ่งที่น่าสนใจคือรูปแบบของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ทำมาจากแก้วโดยมีความขรุขระ

สัมพัทธ์ (Relative roughness) ประมาณ 1% กว้าง 220 นาโนเมตร หนา 50 นาโนเมตร และยาว 332 มิลลิเมตร และทางเข้าออกของสารจะมีลักษณะเป็นรูปตัว Y ซึ่งตรงปากทางเข้าออกจะทำด้วยเหล็กสแตนเลสและมีปั๊มกระบอกฉีด (Syringe pumps) 2 อัน จากการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ไอโซเอมิลแอสีเตดในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กโดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 1 นาทีและถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 เป็น 45 องศาเซลเซียส จะได้ร้อยละการเกิดสารผลิตภัณฑ์สูงสุด

Harries, N. และคณะ (Harries, Burns et al., 2003) ศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical model) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณหาอุทกพลศาสตร์ของของไหล (Computational fluid dynamic : CFD) และสร้างแบบจำลองของของไหลในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร โดยที่ข้อมูลต่าง ๆ ของการไหลของของไหลในเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับการทดลองจริง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาสมการที่ใช้ในการคำนวณหาตัวแปรต่าง ๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ เช่น ความเร็วของสลัก หรือโมเมนตัม นอกจากนี้ยังสามารถหาการกระจายตัวของความหนืด (Velocity distribution) เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองของความเร็วในการไหล (Speed map) และโปรแกรมยังสามารถสร้างแผนที่ความเข้มข้น (Concentration map) ของการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมีได้อีกด้วย

Kashid, M.N และคณะ (Kashid, Platte et al., 2007) ศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณพลศาสตร์ของของไหลเพื่อสร้างแบบจำลองของการหมุนเวียนภายใน (วัฏภาคเดียว) และการไหลแบบสลัก (สองวัฏภาค) เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของของไหลในเครื่องปฏิกรณ์แบบคัพฟิลลารี พบว่าอัตราการถ่ายโอนมวลจะแปรผันโดยตรงตามอัตราการไหลเวียนภายในสลัก เนื่องจากแรงเฉือนระหว่างแกนของสลักและผนังของคัพฟิลลารี เมื่อความเร็วของการไหลของของไหลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความรุนแรงของการหมุนวนภายในสลักเพิ่มขึ้น

Akbari, M.H. และคณะ (Akbari, Ardakani et al., 2011) ศึกษาการประยุกต์ใช้งานเครื่องปฏิกรณ์ไมโครที่จะนำไปเป็นอุปกรณ์ในการสังเคราะห์เซลล์เชื้อเพลิงภายในเครื่องอิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา เพื่อลดการสูญเสียพลังงานในกระบวนการรีฟอร์มมิ่งมีเทนแบบออโตเทอร์มอล (Methane autothermal reforming) โดยเครื่องปฏิกรณ์จะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงไปของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์น้อยมาก แสดงให้เห็นว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้สามารถช่วยลดการสูญเสียพลังงานได้

Freitas, L. และคณะ (Freitas, Da Ros et al., 2009) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลและโมโนกลีเซอไรต์โดยใช้เอนไซม์ไลเปส ในกระบวนการ Interestification ของน้ำมัน Babassu โดยชนิดของเอนไซม์ไลเปสที่ใช้ได้แก่ lipase AK, lipase PS, Calb L และ lipase G และเอนไซม์ทุกชนิดถูกตรึงบนวัสดุเชิงประกอบระหว่าง ซิลิกา กับ โพลีไวนิลแอสีเตด (Polyvinyl acetate : PVA) (silica -PVA composite) ผ่านพันธะโควาเลนต์ ในการสังเคราะห์ ไบโอดีเซลสารตั้งต้นที่ใช้ก็คือ น้ำมัน Babassu กับ กลีเซอรอล และใช้เอนไซม์ 10 % โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น ปฏิกิริยาดำเนินไปที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส พบว่าเอนไซม์ไลเปสจาก Burkholderia cepacia (lipase PS) เป็นเอนไซม์ที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล โดยจะได้ไบโอดีเซลร้อยละ 90.9 และมีอัตราการ



เกิดผลิตภัณฑ์ (productivity) เท่ากับ 7 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ส่วนในการเตรียมโมโนกลีเซอไรด์จะเตรียมจากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส (glycerolysis) ของน้ำมัน babassu ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของน้ำมันกับกลีเซอรอลอยู่ที่ 1: 6 โดยเอนไซม์ที่เหมาะสมคือ Lipase PS ที่ถูกตรึงบนวัสดุเชิงประกอบระหว่างซิลิกากับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ในภาชนะนี้จะทำให้เกิดโมโนกลีเซอไรด์ร้อยละ 9.7 โดยน้ำหนัก ภายในเวลา 4 ชั่วโมง

Pouilloux, Y. และคณะ (Pouilloux, Métayer et al., 2000) ศึกษาปฏิกิริยาของกลีเซอรอลกับกรดสเตียริก (Octadecanoic acid) ในการเตรียมโมโนกลีเซอไรด์ โดยงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบการใช้กรดและเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ที่เวลา 16 ชั่วโมง ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงไปร้อยละ 30 พบว่าถ้าใช้กรดพาราโทลูอินซัลโฟนิก (paratolulene sulfonic acid : PTSA) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าการใช้เบสเช่น โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่อย่างไรก็ตามกรดสเตียริกสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่ากับเบสโซเดียมคาร์บอเนตและอยู่ในรูปของกรดของเกลือโดยผ่านปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) ยังพบว่าถ้าใช้เบสโซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในภาชนะนี้จะทำให้ได้โมโนกลีเซอไรด์ร้อยละ 68 ซึ่งมากกว่าการใช้กรดเช่น พาราโทลูอินซัลโฟนิก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยจะได้โมโนกลีเซอไรด์เพียงร้อยละ 32.3 ที่ภาวะการเกิดปฏิกิริยาเดียวกัน และงานวิจัยนี้ยังเปรียบเทียบการใช้เบสที่เป็นของแข็ง เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide: MgO) กับซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide: ZnO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง พบว่าซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดในกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) ระหว่างกลีเซอรอลกับกรดสเตียริกในการเตรียมโมโนกลีเซอไรด์ เพราะซิงค์ออกไซด์มีความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์มากกว่าแมกนีเซียมออกไซด์

Pouilloux, Y. และคณะ (Pouilloux, Abro et al., 1999) ศึกษาปฏิกิริยาของกลีเซอรอลกับกรดไขมันในการเตรียมโมโนกลีเซอไรด์โดยผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange resins) โดยเรซินที่ใช้มีทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ Amberlyst 31, Amberlyst 16, Amberlyst 15 และ K1481 โดยกลีเซอรอลและกรดไขมันจะมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ที่ 90 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าเรซินชนิด Amberlyst 31 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุด เพราะมีความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์ถึงร้อยละ 90 ที่ร้อยละอัตราการเปลี่ยนแปลงไปของสารตั้งต้นเท่ากับ 50 ที่เวลา 48 ชั่วโมง นอกจากนี้พบว่าความยาวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนของกรดไขมันมีผลต่ออัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ถ้าความยาวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนลดลงจะทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสามารถเข้าไปในบริเวณที่เป็นรูพรุน (Pores sites) ของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

Heykants, E. และคณะ (Heykants, Verrelst et al., 1997) ศึกษาการใช้ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันกับกลีเซอรอล จากการทดลองพบว่าถ้าไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างกรดไขมันกับกลีเซอรอลก็สามารถเกิดขึ้นเองที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง โดยที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาแบบไม่ใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาจะแปรผันตามจำนวนอะตอมของคาร์บอนในกรดไขมัน เมื่อใช้ซีโอไลต์ชนิด HFAU 1

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 112 องศาเซลเซียส ที่เวลา 5 ชั่วโมง ปฏิกิริยาจะเกิดภายใน ซีโอไลต์ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะถูกควบคุมโดยการเคลื่อนที่ของกรดลอริก (Lauric acid) เพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอลโดยที่กลีเซอรอลจะอยู่เต็มซีโอไลต์ โดยร้อยละความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์เท่ากับ 100

