

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

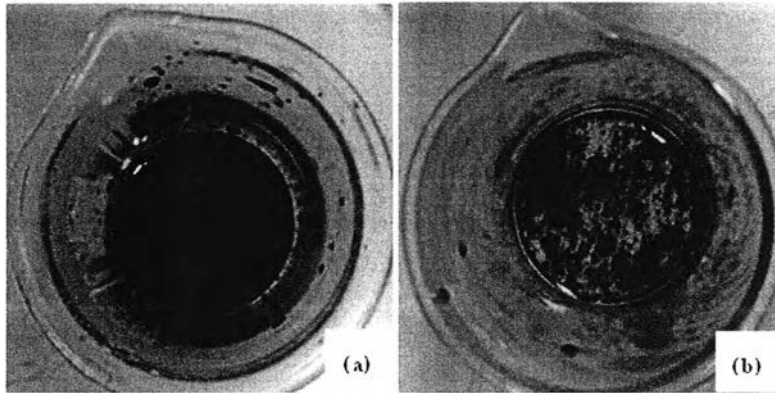
#### 4.1 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคะพิลลารี

การศึกษาดูทกพลศาสตร์ของกลีเซอรอลกับกรดออกทานอิกในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อคะพิลลารี ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญก่อนการนำเอาเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ไปใช้ในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรต์ โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาอุทกพลศาสตร์คือ รูปแบบการไหลของกลีเซอรอลกับกรดออกทานอิก อิทธิพลของความเร็วสลักและความดันลดที่เกิดขึ้นภายในท่อคะพิลลารี

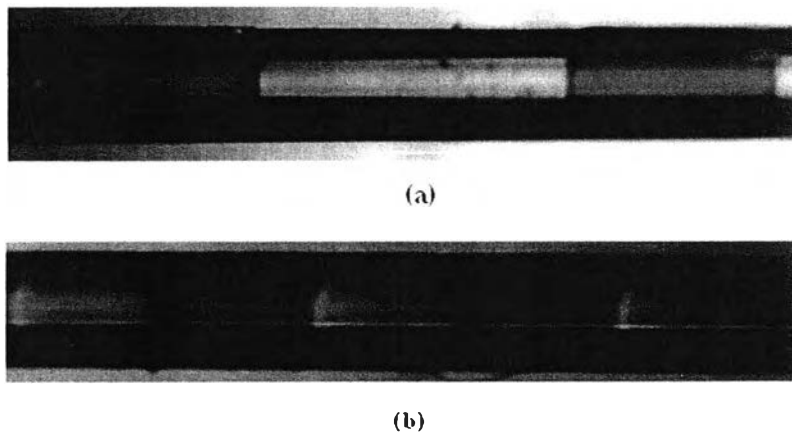
##### 4.1.1 รูปแบบการไหลของของไหลในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคะพิลลารี

###### 4.1.1.1 การย้อมสีสารตั้งต้น

สารตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ กลีเซอรอล และกรดออกทานอิก โดยสารทั้ง 2 ชนิดนี้ไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้ เมื่อผสมกันจะเกิดการแยกวัฏภาคโดยที่กรดออกทานอิกจะลอยอยู่บนส่วนกลีเซอรอลจะจมอยู่ชั้นล่าง เนื่องจากกรดออกทานอิกมีความหนาแน่นน้อยกว่ากลีเซอรอล เพื่อแยกแยะถึงการแยกวัฏภาคของกลีเซอรอลกับกรดออกทานอิกได้ชัดเจน จะต้องทำการย้อมสีของสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิด โดยใช้สีผสมอาหารสีแดงเป็นตัวย้อม จากผลการทดลองพบว่ากลีเซอรอลสามารถย้อมติดสีผสมอาหารได้ (รูปที่ 4.1(a)) ในขณะที่กรดออกทานอิกไม่สามารถย้อมสีได้ (รูปที่ 4.1(b)) เมื่อพิจารณาถึงการแยกวัฏภาคของสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคะพิลลารี โดยย้อมสีกลีเซอรอลด้วยสีผสมอาหารพบว่าสลักที่เกิดขึ้นเป็นได้ทั้งวัฏภาคของกลีเซอรอลและวัฏภาคของกรดออกทานอิก สลักของกลีเซอรอลจะมีลักษณะสมมาตรตามแนวขวาง ดังแสดงในรูปที่ 4.2(a) แต่สลักของกรดออกทานอิกจะมีลักษณะไม่สมมาตรตามแนวขวาง ดังแสดงในรูปที่ 4.2(b) นอกจากนี้พบว่าสลักของกรดออกทานอิกจะถูกล้อมรอบโดยส่วนที่เป็นสีแดง (ส่วนของกลีเซอรอล) การวิเคราะห์ถึงสาเหตุดังกล่าวจะอธิบายในหัวข้อต่อไป (4.1.1.2)



รูปที่ 4.1 การย้อมสีสารตั้งต้น: (a) กลีเซอรอล และ (b) กรดออกทาโนอิก



รูปที่ 4.2 การแยกเฟสของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครแบบท่อคัพฟิลลารีโดยย้อมสีกลีเซอรอล

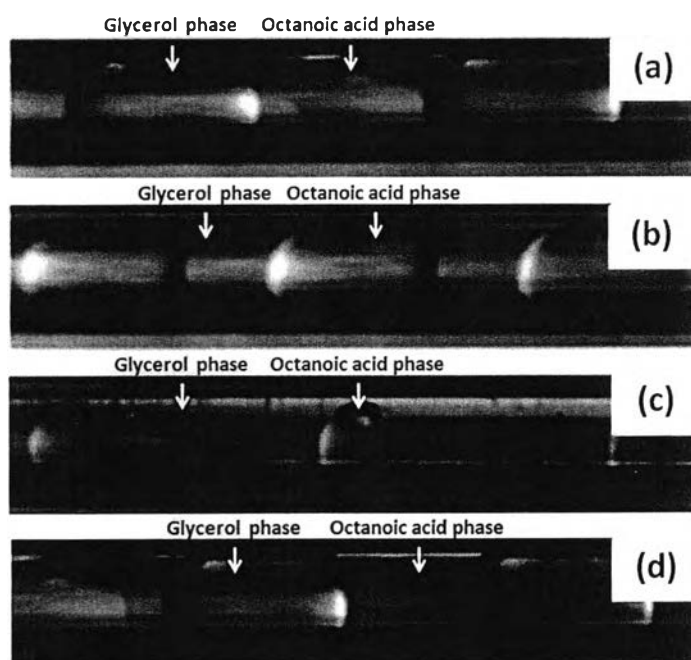
(a) การไหลของสลักกลีเซอรอล และ (b) การไหลของสลักกรดออกทาโนอิก

#### 4.1.1.2 อาณาบริเวณของรูปแบบการไหล (flow regime)

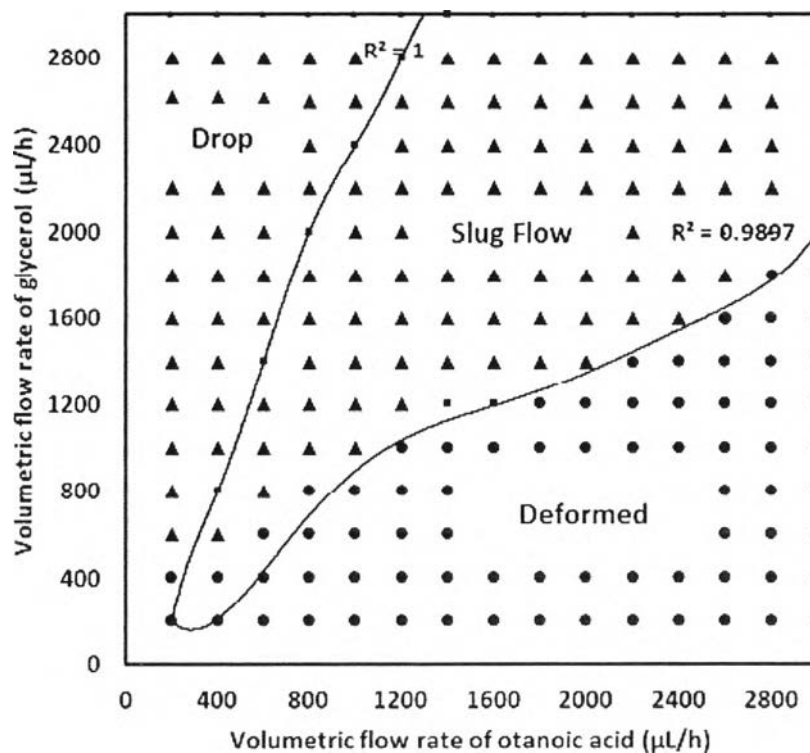
การพิจารณารูปแบบการไหลระหว่างกลีเซอรอลกับกรดออกทาโนอิกที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคัพฟิลลารีจะมีความสัมพันธ์กับ ขนาดของท่อ ชนิดของท่อ ความเรียบของผนังท่อด้านใน ลักษณะของตัวเชื่อมต่อ และอัตราเร็วในการไหลของของเหลวทั้ง 2 ชนิด โดยลักษณะของตัวเชื่อมต่อระหว่างของเหลวทั้ง 2 ชนิด ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีลักษณะเป็นรูปตัว T เมื่อของเหลวทั้ง 2 ชนิดไหลมาเจอกัน ณ บริเวณเชื่อมต่อของเหลวทั้ง 2 ชนิด จะเกิดการแยกภูมิภาคกัน จากผลการทดลองพบว่ารูปแบบการไหลภายในท่อคัพฟิลลารีของของเหลว

ทั้ง 2 ชนิด มี 3 รูปแบบ ได้แก่ การไหลแบบสลัก (slug flow) การไหลแบบหยด (drop flow) และการไหลแบบผิดรูป (deformed flow) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 การไหลแบบสลักเป็นการไหลที่สลักของของเหลวทั้ง 2 วัฏภาคมีความยาวมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (รูปที่ 4.3 (a) และ (b)) ในทางกลับกันการไหลแบบหยดเป็นการไหลของสลักที่มีความยาวน้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (รูปที่ 4.3 (c)) และการไหลแบบผิดรูปของสลักเป็นการไหลของสลักที่มีรูปร่างไม่เสถียร เช่น เมื่อสลักไหลไปในท่อสลักจะเกิดการสลายตัวแล้วไหลแนบชิดไปกับผนังท่อแสดงในรูปที่ 4.3 (d)

เมื่อพิจารณาถึงอาณาบริเวณของรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในท่อคะพิลลารีที่อัตราเร็วในการไหลต่าง ๆ จากผลการทดลองสามารถแบ่งอาณาบริเวณของรูปแบบการไหลได้ทั้ง 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ลักษณะการไหลของของเหลวทั้ง 2 วัฏภาคในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครแบบท่อคะพิลลารี (a, b) การไหลแบบสลัก, (c) การไหลแบบหยด และ (d) การไหลแบบผิดรูป



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการไหลกับอัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกกับที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคอปิลลารี:

- สลักของกลีเซอรอล และ ▲ สลักของกรดออกทานอิก

*การไหลแบบสลัก:* เมื่อพิจารณาการไหลแบบสลักในรูปที่ 4.4 พบว่าการเกิดสลักจะแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือสลักของกลีเซอรอล และสลักของกรดออกทานอิก การเกิดสลักของกลีเซอรอลจะเกิดภายใต้เงื่อนไขที่อัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกเท่ากันที่ 200, 400, 600 และ 800 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง การเกิดสลักของกลีเซอรอลจะเกิดขึ้นเมื่อกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกแยกตัวเข้าไประบบท่อของรูปตัว T เพราะที่อัตราเร็วในการไหลดังกล่าวกรดออกทานอิกแทรกตัวเข้าไปแบ่งส่วนของกลีเซอรอลออกเป็น ส่วน ๆ ที่สมมาตรกัน ส่งผลให้สลักมีรูปร่างที่สมมาตรดังแสดงในรูปที่ 4.2 (a) ในขณะที่การเกิดสลักของกรดออกทานอิกจะเกิดภายใต้เงื่อนไขที่อัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลสูงกว่าอัตราเร็วในการไหลของกรดออกทานอิก เนื่องจากกลีเซอรอลมีความหนืดมากกว่ากรดออกทานอิกเมื่ออัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลมากขึ้น กลีเซอรอลก็จะเฉือนเอากรดออกทานอิกให้ไหลแนบชิดไปกับผนังท่อ พอถึงจุด ๆ หนึ่งที่อัตราเร็วในการไหลของกรดออกทานอิกลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์เพราะสูญเสียพลังงานในการไหลให้กับแรงเสียดทานระหว่างผนังท่อ จะทำให้กรดออกทานอิกเกิดการสะสมรวมตัวกัน และขัดขวางการไหลของกลีเซอรอล กลีเซอรอลจึงดันกรดออกทานอิกให้เคลื่อนไปข้างหน้า ส่งผลให้การแยกตัวของของเหลวไม่ได้เกิด ณ บริเวณทางเชื่อมต่อของรูปตัว T สลักของกรดออกทานอิกที่ไม่สมมาตรตามแนวขวาง เนื่องจากการไหลที่ไหลภายในท่อนั้นจะมีความเร็วเป็นศูนย์ที่ผิวสัมผัสระหว่าง

ของไหลกับผนังท่อด้านใน เนื่องจากว่าของไหลไม่สามารถไหลตัวผ่านวัสดุที่อยู่ผนังได้เมื่อห่างออกจากผนังท่อความเร็วของของไหลจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมีความเร็วสูงสุดที่ตรงกลางของท่อ (ส่วนปลายของสลัก) ยิ่งถ้าอัตราเร็วของกลีเซอรอลสูงขึ้นก็จะดันให้สลักของกรตออกทานอิกเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้นส่งผลทำให้มุมระหว่างผนังท่อท่กับส่วนปลายของสลักของกรตออกทานอิกมีค่าสูงขึ้นหรือหัวสลักมีความแหลมมากขึ้นจึงทำให้รูปร่างของสลักจะมีลักษณะที่ไม่สมมาตรตามขวางดังแสดงในรูปที่ 4.2 (b)

*การไหลแบบหยุด* : การไหลแบบหยุดเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่อัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลสูงกว่าอัตราเร็วในการไหลของกรตออกทานอิกมาก ๆ เมื่อกลีเซอรอลมีอัตราเร็วในการไหลมากกว่ากรตออกทานอิก กลีเซอรอลจะเฉือนเอากรตออกทานอิกในไหลแนบชนิดไปกับผนังท่อ แต่จากการที่กลีเซอรอลมีอัตราเร็วในการไหลสูงกว่ากรตออกทานอิกมาก ๆ เวลาที่ใช้ในการสะสมตัวของกรตออกทานอิก ณ บริเวณที่มีความเร็วในการไหลเท่ากับศูนย์จึงมีค่าน้อยลงส่งผลทำให้ขนาดของสลักของกรตออกทานอิกลดลงเรื่อย ๆ เมื่ออัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจึงทำให้ขนาดสลักของกรตออกทานอิกมีความยาวน้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ

*การไหลแบบผิดรูป* : การไหลแบบผิดรูปเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่อัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลน้อยกว่าอัตราเร็วในการไหลของกรตออกทานอิกมาก ๆ เนื่องจากกลีเซอรอลมีอัตราเร็วในการไหลน้อยกว่ากรตออกทานอิก จะถูกกรตออกทานอิกแทรกตัวเข้าไปแบ่งกลีเซอรอลออกเป็นส่วน ๆ แล้วดันให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้า จากการที่กลีเซอรอลมีปฏิสัมพันธ์ (interaction) ที่ดีต่อผนังท่อเพราะมีสภาพผิวใกล้เคียงกันทำให้กลีเซอรอลชอบอยู่กับผนังท่อมากกว่ากรตออกทานอิก เพราะมีสภาพผิวที่ต่างกันจึงทำให้สลักของกลีเซอรอลไม่เสถียรเกิดการสลายตัวและไหลแนบชนิดไปกับผนังท่อ

เมื่อพิจารณารูปแบบการไหลทั้ง 3 รูปแบบ พบว่ารูปแบบการไหลแบบสลักเป็นรูปแบบการไหลที่เหมาะสมที่สุดต่อการสังเคราะห์สารภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร เนื่องจากรูปแบบการไหลแบบสลัก สลักจะมีรูปร่างที่เสถียร ไม่เกิดการสูญเสียรูปร่างของสลักระหว่างการไหลภายในท่อ และขนาดของสลักยังส่งผลดีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน และอัตราการถ่ายเทมวล สลักที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงกว่าสลักขนาดใหญ่ แต่สลักขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสลักกับผนังท่อน้อยกว่าสลักขนาดใหญ่ทำให้ความรุนแรงในการไหลวนของของเหลวภายในสลักลดลงเมื่อขนาดของสลักลดลง เนื่องจากความรุนแรงในการไหลวนของของเหลวภายในสลักเกิดจากที่สลักเสียดสีกับผนังท่อที่ขรุขระ (Freitas, Da Ros et al., 2009)

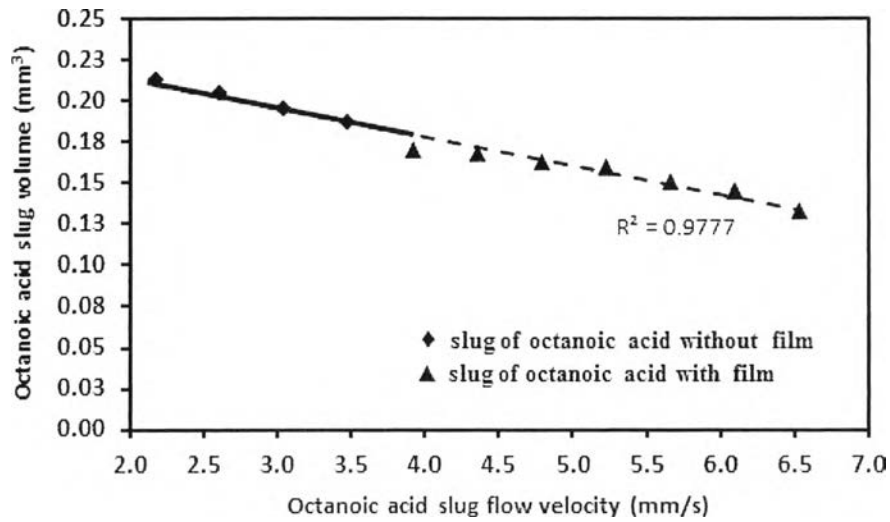
#### 4.1.2 ผลของความเร็วของสลัก

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าการไหลแบบสลักมีผลดีต่ออัตราการถ่ายเทมวลและอัตราการถ่ายเทความร้อน แต่ข้อมูลดังกล่าวยังไม่เพียงพอที่จะคาดเดาถึงอัตราการถ่ายเทมวลและอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคัพิลลารีได้อย่างครอบคลุม ดังนั้น

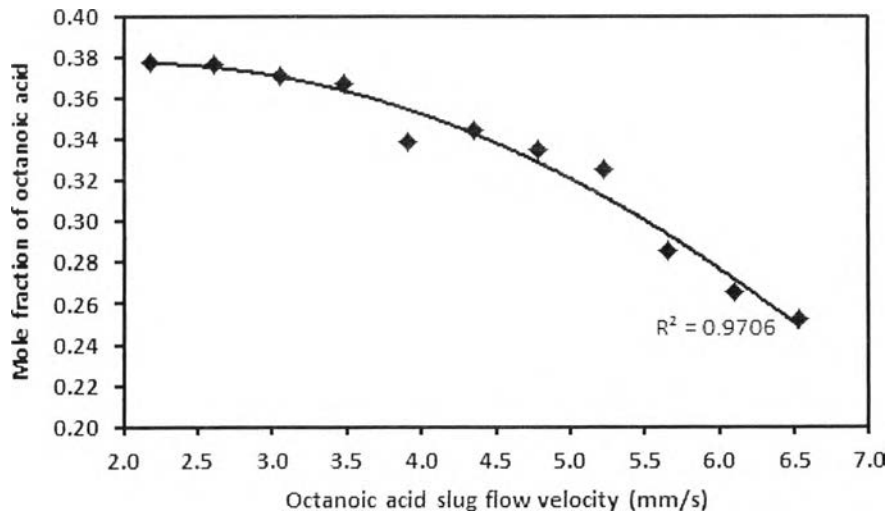
จำเป็นต้องศึกษาถึงขนาดของสลัก ในช่วงที่รูปแบบการไหลเป็นแบบ สลัก โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือความเร็วในการไหลของสลักที่สัมพันธ์กับขนาดของสลัก

#### 4.1.2.1 อัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกเท่ากัน

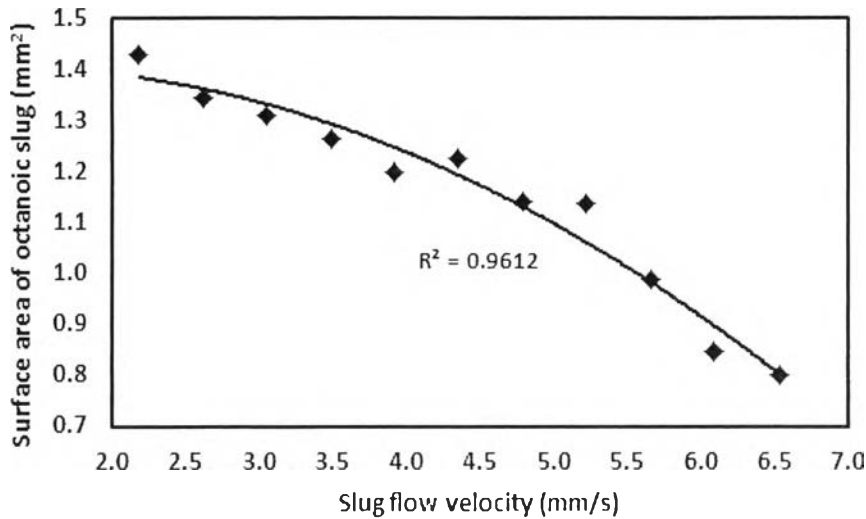
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสลักกับอัตราเร็วในการไหลของสลักของกรดออกทานอิก พบว่าเมื่ออัตราเร็วในการไหลเพิ่มขึ้นขนาดสลักของกรดออกทานอิกจะลดลงเนื่องจากเกิดการแทรกตัวของวัฏภาคกลีเซอรอลเข้าไปวัฏภาคของกรดออกทานอิกอย่างรวดเร็วจึงทำให้ของเหลวแต่ละวัฏภาคถูกแบ่งออกเป็นหลาย ๆ ส่วนส่งผลให้ความยาวของสลักลดลง (Akbari, Ardakani et al.) เมื่อขนาดสลักของกรดออกทานอิกลดลง อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของสลักเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสลักของกรดออกทานอิกกับกลีเซอรอลสูงขึ้น จากผลการทดลองยังพบว่าสลักของกรดออกทานอิกแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะได้แก่ สลักของกรดออกทานอิกที่ไม่มีฟิล์มกลีเซอรอลมาเคลือบ กับสลักของกรดออกทานอิกที่มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบที่พื้นผิว สลักของกรดออกทานอิกที่ไม่มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบเกิดขึ้นเมื่ออัตราเร็วในการไหลอยู่ระหว่าง 2.0 – 3.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่อัตราเร็วในการไหลดังกล่าวอัตราการไหลเข้าของกรดออกทานอิก และกลีเซอรอลไม่สูงมากนัก กรดออกทานอิกมีเวลามากพอในการสะสมและรวมตัวเมื่อถูกกลีเซอรอลเดือนไปกับผนังท่อจึงทำให้ขนาดของสลักของกรดออกทานอิกมีขนาดใหญ่และมีความกว้างเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ในทางกลับกันสลักของกรดออกทานอิกที่มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบจะเกิดขึ้นที่อัตราเร็วมากกว่า 3.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่อัตราเร็วดังกล่าวอัตราการไหลเข้าเครื่องปฏิกรณ์ของกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกจะสูงมาก ส่งผลให้กรดออกทานอิกมีเวลาน้อยในการสะสมรวมตัวกันจึงทำให้ขนาดของสลักลดลงจนมีความกว้างน้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางสลักของกรดออกทานอิกจึงมีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบ จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสลักกรดออกทานอิกกับอัตราเร็วในการไหลของสลักเมื่ออัตราเร็วในการไหลของกรดออกทานอิกและกลีเซอรอลเท่ากัน พบว่าเมื่ออัตราเร็วของสลักเพิ่มขึ้นสัดส่วนโดยโมลของสลักของกรดออกทานอิกจะลดลง ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของสลักของกรดออกทานอิกที่ลดลง เพราะเมื่อขนาดสลักของกรดออกทานอิกลดลงปริมาตรของกลีเซอรอลที่ล้อมรอบสลักของกรดออกทานอิกจะเพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนโดยโมลลดลงเมื่อขนาดของสลักกรดออกทานอิกเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวสลักของกรดออกทานอิกกับอัตราเร็วในการไหลของสลักพบว่าเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสลักเพิ่มขึ้นพื้นที่ผิวสัมผัสของสลักจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.7 เนื่องจากพื้นที่ผิวของสลักจะแปรผันโดยตรงกับขนาดของสลัก



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของสลักของกรดออกทานอิกกับความเร็วในการไหลเมื่อกำหนดให้อัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกเท่ากัน (ในกรณีที่ความเร็วน้อยกว่า 2 mm/s จะปรากฏสลักของกลีเซอรอล)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลกรดออกทานอิกกับอัตราเร็วในการไหลของสลักเมื่อกำหนดให้อัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกเท่ากัน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสลักของกรตออกทานอิกกับอัตราเร็วในการไหลของสลักกรตออกทานอิกเมื่ออัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลและกรตออกทานอิกเท่ากัน

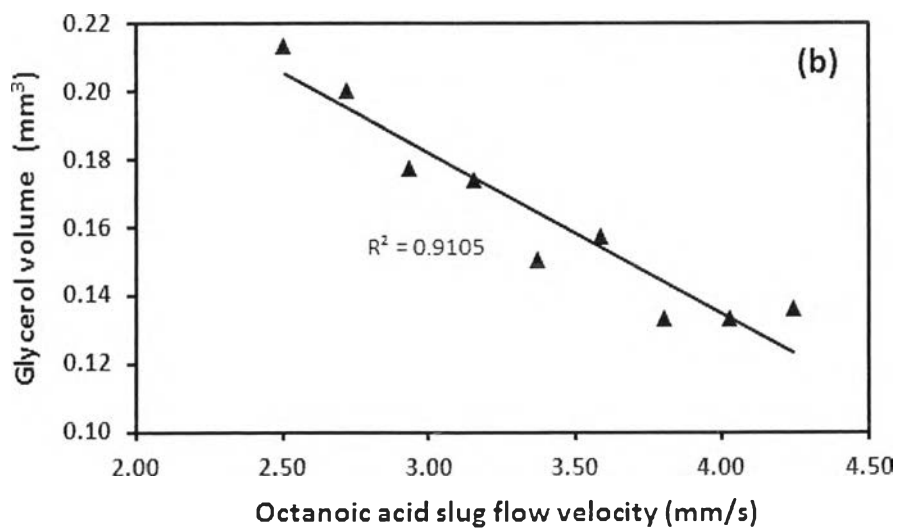
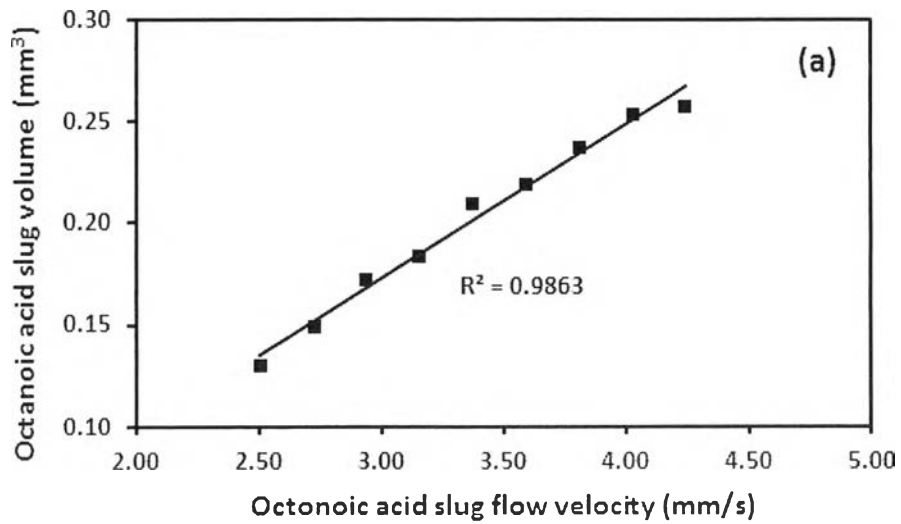
#### 4.1.2.2 อัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลคงที่

จากการศึกษาของอัตราการเร็วในการไหลของกลีเซอรอลกับกรตออกทานอิก โดยให้อัตราการเร็วในการไหลเข้าเครื่องปฏิกรณ์ของกลีเซอรอลคงที่ ที่ 1,500 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง พบว่าเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสลักเพิ่มขึ้น ปริมาตรของสลักของกรตออกทานอิกจะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (a) ในทางกลับกันปริมาตรของกลีเซอรอลที่อยู่ล้อมรอบสลักจะลดลงเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสลักเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8 (b) เนื่องจากอัตราเร็วในการไหลเข้าเครื่องปฏิกรณ์ของกรตออกทานอิกเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราเร็วในการไหลเข้าเครื่องปฏิกรณ์ของกลีเซอรอลคงที่ ดังนั้นปริมาณของกรตออกทานอิกที่ไหลเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์จะมากขึ้นส่งผลทำให้ปริมาตรของสลักของกรตออกทานอิกเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาตรของกลีเซอรอลจะลดลงเพราะมีอัตราเร็วในการไหลเข้าเครื่องปฏิกรณ์คงที่ เมื่อพิจารณาสัดส่วนโดยโมลของกรตออกทานอิกกับอัตราเร็วในการไหลของสลักของกรตออกทานอิก พบว่าเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสลักของกรตออกทานอิกเพิ่มขึ้น สัดส่วนโดยโมลของกรตออกทานอิกจะเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.9 เนื่องจากปริมาตรของสลักของกรตออกทานอิกเพิ่มขึ้น แต่ปริมาตรของกลีเซอรอลลดลง (รูปที่ 4.8(a) และ(b)) เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวสลักของกรตออกทานอิกที่สัมพันธ์กับอัตราเร็วในการไหลของสลักเมื่ออัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลคงที่เท่ากับ 1,500 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง พบว่าพื้นที่ผิวสัมผัสของสลักของกรตออกทานอิกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วในการไหลเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.10 เนื่องจากเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสลักเพิ่มขึ้นขนาดสลักของกรตออกทานอิกจะเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8 (a) ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสของสลักของกรตออกทานอิกเพิ่มขึ้น จากข้อมูลผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวของสลักแปร

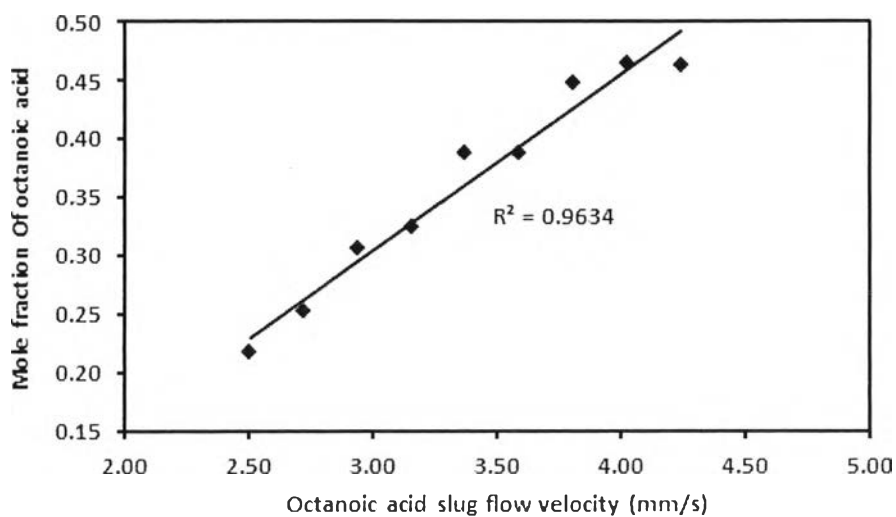




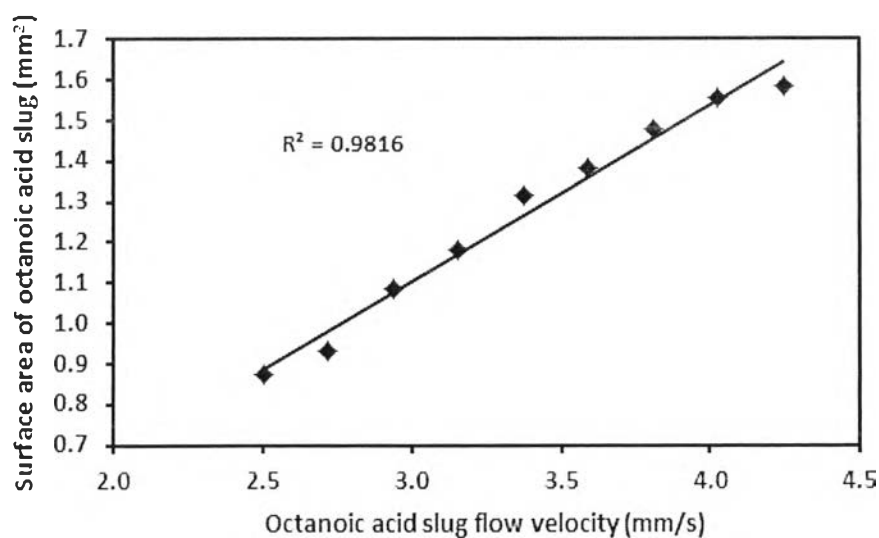
ผันโดยตรงกับขนาดของสลัก โดยตัวอย่างการคำนวณความเร็วสลัก สัดส่วนโดยโมลของสลัก และพื้นที่ผิวสัมผัสของสลักแสดงในภาคผนวก ก.2 ก.4 และ ก.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสลักของกรดออกทานอิก (a) และปริมาตรของกลีเซอรอล (b) กับความเร็วในการไหลเมื่ออัตราเร็วการไหลของกลีเซอรอลคงที่เท่ากับ 1,500 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์สัดส่วนโดยโมลของสลักของกรดออกทานอิกกับอัตราเร็วในการไหลของสลักกรดออกทานอิกเมื่ออัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลคงที่เท่ากับ 1,500 ไมโครต่อชั่วโมง



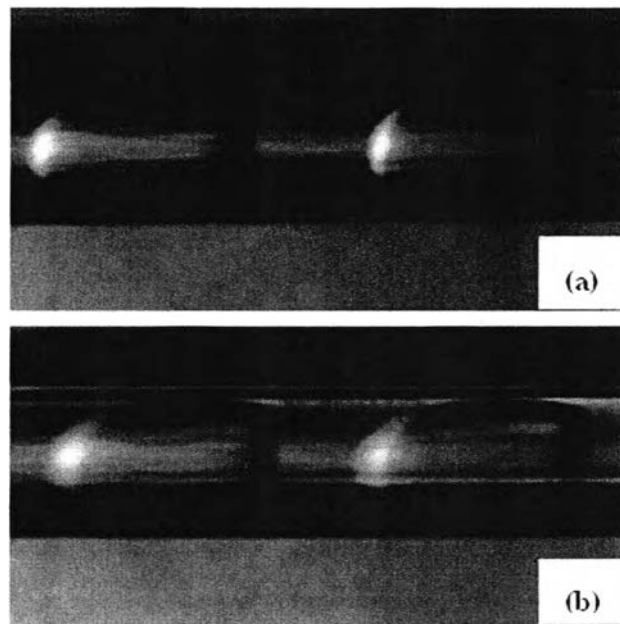
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสลักของกรดออกทานอิกกับอัตราเร็วในการไหลของสลักของกรดออกทานอิกเมื่ออัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลคงที่เท่ากับ 1,500 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง

#### 4.1.1 ความดันลดตามยาวของท่อเคพิลลารี

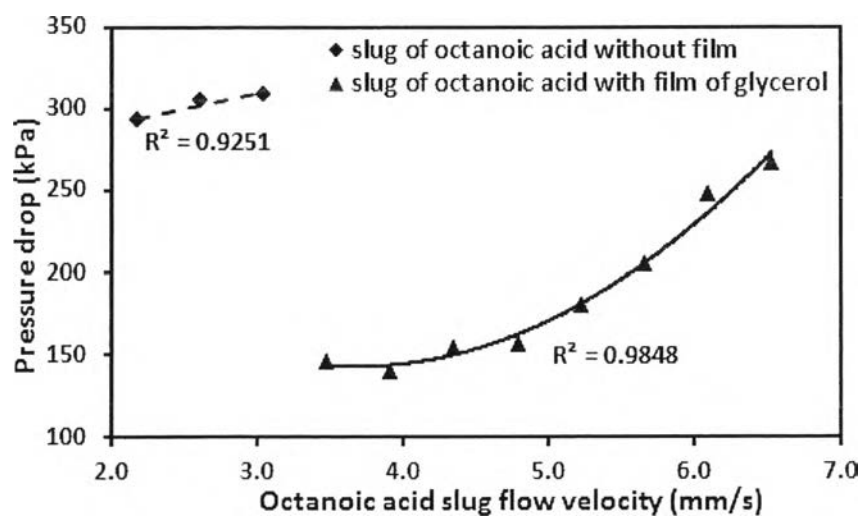
ในงานวิจัยนี้ศึกษาความดันลดที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของสลักกรดอกทาทานอิกทั้งในกรณีที่มีและไม่มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบตามความยาวของท่อเคพิลลารีโดยคำนวณจากสมการของ Hagen-Poiseuille และ Young-Laplace (Kashid and Agar., 2007) ค่าความดันลดที่เกิดขึ้นภายในท่อเคพิลลารีคือการสูญเสียพลังงานในระหว่างการไหลของสลักกรดอกทาทานอิกตลอดความยาวของท่อ

##### 4.1.3.1 ความดันลดเมื่ออัตราเร็วของกลีเซอรอลและกรดอกทาทานอิกเท่ากัน

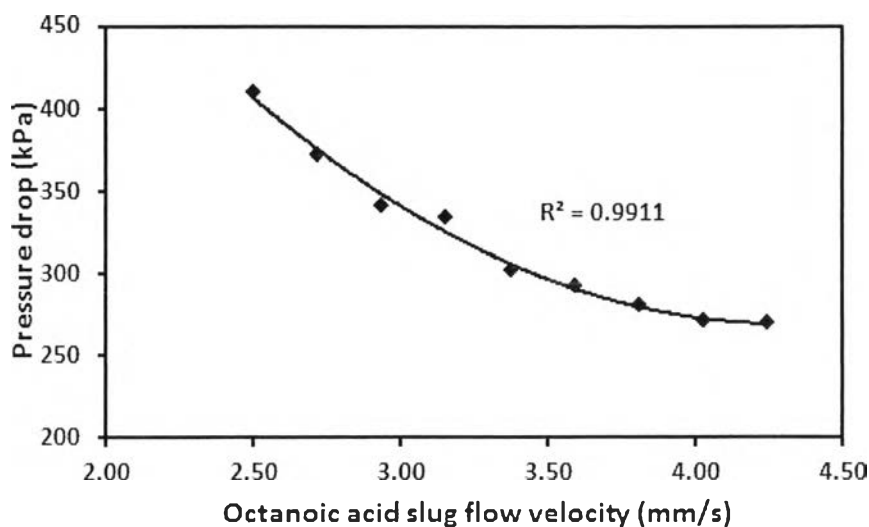
จากการทดลองอุทกพลศาสตร์ของรูปแบบการไหลของสลักของกรดอกทาทานอิกที่สัมพันธ์กับอัตราเร็วในการไหลของสลักพบว่าสลักของกรดอกทาทานอิกจะมี 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 สลักของกรดอกทาทานอิกที่ไม่มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบ (รูปที่ 4.11 (a)) และสลักของกรดอกทาทานอิกที่มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบ (รูปที่ 4.11 (b)) นอกจากนี้พบว่าเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสลักมากขึ้นลักษณะของสลักของกรดอกทาทานอิกจะมีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบ (รูปที่ 4.12) ซึ่งในการหาความดันลดจะต้องใช้สมการที่แตกต่างกันในการคำนวณ จากผลการทดลองในการหาความดันลดเมื่ออัตราเร็วในการไหลเข้าเครื่องปฏิกรณ์ไมโครของกลีเซอรอลและกรดอกทาทานอิกเท่ากัน พบว่าอัตราเร็วในการไหลของสลักของกรดอกทาทานอิกมากขึ้น ความดันลดที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากความดันลดขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการไหล ความหนืดของของไหล และความขรุขระของผนังท่อด้านในเป็นหลัก (Kashid and Agar., 2007) เมื่ออัตราเร็วในการไหลเพิ่มขึ้นแรงเสียดทานระหว่างผนังท่อกับสลักของกรดอกทาทานอิกจะเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันลดมีค่าสูงขึ้นหรือสลักสูญเสียพลังงานให้กับแรงเสียดทานมากขึ้นนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วในการไหลของสลักที่มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบกับสลักที่ไม่มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบ พบว่าสลักที่ไม่มีฟิล์มของกลีเซอรอลเคลือบจะมีความดันลดสูงกว่าสลักที่มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบ เนื่องจากสลักที่ไม่มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบจะสัมผัสกับผนังท่อที่ขรุขระโดยตรงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานสูงกว่าสลักที่มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบ สลักที่มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบจะสัมผัสกับของเหลวที่เป็นกลีเซอรอลซึ่งมีความราบรื่นมากกว่าผิวของผนังท่อเคพิลลารี



รูปที่ 4.11 ลักษณะของสลักกรดออกทานอิก (a) ไม่มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบ (b) มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับอัตราเร็วในการไหลของสลักของกรดออกทานอิกเมื่ออัตราการไหลของกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกเท่ากัน



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับอัตราเร็วในการไหลของสลักเมื่ออัตราเร็วในการไหลเข้าเครื่องปฏิกรณ์ของกลีเซอรอลคงที่ที่ 1,500 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง

#### 4.1.3.2 ความดันตกเมื่ออัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลคงที่ 1,500 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง

การศึกษาความดันตกเมื่ออัตราเร็วในการไหลเข้าเครื่องปฏิกรณ์ไมโครของกลีเซอรอลคงที่ที่ 1,500 ไมโครลิตรต่อชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสลักเพิ่มขึ้นความดันตกจะมีค่าลดลงนั้นหมายถึงการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหลภายในท่อคะพิลลารีของสลักของกรตออกทานอิกลดลง เพื่ออธิบายถึงสาเหตุดังกล่าวได้อย่างชัดเจนจำเป็นต้องพิจารณาถึงอิทธิพลของอัตราเร็วในการไหลของสลักที่สัมพันธ์กับขนาดของสลักเมื่อคงที่อัตราเร็วในการไหลของสลักของกรตออกทานอิกเพิ่มขึ้นขนาดสลักของกรตออกทานอิกจะเพิ่มขึ้นแต่ปริมาตรของกลีเซอรอลจะลด ด้วยปัจจัยดังกล่าวมีผลทำให้ความดันตกลดลง เนื่องกรตออกทานอิกมีอันตรกิริยา (interaction) กับผนังที่น้อยกว่ากลีเซอรอล เพราะกลีเซอรอลมีหมู่ไฮดรอกซิลเช่นเดียวกับโมเลกุลของผนังท่อด้านใน แต่โมเลกุลของกรตออกทานอิกจะหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (carboxyl group) ทำให้กรตออกทานอิกไม่ยึดติดกับผิวของผนังท่อ และเมื่อขนาดของสลักของกรตออกทานอิกเพิ่มขึ้นแต่ปริมาตรของกลีเซอรอลลดลงจะทำให้อันตรกิริยาระหว่างของเหลวกับผิวของผนังท่อลดลงส่งผลให้การสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างของเหลวกับผนังท่อลดลง ความดันตกจึงลดลงเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสลักเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของระบบของเหลว – ของเหลวระหว่างกลีเซอรอลกับกรตออกทานอิกในเครื่องปฏิกรณ์ทำให้ทราบถึงข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญต่อการสังเคราะห์

โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร อาทิเช่น รูปแบบการไหลของสลัก ขนาดของสลัก และความดันลวดที่สัมพันธ์กับอัตราเร็วในการป้อนสารตั้งต้นเข้าเครื่องปฏิกรณ์ จากการทดลองพบว่าการไหลแบบสลักเป็นการไหลที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์เนื่องจากรูปร่างของสลักของกรตออกทานอนิกมีความเสถียร โดยที่ขนาดของสลักของกรตออกทานอนิกจะแปรผันตามกับอัตราเร็วในการป้อนกรตออกทานอนิกและจะแปรผกผันกับอัตราเร็วในการป้อนกลีเซอรอลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ การศึกษาอุทกศาสตร์ยังพบว่าความดันลวดที่เกิดขึ้นภายในท่อคัพฟิลลารีจะแปรผกผันกับขนาดสลักของกรตออกทานอนิกถ้าขนาดสลักของกรตออกทานอนิกเพิ่มขึ้นจะทำให้สลักสูญเสียพลังงานในการไหลน้อยลง

#### 4.2 การศึกษาการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคัพฟิลลารี

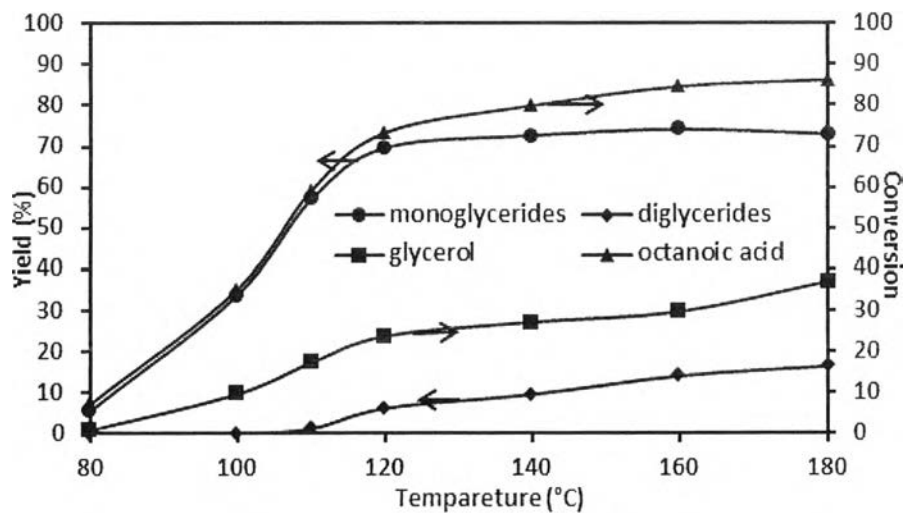
ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาอุทกพลศาสตร์ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการไหลของของเหลวที่เกิดขึ้นภายในท่อคัพฟิลลารี จึงง่ายต่อการศึกษากาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ โดยปัจจัยที่ศึกษาในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครได้แก่ อุณหภูมิ สัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรตออกทานอนิก และเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์

##### 4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์

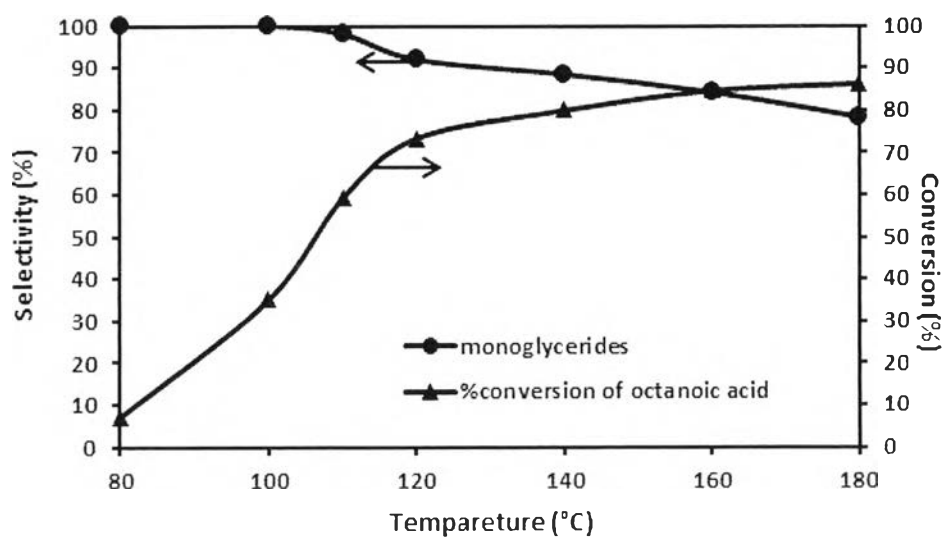
ในการศึกษาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคัพฟิลลารี กำหนดสัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรตออกทานอนิกคงที่ที่ 2 : 1 เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 25 นาที อุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์คือ 80, 100, 110, 120, 140, 160 และ 180 องศาเซลเซียส ตามลำดับพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 80–120 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.14) เนื่องจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้อัตราการชนกันระหว่างโมเลกุลของกลีเซอรอลกับกรตออกทานอนิกเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์จะเริ่มคงที่หลังจากอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสและให้ร้อยละผลได้สูงสุดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยผลิตภัณฑ์ของไดกลีเซอไรด์จะเริ่มปรากฏขึ้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และมีร้อยละผลได้เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของโมโนกลีเซอไรด์บางส่วนสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับกรตออกทานอนิกจึงทำให้ปริมาณของไดกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความเลือกสรร (selectivity) ในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส มีความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์เท่ากับร้อยละ 92 ซึ่งสูงกว่าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ดังนั้นในงานวิจัยนี้ถือว่าที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากใช้ อุณหภูมิไม่สูงเกินไปสำหรับการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ แม้จะได้ร้อยละผลได้ของ โมโนกลีเซอไรด์

น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส แต่ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเพียงร้อยละ 4.5 ซึ่งถือว่าค่อนข้างน้อย

รูปที่ 4.16 แสดงกราฟโครมาโตแกรมของกรดออกทานอิก กลีเซอรอล โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ เมื่อเทียบเปรียบกับพีคของสารมาตรฐานแล้ว พบว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเริ่มปรากฏพีคของโมโนกลีเซอไรด์ที่เวลา 10 นาที เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 110 องศาเซลเซียส พื้นที่ใต้พีคของโมโนกลีเซอไรด์มีแนวโน้มที่เพิ่มซึ่งแสดงถึงปริมาณของโมโนกลีเซอไรด์ที่เพิ่มขึ้นและที่อุณหภูมินี้เริ่มปรากฏพีคของไดกลีเซอไรด์ที่เวลาประมาณ 15 นาที และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 180 องศาเซลเซียส พื้นที่ใต้พีคของโมโนกลีเซอไรด์เริ่มมีแนวโน้มคงที่ แต่พื้นที่ใต้พีคของไดกลีเซอไรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมินี้เริ่มปรากฏพีคของไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์แปรผกผันกับอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา

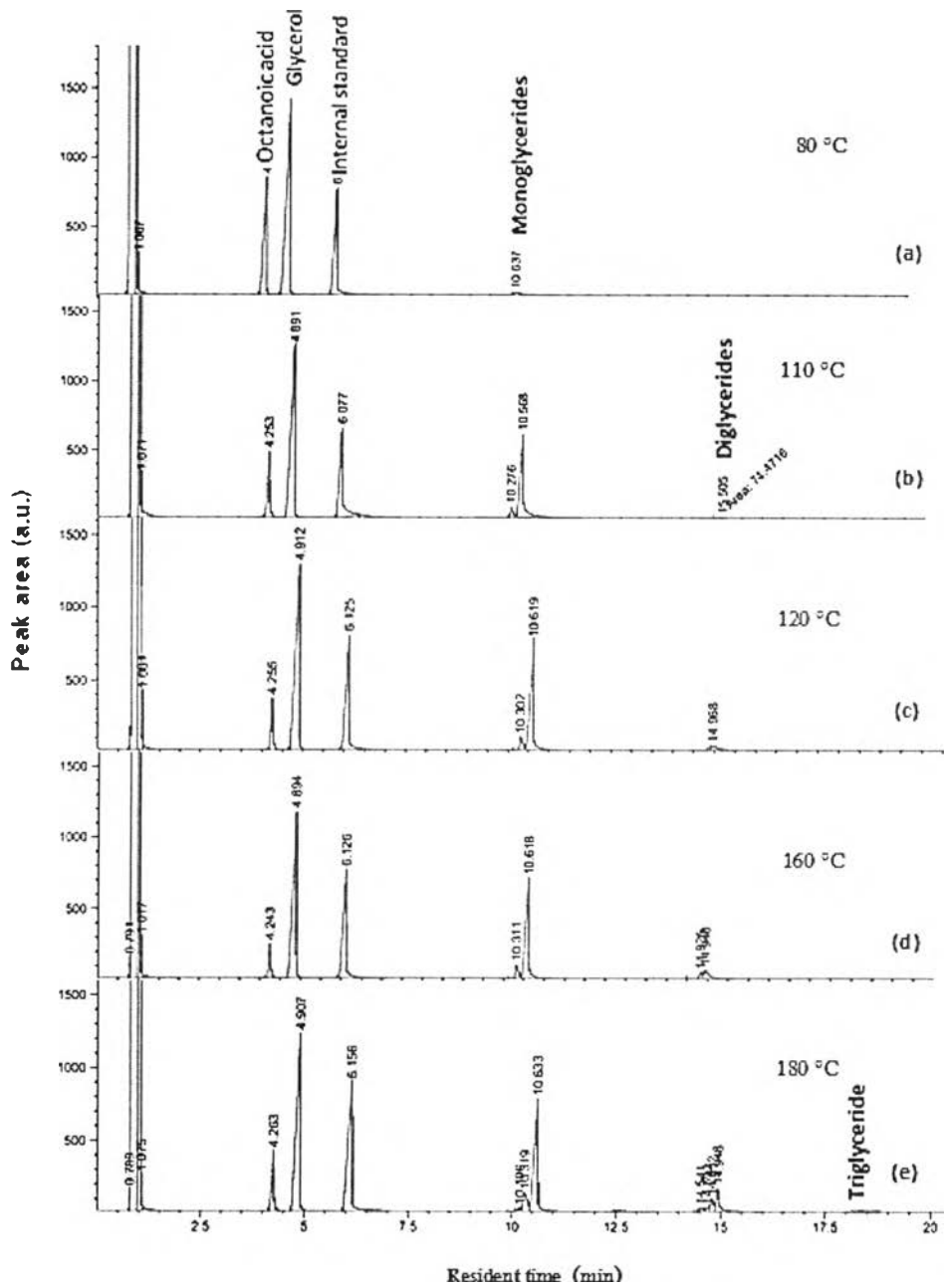


รูปที่ 4.14 อัตราการเปลี่ยนแปลงไปของสารต้น และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร



รูปที่ 4.15 ความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรต์และการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทอทานอิกที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรต์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคะพิลลารี





รูปที่ 4.16 แก๊สโครมาโทแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสัญญาณกับเวลา ณ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ (a) 80 °C, (b) 110 °C, (c) 120 °C, (d) 160 °C และ (e) 180 °C

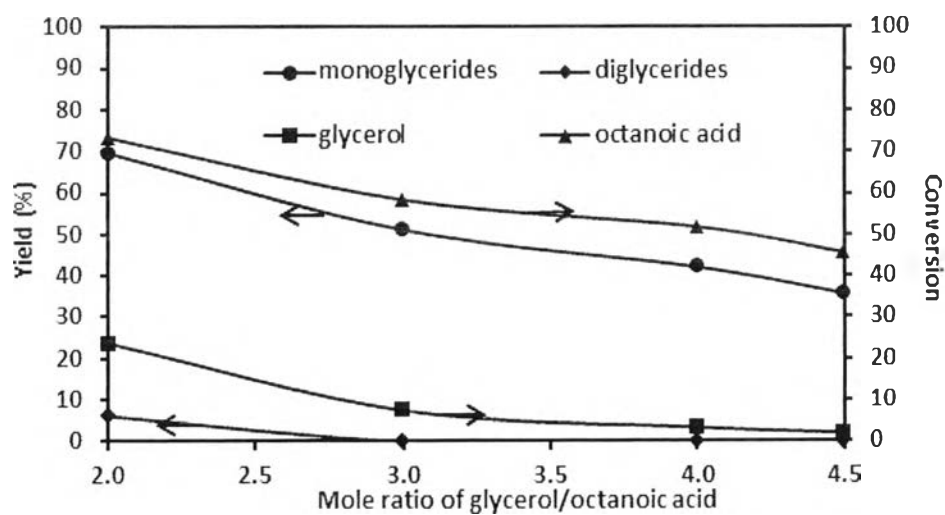
#### 4.2.1 อิทธิพลของสัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิก

การศึกษาหาสัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกที่เหมาะสมในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ภายใต้เครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคะพิลลารี กำหนดอุณหภูมิในเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ 120 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมี 25 นาที โดยสัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกที่ใช้ในการศึกษาคือ 2:1, 2.5:1, 3:1, 3.5:1, 4:1 และ 4.5:1 ตามลำดับ สาเหตุที่ไม่ศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกที่น้อยกว่า 2:1 เนื่องจากข้อมูลทางอุทกพลศาสตร์ระบุว่ารูปแบบการไหลจะเป็นการไหลแบบผิวดรูป ในขณะที่สัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกมากกว่า 4.5:1 รูปแบบการไหลจะเป็นการไหลแบบหยด ซึ่งการไหลทั้ง 2 แบบ นี้ไม่ส่งผลต่อการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ โดยที่สัดส่วนโดยโมลดังกล่าวข้างต้นถูกกำหนดโดยอัตราเร็วในการป้อนสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร ถ้าอัตราเร็วในการป้อนกลีเซอรอลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเพิ่มขึ้น อัตราเร็วในการป้อนกรดออกทานอิกเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไมโครก็จะลดลง และทุก ๆ สัดส่วนโดยโมลจะมีอัตราเร็วรวมในการไหลเข้าเครื่องปฏิกรณ์ของสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดเท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงว่าความเร็วของสลักทุก ๆ สัดส่วนโดยโมลจะคงที่ และจากการศึกษาอาณาบริเวณของรูปแบบการไหลดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าที่สัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกในช่วงที่ 2:1 ถึง 4:1 รูปแบบการไหลจะเป็นการไหลของสลักของกรดออกทานอิก

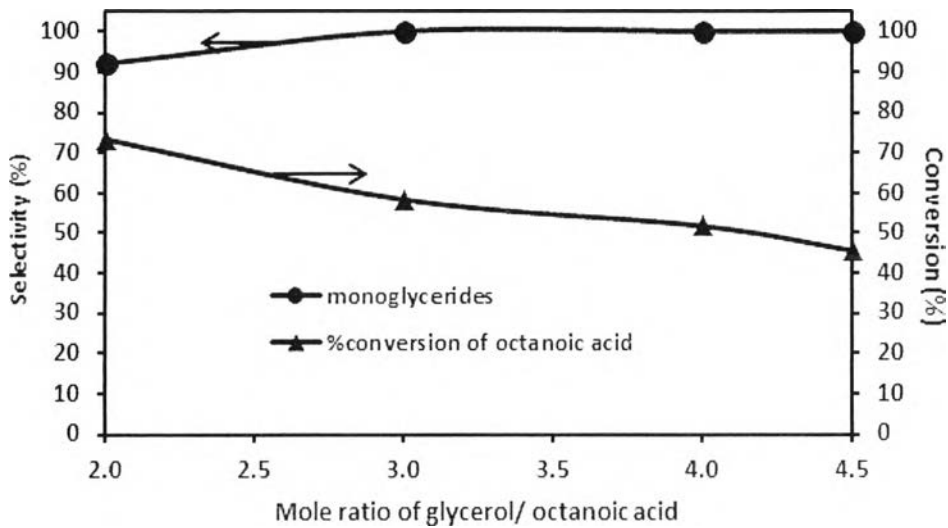
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกกับร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ พบว่าเมื่อสัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกเพิ่มขึ้น ร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ รวมถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงไปของกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกจะลดลง ที่สัดส่วนโดยโมลเท่ากับ 2:1 เกิดโมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์มากที่สุดคือร้อยละ 69.8 และ 6.1 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์ (รูปที่ 4.18) พบว่าเมื่อสัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกตั้งแต่ 3:1 ขึ้นไปความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์จะเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์จะลดลง เนื่องจากอัตราการเร็วในการป้อนกลีเซอรอลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไมโครสูงกว่าอัตราการเร็วในการป้อนกรดออกทานอิก (ดังแสดงในตารางที่ 4.1) ขนาดหรือปริมาตรของสลักกรดออกทานอิกจะลดลงทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสลักกรดออกทานอิกกับผนังท่อลดลง ส่งผลให้อัตราในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์ลดลงเนื่องจากขนาดของสลักกรดออกทานอิกมีผลต่ออัตราการถ่ายเทมวล โดยสลักที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างผนังท่อทำให้เกิดแรงเสียดทานเนื่องจากความขรุขระผนังท่อกับสลักมากขึ้นทำให้การไหลวนของของเหลวภายในสลักรุนแรงมากขึ้น ส่งเสริมให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสูงขึ้น (Karinen and Krause., 2006, Freitas, Da Ros et al., 2009) ดังนั้นที่สัดส่วนโดยโมล 2:1 จึงเป็นสัดส่วนโดยโมลที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ ถึงแม้จะมีไดกลีเซอไรด์เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม แต่มีปริมาณที่น้อยมากเพียง 6.05 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับปริมาณของโมโนกลีเซอไรด์ที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราเร็วในป้อนกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่สัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกต่าง ๆ

สัดส่วนโดยโมลของ กลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิก	อัตราเร็วในการป้อนสาร (ไมโครลิตรต่อชั่วโมง)		อัตราเร็วรวมในการไหล (ไมโครลิตรต่อชั่วโมง)
	กลีเซอรอล	กรดออกทานอิก	
2.0 : 1.0	1022	1121	2143
2.5 : 1.0	1141	1002	2143
3.0 : 1.0	1237	906	2143
3.5 : 1.0	1317	826	2143
4.0 : 1.0	1384	759	2143



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกกับร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์



รูปที่ 4.18 ความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์และการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกที่สัมพันธ์กับสัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

#### 4.2.3 อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

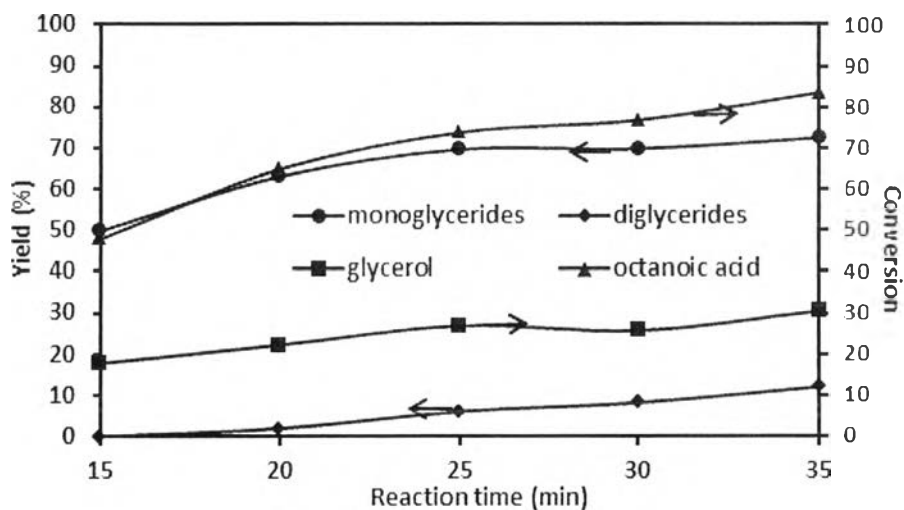
การศึกษาผลของเวลาในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคัพเปลลารี กำหนดอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ 120 องศาเซลเซียส และสัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกเท่ากับ 2:1 เวลาที่ใช้สังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ได้แก่ 15 20 25 30 และ 35 นาที โดยเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกำหนดด้วยอัตราการเร็วในการป้อนสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์กับร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์กับไดกลีเซอไรด์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงไปของ กลีเซอรอลกับกรดออกทานอิกผลการทดลอง พบว่าเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ รวมถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกและกลีเซอรอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลกับกรดออกทานอิกมีเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมีมากขึ้น จนกระทั่งที่เวลา 25 นาที แสดงค่าร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ร้อยละ 69.6 และ 6.1 ตามลำดับ (รูปที่ 4.19) และมีความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์ร้อยละ 94 (รูปที่ 4.20) และเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นจนถึง 35 นาที พบว่าเกิดโมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ร้อยละ 72.5 และ 12.0 ตามลำดับ และมีความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์ร้อยละ 85.8 (รูปที่ 4.20)

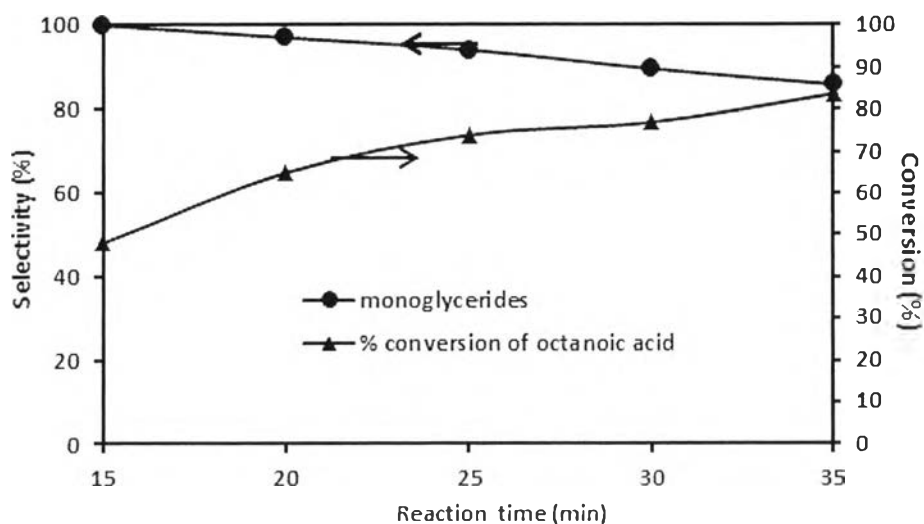
เมื่อเปรียบเทียบหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ พบว่าเวลาที่ 25 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจาก ที่เวลานี้มีความเลือกสรรในการเกิด



โมโนกลีเซอไรด์มากที่สุด ถึงแม้จะมีร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์น้อยกว่าที่เวลา 35 นาทีก็ตามแต่ก็น้อยกว่าเพียงร้อยละ 0.5 เท่านั้น จากการทดลองยังพบว่าที่เวลา 35 นาที อัตราเร็วในการป้อนกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกเข้าสู่เครื่องเท่ากับ 730 และ 801 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบการไหลจะเป็นการไหลของสลักของกลีเซอรอล (รูปที่ 4.4) โดยที่สลักของกลีเซอรอลจะมีรูปร่างที่ไม่เสถียรส่งผลเสียต่ออัตราการถ่ายเทมวลและความร้อน ในขณะที่เวลา 25 นาที อัตราเร็วในการป้อนกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 1122 และ 1022 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบการไหลจะเป็นการไหลของสลักกรดออกทานอิก (รูปที่ 4.4) และสลักไม่มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบ ซึ่งส่งผลดีต่อการถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวลเพราะสลักของกรดออกทานอิกจะสัมผัสกับผนังท่อโดยตรงส่งผลทำให้ความรุนแรงในการไหลวนของของเหลวภายในสลักเพิ่มขึ้นดังที่อธิบายไปแล้วข้างต้น



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์รวมถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของกลีเซอรอลและกรดออกทานอิก



รูปที่ 4.20 ความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์และการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกที่สัมพันธ์กับเวลาการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่ออะฟิลลารี

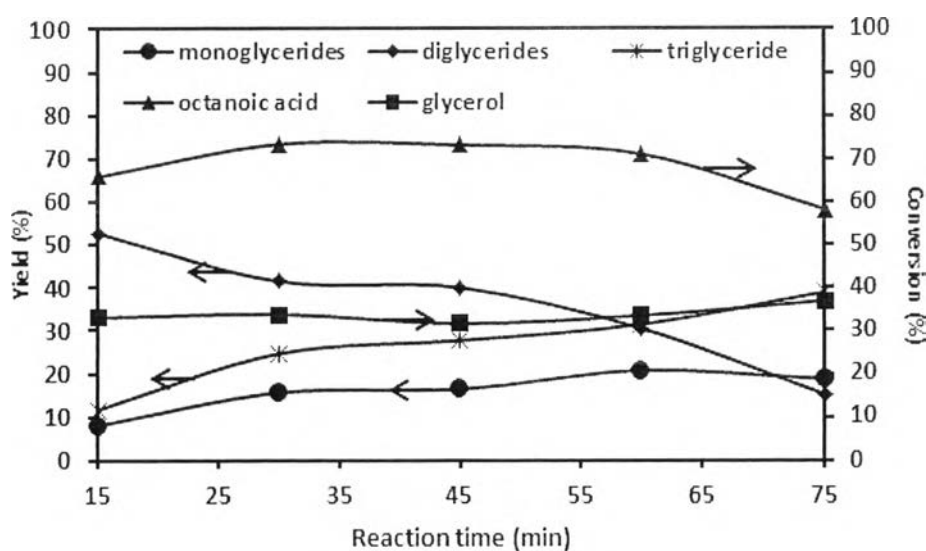
#### 4.2.4 การศึกษาการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

การสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์มีจุดประสงค์เพื่อนำผลการทดลองที่ได้ ไปเปรียบกับการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่ออะฟิลลารี ภาวะที่ใช้เป็นภาวะเดียวกันกับภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ ไมโครคือ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส สัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกเท่ากับ 2 : 1 และใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยโมลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีในอัตราส่วนร้อยละ 1 โดยมวลของกรดออกทานอิก แต่เวลาที่ใช้ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเคมีคือ 15, 30, 45, 60 และ 75 นาที

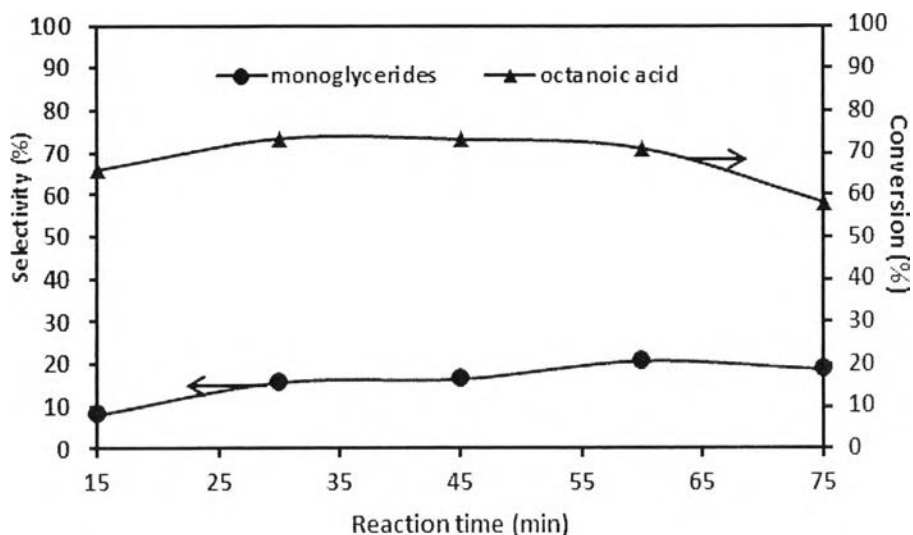
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์กับอัตราการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิก และร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้น ร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ร้อยละผลได้ของไดกลีเซอไรด์กลับมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกและกลีเซอรอลมีแนวโน้มที่ไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากปฏิกิริยาในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ โดยในช่วงแรกของปฏิกิริยาเคมีสารตั้งต้นมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเคมีมาก ทำให้ปริมาณของสารผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และโมโนกลีเซอไรด์ยังสามารถทำปฏิกิริยาเคมี

กับกรดออกทานอิกแล้วเปลี่ยนไปเป็นไดกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ก็ยังสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับกรดออกทานอิกแล้วเปลี่ยนไปเป็นไตรกลีเซอไรด์อย่างรวดเร็วในช่วงเวลาแรก แต่เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที พบว่าอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะลดลง สังเกตได้จากปริมาณร้อยละของโมโนกลีเซอไรด์ที่เกิดขึ้นและร้อยละการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกกับกลีเซอรอลเริ่มมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุล แต่โมโนกลีเซอไรด์บางส่วนยังสามารถเปลี่ยนไปเป็นไดกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ยังสามารถเปลี่ยนไปเป็นไตรกลีเซอไรด์ได้ จึงทำให้ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณของไดกลีเซอไรด์จะลดลง ในกรณีที่ปริมาณของโมโนกลีเซอไรด์ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเนื่องจากโมโนกลีเซอไรด์จะถูกสังเคราะห์ขึ้นใหม่เพื่อทดแทนโมโนกลีเซอไรด์ที่ถูกใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับกรดออกทานอิกเพื่อเปลี่ยนไปเป็นไดกลีเซอไรด์ เพื่อรักษาสภาพสมดุลทางเคมีให้คงที่

เมื่อพิจารณาจากทางเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์ (รูปที่ 4.22) พบว่าที่เวลา 60 นาที มีความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์มากที่สุดคือร้อยละ 20.7 เมื่อเทียบกับช่วงเวลาอื่น ๆ เพราะเกิดโมโนกลีเซอไรด์มากที่สุดคือร้อยละ 11.2 และเกิดไดกลีเซอไรด์กับไตรกลีเซอไรด์ร่วมด้วยเพียงร้อยละ 30.4 และ 31.4 ตามลำดับ ดังนั้นที่เวลา 60 นาที จึงเป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ภายใต้ภาวะนี้



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของกลีเซอรอลกับกรดออกทานอิกในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์กับอัตราการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกและร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์



รูปที่ 4.22 ความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์และการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกที่สัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

#### 4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ไมโครกับเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์กับเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่ออะฟิลลารี ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิดคือ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส สัดส่วนโดยของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกเท่ากับ 2 : 1 และในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 โดยมีมวลในสัดส่วนร้อยละ 1 โดยมีมวลของกรดออกทานอิกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเทียบเปรียบร้อยละผลได้ของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด ณ อัตราการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าที่ร้อยละของอัตราการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกเท่ากับ 73.8 เกิดโมโนกลีเซอไรด์ร้อยละ 69.6 และเกิดไดกลีเซอไรด์ร้อยละ 6.05 และความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์สูงถึงร้อยละ 94.0 ส่วนเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่ร้อยละอัตราการเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ 71.0 พบว่าเกิด โมโนกลีเซอไรด์เพียงร้อยละ 11.2 ไดกลีเซอไรด์ร้อยละ 30.4 และไตรกลีเซอไรด์ร้อยละ 31.4 และมีความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์เพียงร้อยละ 20.7 จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าเครื่องปฏิกรณ์ไมโครมีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ไมโครมีร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ และผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดจากการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครยังน้อยกว่าในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์มาก และเครื่องปฏิกรณ์ไมโครยังมีความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์มากกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์



สาเหตุที่เครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์มีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ที่น้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเพราะว่าการผสมกันของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์เกิดจากไปจากการกวนของแท่งแม่เหล็ก โดยการผสมกันของสารในลักษณะนี้จะมีข้อเสียคือการผสมเกิดขึ้นไม่ทั่วถึงทุกจุดในเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลไม่คงที่ทั่วทุกจุด และสารตั้งต้นมีเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมีมากเกินไปส่งผลให้โมโนกลีเซอไรด์เปลี่ยนไปเป็นไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ส่งผลให้ความเลือกสรรในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ลดลง แต่การสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเกิดขึ้นภายในท่อขนาดเล็กการถ่ายเทความร้อนเกิดทั่วถึงทุกจุดในเครื่องปฏิกรณ์ และการถ่ายเทมวลเกิดจากการไหลวนของของไหลภายในสลักที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างสลักกับผนังท่อจึงทำให้อัตราการถ่ายเทมวลคงที่สม่ำเสมอทั่วทุกจุดในเครื่องปฏิกรณ์ และยังสามารถควบคุมเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยการกำหนดอัตราเร็วในการไหลเข้าเครื่องปฏิกรณ์ของสารตั้งต้นได้ จึงส่งผลให้ความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์สูงกว่าในกรณีของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ แต่อย่างไรก็ตามเครื่องปฏิกรณ์ไมโครยังมีข้อเสียเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ไมโครทำจากท่อที่มีขนาดเล็กจึงง่ายต่อการอุดตันของสิ่งแปลกปลอม และยังอ่อนไหวต่อการสั่นสะเทือนซึ่งจะส่งผลต่อเสียรูปร่างของสลักระหว่างการเกิดปฏิกิริยาได้

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ไมโครกับเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ที่ร้อยละอัตราการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิก 73.3 และ 71.0 ตามลำดับ

ชนิดเครื่อง ปฏิกรณ์	เวลา (นาที)	ร้อยละผลได้ของสารผลิตภัณฑ์			ร้อยละความ เลือกสรรของ โมโนกลีเซอไรด์
		โมโนกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	ไตรกลีเซอไรด์	
เครื่องปฏิกรณ์ ไมโคร	25	69.6	6.1	0.0	92.0
เครื่องปฏิกรณ์ แบบแบดซ์	60	11.2	30.4	31.4	20.7