

ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสของเมทิลปาล์มมิเตตโดยใช้โซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกริยา



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Glycerolysis of methyl palmitate using
sodium phosphate as a catalyst

Mr. Panuphon Wongkittipong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ปฏิกิริยาเกลือไฮดรอกไซด์ของเมทิลปาล์มมิเตตโดยใช้ โซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
โดย	นายภาณุพล ว่องกิตติพงษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารชวัช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ดร. เจดศักดิ์ ไชยคุนา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารชวัช)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วรงค์ ปวรจารย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. นาวัน วิริยะเอี่ยมพิกุล)

ภาพล ว่องกิตติพงษ์ : ปฏิกริยาเกลือโรไลซิสของเมทิลปาล์มมิเตตโดยใช้โซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกริยา (Glycerolysis of methyl palmitate using sodium phosphate as a catalyst) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. อภินันท์ สุทธิธารธวัช, 179 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาปฏิกริยาเกลือโรไลซิสของเมทิลปาล์มมิเตตโดยใช้โซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกริยา โดยการศึกษาที่มีความมุ่งหวังเพื่อที่จะผลิตโมโนปาล์มมิตินที่มีค่าผลได้สูงที่สุดภายใต้ค่าการเปลี่ยนสูง ตัวเร่งปฏิกริยาโซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกริยาที่ใหม่ต่อปฏิกริยาเกลือโรไลซิส ซึ่งมีความจำเพาะต่อการเกิดโมโนปาล์มมิติน ในการศึกษาทางานวิจัยศึกษาผลกระทบของความเร็รรอบใบพัด อัตราส่วนของเกลือโรไลต์ต่อเมทิลปาล์มมิเตตโดยโมล อุณหภูมิในการทดลอง ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยา และการศึกษาการนำเมทานอลออกจากระบบ ต่อปฏิกริยาเกลือโรไลซิสของเมทิลปาล์มมิเตต

เมทานอลเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปฏิกริยาเกลือโรไลซิสของเมทิลปาล์มมิเตต เมื่อเมทานอลถูกแยกออกจากวัฏภาคเกิดปฏิกริยาของเมทิลปาล์มมิเตต ทำให้ปฏิกริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น เกิดปริมาณผลิตภัณฑ์ในปริมาณมากขึ้น แต่ทำให้ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิตินมีค่าต่ำลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่าการเปลี่ยนของเกลือโรไลต์มีค่ามากขึ้น ปฏิกริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น เมื่ออัตราส่วนของเกลือโรไลต์ต่อเมทิลปาล์มมิเตตโดยโมลและปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิตินมีค่าสูงขึ้น ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตโมโนปาล์มมิตินคือการทดลองที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของเกลือโรไลต์ต่อเมทิลปาล์มมิเตตโดยมวล 3:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ภายใต้การนำเมทานอลออกจากระบบเป็น 1 ชั่วโมง ซึ่งค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิตินที่มากที่สุดมีค่าร้อยละ 60 โดยโมล เมื่อค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตตร้อยละ 73 โดยโมล

การทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 2 ลิตร ทำการศึกษาที่ความเร็รรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที เพื่อผลกระทบของการถ่ายเทมวลสารต่ออัตราการเกิดปฏิกริยา เกลือโรไลต์วิเคราะห์ด้วยวิธีไทเทรต ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีสมรรถนะสูง

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5570327621 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MONOPALMITIN / SODIUM PHOSPHATE / GLYCEROLYSIS

PANUPHON WONGKITTIPONG: Glycerolysis of methyl palmitate using sodium phosphate as a catalyst. ADVISOR: ASST. PROF. APINAN SOOTTITANTAWAT, D.Eng., 179 pp.

This work study glycerolysis of methyl palmitate using sodium phosphate as a catalyst. The study aim to synthesis the highest yield of monopalmitin. Sodium phosphate was a new catalyst for glycerolysis of methyl palmitate reaction. It was successful catalyst because of selectivity to monopalmitin. The influences of glycerolysis of methyl palmitate parameters; agitation speeds, molar ratio of glycerol to methyl palmitate, operating temperatures, the amount of catalyst and methanol removal from process were determined.

Methanol was a key parameter for glycerolysis of methyl palmitate reaction because its influence reaction moving forward. The high amount of methanol which removed from methyl palmitate phase, reaction was forced to produce more product content but less monopalmitin yield. When the operating temperature was higher, glycerol conversion was also higher. The increasing of amount of catalyst and glycerol to methyl palmitate ratio, monopalmitin yield was higher. The highest monopalmitin yield condition was studied at 245 degree Celsius, molar ratio of glycerol to methyl palmitate 3:1, 1wt% of sodium phosphate with methanol removal 1h. The highest monopalmitin yield of the study was 60 percent yield with methyl palmitate conversion 73 percent by mole.

The two liters autoclave stainless-steel reactor was agitated under 800 rpm condition to minimize effect of mass transfer on glycerolsis of methyl palmitate reaction. Glycerol was measured by titration. All products were determined by high temperature gas chromatography.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้ผู้จัดทำงานวิจัยขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. อภินันท์ สุทธิธารธวัช ที่ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือให้งานวิจัยดำเนินลุล่วงไปได้ ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา ที่กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องปฏิกิริยา และอุปกรณ์ในการทดลอง อีกทั้งให้คำปรึกษาจนงานวิจัยสามารถลุล่วง

ผู้จัดทำงานวิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรงค์ ปวรอาจารย์ ดร.นาวิน วิริยะ เอี่ยมพิกุล และกรรมการการสอบทุกท่านที่ให้คำแนะนำสำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัทน้ำมันพืชปทุม ที่เอื้อเฟื้อสำหรับเครื่องมือวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีสมรรถนะสูง อีกทั้งสนับสนุนสารตั้งต้นในการทดลอง และให้คำปรึกษาสำหรับงานวิจัยเรื่อยมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนในศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีอนาคต และห้องปฏิบัติการ Oleo chemical ที่คอยสนับสนุนในทุกๆเรื่องที่ผ่านมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดาของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจและคอยสนับสนุนทั้งด้าน การศึกษา และเข้าใจในช่วงเวลาที่ทำการทดลองด้วยความยากลำบากที่ผ่านมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	12
บทที่ 1	27
บทนำ.....	27
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	27
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	29
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	29
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	30
บทที่ 2	31
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
2.1 ความสำคัญของโมนอกลิเซอไรด์และการนำไปใช้.....	31
2.2 ปฏิกริยาในการผลิตโมนอกลิเซอไรด์	35
2.2.1 ปฏิกริยาเอสเทอริฟิเคชันด้วยกลีเซอรอล (Direct Esterification).....	35
2.2.2 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสไตรกลีเซอไรด์ (Hydrolysis of triglyceride).....	36
2.2.3 ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสไตรกลีเซอไรด์ (Glycerolysis of triglyceride)	37
2.2.4 ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสมethyl เอสเทอร์ (Glycerolysis of Methyl Esters)	37
2.3 ตัวเร่งปฏิกริยาในปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสมethyl เอสเทอร์.....	41
2.3.1 ตัวเร่งปฏิกริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst).....	41
2.3.2 ตัวเร่งปฏิกริยาประเภทเอนไซม์ (Enzyme catalyst).....	42
2.3.3 ตัวเร่งปฏิกริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst).....	42

2.3.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต	45
2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์	50
2.5 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์	51
2.5.1 ผลกระทบความยาวสายโซ่อะตอมของสารตั้งต้นต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์	51
2.5.2 ผลกระทบของความเร็วรอบของใบพัดที่มีผลต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์	52
2.5.3 ผลกระทบอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์	54
2.5.4 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลกระทบต่อการปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ ...	55
2.5.5 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลกระทบต่อการปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์	56
2.5.6 ผลกระทบของการนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียงออกจากระบบที่มีผลกระทบต่อการปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์	57
บทที่ 3	59
การดำเนินงานวิจัย	59
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	59
3.2 วิธีการทดลอง.....	60
3.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	60
3.2.2 การทดลองในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต	60
3.2.3 การนำสารผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (แก๊สเมทานอล) ออกจากระบบ.....	61
3.3 การวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต	62
3.4 การวิเคราะห์ปริมาณโมโนปาล์มมิติน ไดปาล์มมิติน และไตรปาล์มมิติน	63
3.5 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต	65

บทที่ 4	66
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	66
4.1 ปฏิกริยาเกลือโรไลซิสเมทิลพาล์มมีเตต	66
4.1.1 ปฏิกริยาเกลือโรไลซิสเมทิลพาล์มมีเตตโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยา	66
4.1.2 ปฏิกริยาเกลือโรไลซิสเมทิลพาล์มมีเตตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยาโซเดียมฟอสเฟต	68
4.1.3 การศึกษาแบบจำลองทางจลนศาสตร์ที่เหมาะสมกับปฏิกริยาเกลือโรไลซิสเมทิลพาล์มมีเตต	70
4.1.4 ปฏิกริยาเกลือโรไลซิสเมทิลพาล์มมีเตตโดยการคำนวณจากโปรแกรม Aspen simulation ด้วยวิธีการคำนวณด้วยพลังงานอิสระกิบส์ต่ำสุด (minimization of Gibbs free energy)	72
4.2 ผลกระทบของการนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (ไอเมทานอล) ออกจากระบบในปฏิกริยาเกลือโรไลซิสเมทิลพาล์มมีเตต	73
4.2.1 ผลกระทบของการนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (ไอเมทานอล) ออกจากระบบ ในอิมัลชันประเภทเกลือซอร์อลในเมทิลพาล์มมีเตต	74
4.2.1.1 ผลกระทบของการไม่นำผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (ไอเมทานอล) ออกจากระบบ ในอิมัลชันประเภทเกลือซอร์อลในเมทิลพาล์มมีเตต	74
4.2.1.2 ผลกระทบของการนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (ไอเมทานอล) ออกจากระบบ ในอิมัลชันประเภทเกลือซอร์อลในเมทิลพาล์มมีเตต เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	83
4.2.1.3 ผลกระทบของการนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (ไอเมทานอล) ออกจากระบบ ในอิมัลชันประเภทเกลือซอร์อลในเมทิลพาล์มมีเตต เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	84
4.2.2 ผลกระทบของการนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (แก๊สเมทานอล) ออกจากระบบ ในอิมัลชันประเภทเมทิลพาล์มมีเตตในเกลือซอร์อล	85
4.3 ผลกระทบของความเร็รรอบใบพัดต่อปฏิกริยาเกลือโรไลซิสเมทิลพาล์มมีเตต	88
4.3.1 ผลกระทบของความเร็รรอบใบพัดต่อปฏิกริยาเกลือโรไลซิสเมทิลพาล์มมีเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส	88

4.3.2 ผลกระทบของความเร็รรอบใบพัดต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต ที่ อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส.....	93
4.3.3 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแปรผันความเร็รรอบของใบพัดที่ ความเร็รรอบ 600 และ 800 รอบต่อนาที.....	95
4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต	96
4.4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าการละลายของกลีเซอรอลในวัฏภาคเมทิลปาล์มมีเตต	103
4.4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี.....	104
4.5 ผลกระทบของอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมีเตตโดยโมลในปฏิกิริยากลิเซอ โรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต.....	107
4.5.1 ผลกระทบของอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต โดยโมลในอิมัลชันประเภทกลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมีเตต.....	107
4.5.2 ผลกระทบของอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมีเตตโดยโมลในอิมัลชัน ประเภทเมทิลปาล์มมีเตตในกลีเซอรอล.....	115
4.5 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต	116
4.7 ศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต	125
4.7.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา	125
4.7.2 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา	129
4.7.3 ผลกระทบของอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมีเตตโดยโมลต่อค่าคงที่ของ อัตราการเกิดปฏิกิริยา	131
4.8 ผลกระทบของชนิดสารตั้งต้นต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส	132
4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	137
บทที่ 5	138
สรุปผลการทดลอง.....	138
ภาคผนวก.....	140

ภาคผนวก ก.	140
การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต	140
ภาคผนวก ข.	142
ผลการทดลอง.....	142
ภาคผนวก ค.	159
การคำนวณปริมาณสาร	159
ภาคผนวก ง.....	167
การคำนวณตัวแปรในการอธิบายปฏิกิริยาเคมี	167
ภาคผนวก จ.	168
การคำนวณด้วยโปรแกรม Aspen simulation	168
ภาคผนวก ฉ.	171
การคำนวณแบบจำลองทางจลนศาสตร์	171
รายการอ้างอิง	176
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	179

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ที่มา http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1181/monoglyceride-e471	31
รูปที่ 2.2 อัลฟาโมโนกลีเซอไรด์ และเบตาโมโนกลีเซอไรด์ ที่มา http://www.wikipremed.com/image.php?im	32
รูปที่ 2.3 แผนภาพกระบวนการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ในอุตสาหกรรม (Willi Fischer [8]).....	33
รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการผลิตโมโนกลีเซอไรด์จากไตรกลีเซอไรด์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ แบบกะ (Willi Fischer [8]).....	33
รูปที่ 2.5 แสดงการผลิตโมโนกลีเซอไรด์จากน้ำมันด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Willi Fischer [8]).....	34
รูปที่ 2.6 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยตรง	35
รูปที่ 2.7 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสไตรกลีเซอไรด์.....	36
รูปที่ 2.8 ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสไตรกลีเซอไรด์ (Negi Devender [2])	37
รูปที่ 2.9 ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสมิลเอสเทอร์ (Negi Devender [2]).....	38
รูปที่ 2.10 กลไกตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอล (นาย วันจักร ไชครัตนชัย และคณะ [30])	41
รูปที่ 2.11 แสดงการเปรียบเทียบผลได้ของไปโอดีเซลของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่มี โมเลกุลน้ำล้อมรอบ 10 โมเลกุล กับตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต ที่อุณหภูมิ 70 องศา เซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมัน อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันโดย โมล 9:1 ที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที (P.D.Filippis และคณะ [25])	45
รูปที่ 2.12 เส้นสีน้ำเงินแสดงโครงสร้างผลึกของโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรตจากการวิเคราะห์ลักษณะ ผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD) (Khritsayaporn และคณะ [7]).....	47
รูปที่ 2.13 เส้นสีน้ำเงินแสดงโครงสร้างผลึกของโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรตที่มีน้ำล้อมรอบ 5 โมเลกุล เส้นสีเขียวแสดงโครงสร้างผลึกของโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟตแกมมา จากการวิเคราะห์ ลักษณะผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD) (Khritsayaporn และ คณะ [7]).....	48

รูปที่ 2.14 เส้นสีแดงแสดงโครงสร้างผลึกของโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟต เส้นสีน้ำเงินแสดงโครงสร้างผลึกของโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟตเบต้า เส้นสีเขียวแสดงโครงสร้างผลึกของโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟตแกมมา จากการวิเคราะห์ลักษณะผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD) (Khritsayaporn และคณะ [7])	49
รูปที่ 2.15 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์	51
รูปที่ 2.16 แสดงค่าความเร็วยุบต่อค่าผลได้ของไบโอดีเซล (Y.C Sharma และคณะ [28])	53
รูปที่ 2.17 แสดงผลของความเร็วยุบของใบพัด 500-900 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดัน 300 มิลลิบาร์ (T.kimmel และคณะ [19])	53
รูปที่ 2.18 แสดงอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลเอสเทอร์ด้วยอัตราส่วน 1:1-6:1 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ 11 กรัมต่อโมลเมทิลเอสเทอร์ ที่ความเร็วยุบ 700 รอบต่อนาที (Cristian A. Ferretti และคณะ [18])	54
รูปที่ 2.19 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าการเปลี่ยนของเมทิลเอสเทอร์ ที่ความดัน 300 มิลลิบาร์ อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลเอสเทอร์ 2:1 ปริมาณโซเดียมเมทอกไซด์ร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็วยุบ 500 รอบต่อนาที (T.kimmel และคณะ [19])	55
รูปที่ 2.20 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าผลได้การผลิตโมนอกลิเซอไรด์ ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลเอสเทอร์ 4.5:1 โดยโมล ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ 30 กรัมต่อโมลเมทิลเอสเทอร์ ที่ความเร็วยุบ 700 รอบต่อนาที	56
รูปที่ 2.21 แสดงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (กรัมต่อโมลเมทิลเอสเทอร์) อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลเอสเทอร์ 4.5 โดยโมล อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วยุบ 700 รอบต่อนาที Cristian A. Ferretti และคณะ [18]	56
รูปที่ 2.22 แสดงค่าการเปลี่ยนของเมทิลโอลีเอทที่เปลี่ยนตามเวลา ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลโอลีเอต 1:1 โดยโมล โดยไม่ทำการดึงเมทานอลออกจากระบบ (Vorgelegt von [2])	57
รูปที่ 2.23 แสดงปริมาณเมทิลโอลีเอทที่เปลี่ยนตามเวลา ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลโอลีเอต 1:1 โดยโมล โดยทำการนำเมทานอลออกจากระบบ ทั้งแบบสุญญากาศ และด้วยการไล่ด้วยไนโตรเจน (Vorgelegt von [2])	58
รูปที่ 2.24 แสดงปริมาณเมทานอลในวัฏภาคของกลีเซอรอลและเมทิลโอลีเอต ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลโอลีเอต 1:1 โดยโมล (Vorgelegt von [2])	58

รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์สำหรับปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส โดยประกอบด้วย ถังแก๊สไนโตรเจน ถัง ป้อนสาร เครื่องปฏิกรณ์แบบกะชนิดโลหะสแตนเลส ขนาด 2 ลิตร ชุดควบคุมอุณหภูมิ	61
รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์ในการนำแก๊สเมทานอลออกจากระบบ โดยมีชุดทำความเย็นที่ ประกอบด้วยแท่งแก้วทำความเย็น กระบอกวัดปริมาตร และชุดต่อสุญญากาศ	62
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตดโดยไม่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตดโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์	66
รูปที่ 4.2 แสดงความเข้มข้นของกลีเซอรอลตามเวลา ในการทดลองไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล ความเร็ว รอบ 800 รอบต่อนาที.....	67
รูปที่ 4.3 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตดของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียม ฟอสเฟต	68
รูปที่ 4.4 แสดงความเข้มข้นของกลีเซอรอลในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตด จาก การศึกษาการนำเมทานอลออกจากระบบและไม่นำออกจากระบบ ในอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อ เมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียม ฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที	75
รูปที่ 4.5 แสดงค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตด จากการศึกษาการนำเมทานอลออกจากระบบและไม่นำออกจากระบบ ในอัตราส่วนกลีเซอรอล ต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียม ฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที	76
รูปที่ 4.6 แสดงความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมิเตด ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตด จากการศึกษาการนำเมทานอลออกจากระบบและไม่นำออกจากระบบ อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อ เมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียม ฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที	77
รูปที่ 4.7 แสดงค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตดโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์ม มิเตด จากการศึกษาการนำเมทานอลออกจากระบบและไม่นำออกจากระบบ อัตราส่วนกลีเซ อรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที	78

- รูปที่ 4.8 แสดงค่าผลได้ของโมนิพาล์มมิตดินในปฏิกริยาเกลือโรไลซิสเมทิลพาล์มมิเตตโดยโมล จากการศึกษาการนำเมทานอลออกจากระบบและไม่นำออกจากระบบ อัตราส่วนเกลือโรไลต่อเมทิลพาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาไซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลพาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที 80
- รูปที่ 4.9 แสดงค่าผลได้ของไดพาล์มมิตดินในปฏิกริยาเกลือโรไลซิสเมทิลพาล์มมิเตตโดยโมล จากการศึกษาการนำเมทานอลออกจากระบบและไม่นำออกจากระบบ อัตราส่วนเกลือโรไลต่อเมทิลพาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาไซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลพาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที 81
- รูปที่ 4.10 แสดงค่าผลได้ของไตรพาล์มมิตดินในปฏิกริยาเกลือโรไลซิสเมทิลพาล์มมิเตตโดยโมล จากการศึกษาการนำเมทานอลออกจากระบบและไม่นำออกจากระบบ อัตราส่วนเกลือโรไลต่อเมทิลพาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาไซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลพาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที 82
- รูปที่ 4.11 แสดงความดันเกจในระบบที่ลดลงในแต่ละเวลาจากการทำงานของปั้มสุญญากาศในการทดลองนำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และการทดลองนำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 8 ชั่วโมง..... 83
- รูปที่ 4.12 แสดงค่าการเปลี่ยนของเกลือโรไลโดยโมล ในปฏิกริยาเกลือโรไลซิสเมทิลพาล์มมิเตต จากการศึกษาการนำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมงและไม่นำออกจากระบบ อัตราส่วนเกลือโรไลต่อเมทิลพาล์มมิเตต 6:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาไซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลพาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที..... 86
- รูปที่ 4.13 แสดงค่าผลได้ของโมนิพาล์มมิตดินต่อค่าการเปลี่ยนของเมทิลพาล์มมิเตต ในการทดลองไม่นำเมทานอลออกจากระบบและนำเมทานอลออกจากระบบ อัตราส่วนเกลือโรไลต่อเมทิลพาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาไซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลพาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที 87
- รูปที่ 4.14 แสดงผลกระทบของการแปรผันความเร็วรอบใบพัดต่อปริมาณเกลือโรไลโดยมวล ในปฏิกริยาเกลือโรไลซิสเมทิลพาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเกลือโรไลต่อเมทิลพาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาไซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลพาล์มมิเตต นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง..... 89

มวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็น เวลา 1 ชั่วโมง	98
รูปที่ 4.22 แสดงค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตตของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	99
รูปที่ 4.23 แสดงค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิตินโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	100
รูปที่ 4.24 แสดงค่าผลได้ของไดปาล์มมิตินโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	101
รูปที่ 4.25 แสดงค่าผลได้ของไตรปาล์มมิตินโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	102
รูปที่ 4.26 แสดงค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิตินและค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตต ใน ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต ร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออก จากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	106
รูปที่ 4.27 แสดงลักษณะอิมัลชันของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต แบบกลีเซอรอลใน เมทิลปาล์มมิเตต และเมทิลปาล์มมิเตตในกลีเซอรอล	107
รูปที่ 4.28 แสดงความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ถูกใช้ไปในแต่ละช่วงเวลา ของปฏิกิริยากลิเซอโรไล ซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 ถึง 6:1 โดย โมล ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวล	

- รูปที่ 4.42 แสดงค่าผลได้ของไตรปาล์มมิตินของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตด จากการแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง..... 123
- รูปที่ 4.43 แสดงค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิตินและค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตด ของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตด จากการแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 125
- รูปที่ 4.44 แสดงพลังงานการก่อกัมมันต์ (Ea) ของแต่ละขั้นตอนของอัตราการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตด ที่อุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส..... 127
- รูปที่ 4.45 แสดงผลกระทบของชนิดของสารตั้งต้นต่อค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 3:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง..... 132
- รูปที่ 4.46 แสดงผลกระทบของชนิดของสารตั้งต้นต่อค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตดโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 3:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง..... 133
- รูปที่ 4.47 แสดงผลกระทบของชนิดของสารตั้งต้นต่อค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิตินโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 3:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 134
- รูปที่ 4.48 แสดงผลกระทบของชนิดของสารตั้งต้นต่อค่าผลได้ของไตรปาล์มมิตินโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 3:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 135
- รูปที่ 4.49 แสดงผลกระทบของชนิดของสารตั้งต้นต่อค่าผลได้ของไตรปาล์มมิตินโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 3:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245

องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	136
รูปที่ 4.50 แสดงค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิเตดต่อค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตด เมื่อ เปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน	137
รูปที่ ค.1 แสดงโครมาโทแกรมของการทดลองในสภาวะไม่นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 8 ชั่วโมง อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต 1 ร้อยละโดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบ ใบพัด 800 รอบต่อนาที.....	160
รูปที่ จ.1 แสดงการคำนวณปริมาณเมทานอลด้วยถังแยกวัฏภาคโดยจำลองเหมือนในสภาวะของ เครื่องปฏิกรณ์ สายป้อนที่ 4 เป็นสายป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ถังแยกวัฏภาค B2 จำลองสภาวะ ของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีวัฏภาคไอและวัฏภาคของเหลว สายป้อนที่ 5 และ 6 แสดงวัฏภาคไอและวัฏ ภาคของเหลวตามลำดับ	169
รูปที่ ฉ.1 แสดงการคำนวณค่าคงที่ของการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในแต่ละขั้นตอน ของกลไก การเกิดปฏิกิริยาแบบที่ 1 H. Nouredini [15] ในโปรแกรม Microsoft excel.....	174
รูปที่ ฉ.2 แสดงการคำนวณค่าคงที่ของการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในแต่ละขั้นตอน ด้วย โปรแกรม Solver ของ Microsoft excel	175

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตในตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์และตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์.....	40
ตารางที่ 2.2 แสดงตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน	43
ตารางที่ 2.3 แสดงตัวเร่งปฏิกิริยาหมู่ฟอสเฟตในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน.....	44
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าการละลายตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตในวัฏภาคเมทิลเอสเทอร์ในสภาวะการทดลองต่างๆกัน (S.T. Jiang และคณะ [24]).....	46
ตารางที่ 2.5 แสดงปริมาณสารที่พบในแต่ละวัฏภาคของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ Negi Devenderและคณะ [2].....	51
ตารางที่ 2.6 แสดงปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมอะลูมิเนียม Mg-ALMCM-41 ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบใบพัด 500 รอบต่อนาที(J.Barrault และคณะ [20]).....	52
ตารางที่ 3.1แสดงอุณหภูมิและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลา ในสภาวะสำหรับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	65
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากการศึกษาผลกระทบของการนำไอเมทานอลออกจากระบบ ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที.....	74
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต ร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที จากการคำนวณด้วยโปรแกรม excel.....	103
ตารางที่ 4.3 แสดงพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส ที่ได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 4.44	127
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สมดุล โดยนิยามอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ดังสมการที่ 4.2) ที่ปริมาณ	

ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที.....	129
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยนิยามอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับ ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวล ของเมทิลปาล์มมิเตต อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที.....	130
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ สมดุล โดยนิยามอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อ เมทิลปาล์มมิเตต 1:1 ถึง 3:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที ...	131
ตารางที่ ก.1 แสดงค่าความหนาแน่นและความหนืดของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิต่างๆ.....	140
ตารางที่ ก.2 แสดงปริมาณสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิล ปาล์มมิเตต.....	141
ตารางที่ ข.1 ผลกระทบของความเร็วยรอบใบพัดต่อปริมาณกลีเซอรอลโดยมวลในปฏิกิริยากลิเซอ โรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต นำเมทานอลออกจากระบบ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	142
ตารางที่ ข.2 ผลกระทบของความเร็วยรอบใบพัดต่อค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลโดยโมลใน ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต นำเมทานอลออก จากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	143
ตารางที่ ข.3 ผลกระทบของความเร็วยรอบใบพัดต่อค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยโมล ในปฏิกิริยากลิ เซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์ม มิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิ เตต นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	144
ตารางที่ ข.4 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้น ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส เมทิลปาล์มมิเตต อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	

ปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็น เวลา 1 ชั่วโมง	152
ตารางที่ ข.12 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ ในปฏิกิริยาไกลีเซอ โรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิ เตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	153
ตารางที่ ข.13 ผลกระทบของการไม่นำเมทานอลออกจากระบบและการนำเมทานอลออกจาก ระบบต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้น ในปฏิกิริยาไกลีเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที..	154
ตารางที่ ข.14 ผลกระทบของการไม่นำเมทานอลออกจากระบบและการนำเมทานอลออกจาก ระบบต่อค่าการเปลี่ยนของสารตั้งต้น ในปฏิกิริยาไกลีเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที..	155
ตารางที่ ข.15 ผลกระทบของการไม่นำเมทานอลออกจากระบบและการนำเมทานอลออกจาก ระบบ ต่อค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ ในปฏิกิริยาไกลีเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที..	156
ตารางที่ ข.16 ผลกระทบของชนิดของสารตั้งต้นต่อค่าการเปลี่ยนของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาไกลีเซอ โรไลซิส ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบ ใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	157
ตารางที่ ข.17 ผลกระทบของชนิดของสารตั้งต้นต่อค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาไกลีเซอโรไล ซิส ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบ ใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	158

ตารางที่ ค.1 แสดงปริมาณโมนิโนปาล์มมิเตด ไตปาล์มมิเตด และไตรปาล์มมิเตดโดยมวล ในสภาวะ ไม่นำเมทานอลออกจากระบบที่เวลา 8 ชั่วโมง อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซ อรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต 1 ร้อยละโดย มวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที.....	162
ตารางที่ ค.2 แสดงปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในการทดลอง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วน กลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต 1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที	163
ตารางที่ ค.3 แสดงความน่าเชื่อถือของค่าที่ได้จากการคำนวณกับการทดลองของปริมาณกลีเซ อรอลและเมทิลปาล์มมิเตด ในการทดลอง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิล ปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต 1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของเมทิล ปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที.....	165
ตารางที่ ค.4 ทำให้การคำนวณปริมาณกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมิเตดที่เหลืออยู่มีความ น่าเชื่อถือ.....	166
ตารางที่ จ.1 แสดงปริมาณเมทานอลที่อยู่ในวัฏภาคของเหลว ร้อยละโดยมวลของเมทานอลที่ เกิดขึ้นทั้งหมด ในการนำเมทานอลออกจากระบบ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศา เซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตดโดยโมล 1:1	170
ตารางที่ จ. 2 แสดงปริมาณเมทานอลที่อยู่ในวัฏภาคของเหลว ร้อยละโดยมวลของเมทานอลที่ เกิดขึ้นทั้งหมด ในการศึกษาการนำเมทานอลออกจากระบบ ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตดโดยโมล 1:1	170
ตารางที่ จ.3 แสดงปริมาณเมทานอลที่อยู่ในวัฏภาคของเหลว ร้อยละโดยมวลของเมทานอลที่ เกิดขึ้นทั้งหมด ในการนำเมทานอลออกจากระบบ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส	171

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันการผลิตไบโอดีเซลมีจำนวนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กลีเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย การนำกลีเซอรอลไปกลั่นเพื่อเพิ่มมูลค่าของกลีเซอรอลยังไม่สามารถเพิ่มมูลค่าได้มากนัก ส่งผลให้ราคากลีเซอรอลมีราคาต่ำลง การศึกษางานวิจัยที่มีกลีเซอรอลเป็นวัตถุดิบจึงเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจ และสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน

การผลิตโมโนกลีเซอไรด์เป็นกระบวนการผลิตที่ใช้กลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้น โมโนกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์เป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่สำคัญและใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตขนมปังและเนย โดยโมโนกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์เป็นสารลดการสูญเสียในขนมปัง จัดอยู่ในประเภทสารผสมเติมแต่งอาหาร E471 ในมาตรฐานอุตสาหกรรมอาหาร (JAO, WHO) ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง โมโนกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ถูกใช้เป็นส่วนผสมเพิ่มความเหนียวขึ้นให้กับโลชั่นและครีม (Yuguo Zheng และคณะ[1]) นอกจากนี้ โมโนกลีเซอไรด์ยังใช้เป็นส่วนผสมในน้ำยาปรับผ้านุ่ม หรืออุตสาหกรรมพลาสติกได้อีกทางหนึ่ง

ในอุตสาหกรรมอาหารโมโนกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ถูกใช้เป็นส่วนอิมัลซิฟายเออร์ประมาณร้อยละ 70 ในสารอิมัลซิฟายเออร์ทั้งหมดที่ผลิตขึ้น มีการผลิต 3 เกรด คือ โมโนกลีเซอไรด์ ร้อยละ 40-46 โดยมวล, โมโนกลีเซอไรด์อัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 52 โดยมวล และโมโนกลีเซอไรด์จากการกลั่นลำดับส่วนซึ่งมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 โดยมวล (Vorgelegt von และคณะ [2]) โดยความสามารถในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ของโมโนกลีเซอไรด์มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าไดกลีเซอไรด์ การกลั่นลำดับส่วนจึงจำเป็นต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมที่ต้องการสัดส่วนโมโนกลีเซอไรด์สูง

กระบวนการผลิตโมโนกลีเซอไรด์มี 4 วิธี คือ 1. ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ (Glycerolysis of triglyceride) เป็นปฏิกิริยาที่กลีเซอรอลทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ 2. ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ (Hydrolysis of triglyceride) เป็นปฏิกิริยาที่น้ำทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ 3. ปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยกลีเซอรอล (Direct esterification) เป็นปฏิกิริยาที่กลีเซอรอลทำปฏิกิริยากับกรดไขมัน 4. ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ (Glycerolysis of methyl ester) เป็นปฏิกิริยาที่กลีเซอรอลทำปฏิกิริยากับเมทิลเอสเทอร์

การผลิตโมโนกลีเซอไรด์ในปัจจุบัน ผลิตจากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ และปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยกลีเซอรอล การผลิตโมโนกลีเซอไรด์โดยใช้ไตรกลีเซอไรด์เป็นสารตั้งต้นใช้อุณหภูมิสูง(ประมาณ 260 เซลเซียส) เมื่อเทียบกับการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ที่ใช้เมทิลเอสเทอร์เป็นสารตั้งต้น (อุณหภูมิ 120-200 องศาเซลเซียส) เนื่องจากเมทิลเอสเทอร์มีค่าไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ต่ำกว่าไตรกลีเซอไรด์ การละลายเป็นวัฏภาคเดียวกับกลีเซอรอลจึงเกิดได้ดีกว่า (Jeromin และคณะ [3]) และเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยกลีเซอรอล ที่มีกรดไขมันเป็นสารตั้งต้น ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยกลีเซอรอล มีต้นทุนในการผลิตสูงกว่าการใช้เมทิลเอสเทอร์เป็นสารตั้งต้น เนื่องจากกรดไขมันและตัวเร่งปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยกลีเซอรอลมีฤทธิ์กัดกร่อนต่อกระบวนการผลิตสูง วัสดุที่ใช้ในกระบวนการกลั่นจึงมีราคาสูงตามไปด้วย (Avelino Corma และคณะ [4]) นอกจากนี้กรดไขมันมีจุดเดือดที่สูงกว่าเมทิลเอสเทอร์ที่ความดันบรรยากาศ 20 มิลลิเมตรปรอท ประมาณ 30 องศาเซลเซียส ทำให้การใช้พลังงานในการกลั่นลำดับส่วนสูงกว่า ในการผลิตโมโนกลีเซอไรด์จากกรดไขมันมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง อาจส่งผลกระทบต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งหลายชนิด และความเป็นกรด (acidity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา อาจทำให้กลีเซอรอลเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน(Dehydration) เป็นอโครเรอิน(acrolein) (Pouilloux และคณะ [5]) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตโมโนกลีเซอไรด์จากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์

น้ำมันปาล์มที่ผลิตในประเทศไทยปัจจุบัน มีสัดส่วนของกรดปาล์มมีติก และกรดโอเลอิกเป็นส่วนประกอบหลัก ดังนั้นการนำน้ำมันปาล์มเป็นเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล จึงมีส่วนประกอบของปาล์มมีติกเมทิลเอสเทอร์(เมทิลปาล์มมีเตต) และโอเลอิกเมทิลเอสเทอร์(เมทิลโอลีเอท)เป็นส่วนใหญ่ ในงานวิจัยนี้ศึกษาเมทิลปาล์มมีเตตเป็นสารตั้งต้นเนื่องจากเป็นส่วนประกอบหลักของเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์ม

ตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสที่ใช้อย่างแพร่หลายคือตัวเร่งปฏิกิริยาเบสแก่ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์(NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(KOH) หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์(Ca(OH)₂) เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสแก่ มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วและตัวเร่งปฏิกิริยามีราคาไม่สูงมากนัก (N.O.V. Sonntag [6]) แต่มีข้อเสียคือทำให้มีของเสียในกระบวนการผลิต เนื่องจากเบสแก่มีความอันตรายต่อร่างกาย ไม่เหมาะกับการบริโภค จึงต้องทำการสะเทินเบสด้วยกรดก่อน ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตสูงขึ้น อีกทั้งอาจมีปัญหาเรื่องสีและเกิดสารประกอบเกลืออีกด้วย ในงานวิจัยนี้จึงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งเนื่องจากสามารถแยกออกจากระบบได้ง่าย ลดการเกิดของเสียจากกระบวนการผลิต เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคน้อย และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้(Yuguo Zheng [1], Avelino Corma [4])

เนื่องจากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน การศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์จึงมาจาก

การศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์เกิดปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงการละลายของวัฏภาคกลีเซอรอลในเมทิลเอสเทอร์เกิดได้ดีขึ้น ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ควรมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิสูง ในการศึกษางานวิจัยทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มฟอสเฟต Khritsayaporn และคณะ [7] ทำการศึกษาปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่อุณหภูมิสูง (ที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส) อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 18:1 โดยโมล พบว่ามีค่าผลได้เมทิลเอสเทอร์ร้อยละ 98.5 ภายในเวลา 30 นาที ซึ่งมีค่าผลได้ของไบโอดีเซลสูง โดยมีสมมติฐานที่ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิสูง ในการศึกษาปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตตจึงเลือกใช้โซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต บนตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาดังนี้

- 1.3.1 ศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบของใบพัดต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต โดยทำการปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 400 – 800 รอบต่อนาที
- 1.3.2 ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนของสารตั้งต้นต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมีเตต 1:1 - 6:1 โดยโมล
- 1.3.3 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต ที่อุณหภูมิ 190 - 250 องศาเซลเซียส
- 1.3.4 ศึกษาผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต โดยศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมีเตต
- 1.3.5 ศึกษาผลกระทบของการนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (แก๊สเมทานอล) ออกจากระบบ
- 1.3.6 ศึกษาผลกระทบของชนิดสารตั้งต้นต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต
- 1.3.7 ศึกษาแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ศึกษาปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต เพื่อนำไปใช้ในการผลิตในอุตสาหกรรม
- 1.4.2 เป็นแนวทางในงานศึกษางานวิจัยในการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ในอุตสาหกรรมต่อไป



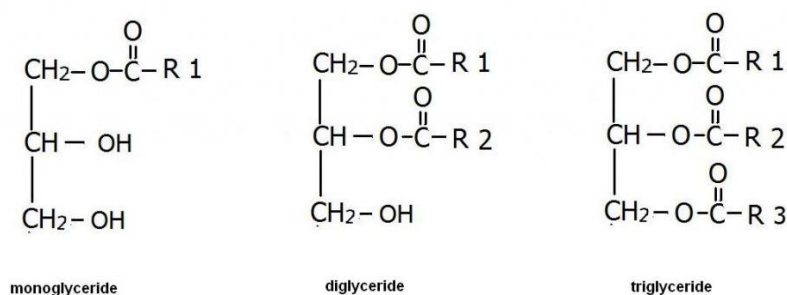
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสำคัญของโมโนกลีเซอไรด์และการนำไปใช้

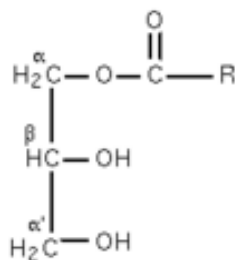
โมโนกลีเซอไรด์ เป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่สำคัญและใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร ปริมาณการใช้โมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์มีมากถึงร้อยละ 70 ของอิมัลซิฟายเออร์ที่ผลิตอยู่ทั้งหมด ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

โครงสร้างของโมโนกลีเซอไรด์มีกรดไขมันหนึ่งโมเลกุลต่อกับกลีเซอรอลหนึ่งโมเลกุล จึงมีหมู่ไฮดรอกซิลว่างอยู่สองตำแหน่ง ไดกลีเซอไรด์มีกรดไขมันสองโมเลกุลต่อกับกลีเซอรอลหนึ่งโมเลกุล และไตรกลีเซอไรด์จะมีกรดไขมันสามโมเลกุลต่อกับกลีเซอรอลหนึ่งโมเลกุล ดังรูปที่ 2.1 ด้วยเหตุนี้ทำให้โมโนกลีเซอไรด์มีคุณสมบัติละลายได้ทั้งสารมีขั้วและไม่มีขั้ว ด้านที่ไม่มีขั้วจะเกิดพันธะเคมีกับโมเลกุลของกรดไขมัน ส่วนด้านที่มีขั้วจะเกิดพันธะเคมีกับหมู่ไฮดรอกซิล โมโนกลีเซอไรด์จึงมีคุณสมบัติเป็นอิมัลซิฟายเออร์ โดยมีค่า HLB (Hydrophilic-Lipophilic Balance) เท่ากับ 3.8 ซึ่งเป็นอิมัลซิฟายเออร์ประเภทน้ำในน้ำมัน (water in oil emulsion) โดยความสามารถในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ของโมโนกลีเซอไรด์มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าไดกลีเซอไรด์ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในอุตสาหกรรมอาหารโมโนกลีเซอไรด์จึงถูกนำมาใช้เพื่อลดการสูญเสียไขมันในวัตถุดิบ (นายวันจักร โชครัตน์ชัย [30])



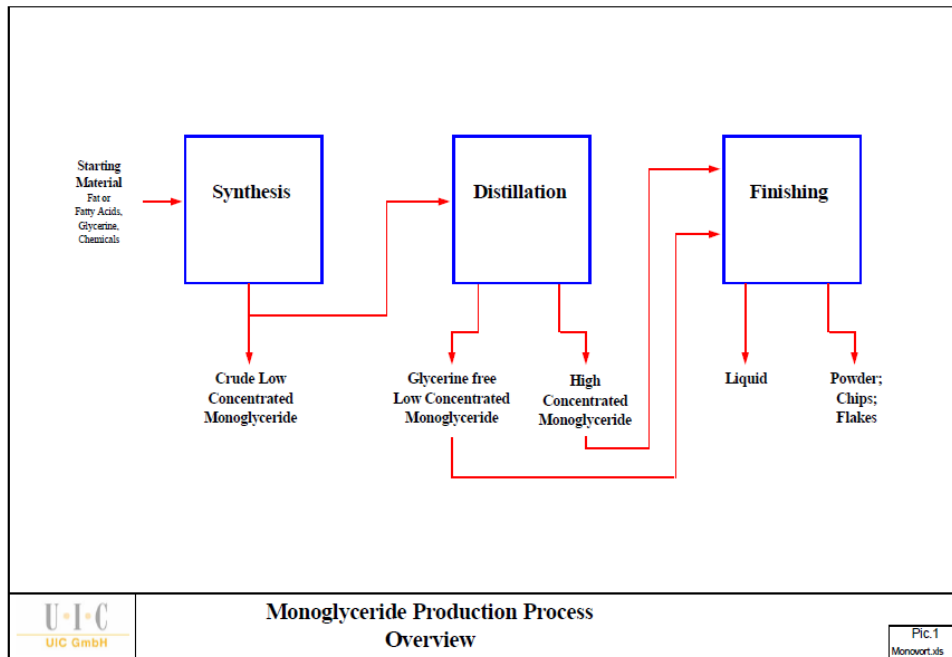
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์
ที่มา <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1181/monoglyceride-e471>

โมโนกลีเซอไรด์มีโครงสร้างอยู่ 2 ชนิดคือ อัลฟาโมโนกลีเซอไรด์ (1-monoglyceride) และเบตาโมโนกลีเซอไรด์ (2-monoglyceride) ซึ่งตำแหน่งของกรดไขมันบนกลีเซอรอลจะแสดงดังรูปที่ 2.2 อัลฟาโมโนกลีเซอไรด์จะมีความสามารถในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่ดีกว่าเบตาโมโนกลีเซอไรด์ อีกทั้งในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์โดยทั่วไป จะได้อัตราส่วนของอัลฟาโมโนกลีเซอไรด์ที่มากกว่า

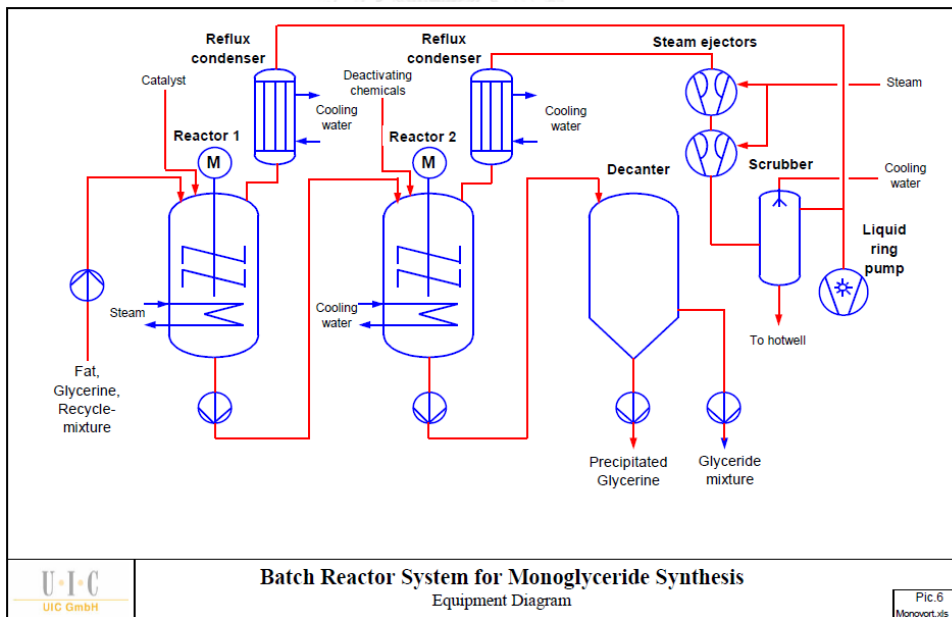


รูปที่ 2.2 อัลฟาโมโนกลีเซอไรด์ และเบตาโมโนกลีเซอไรด์
ที่มา <http://www.wikipremed.com/image.php?im>

กระบวนการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ในอุตสาหกรรม มีการสังเคราะห์ทั้งในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง โดยโมโนกลีเซอไรด์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจะมีอัตราส่วนระหว่างร้อยละ 40-60 โดยมวล ทั้งปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสไตรกลีเซอไรด์และปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมัน สำหรับการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ที่มีความบริสุทธิ์สูงต้องผ่านกระบวนการกลั่นลำดับส่วนก่อน โดยมีความบริสุทธิ์ของโมโนกลีเซอไรด์ร้อยละ 90 โดยมวล แผนภาพกระบวนการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ในปัจจุบันเป็นดังรูปที่ 2.3 (Willi Fischer [8])

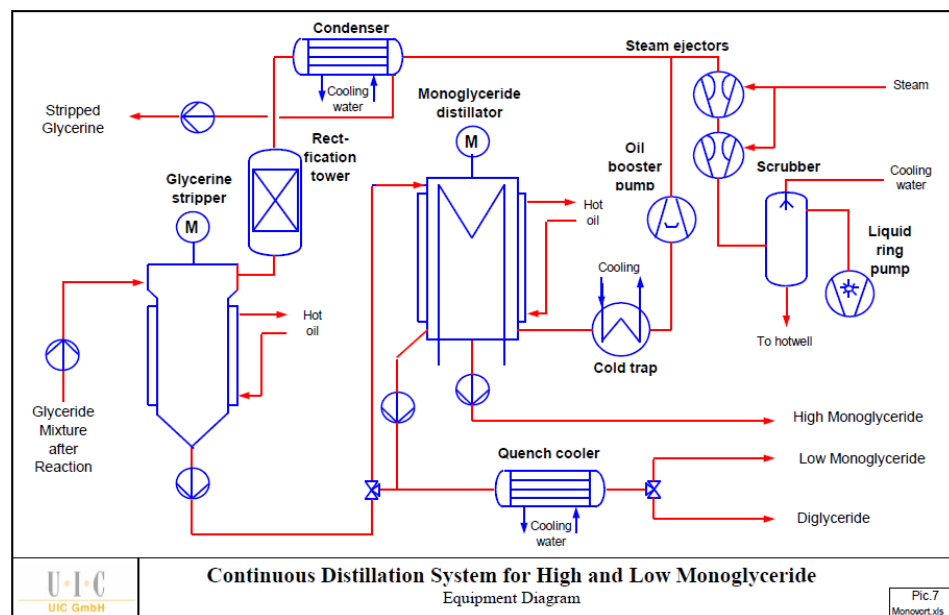


รูปที่ 2.3 แผนภาพกระบวนการผลิตโมโนกลีเซอไรต์ในอุตสาหกรรม (Willi Fischer [8])



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการผลิตโมโนกลีเซอไรต์จากไตรกลีเซอไรต์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Willi Fischer [8])

กระบวนการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ในอุตสาหกรรมด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ 2 เครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 5-10 ลูกบาศก์เมตร โดยเครื่องปฏิกรณ์เครื่องแรกเป็นเครื่องที่ใช้ในเกิดปฏิกิริยาเคมี มีไอน้ำร้อนให้ความร้อนแก่ระบบ เครื่องปฏิกรณ์เครื่องที่สอง ใช้สำหรับหยุดปฏิกิริยาผันกลับ โดยการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วด้วยน้ำหล่อเย็น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องผ่านการแยกด้วยถังแยกวัฏภาคไปยังถังเก็บสารต่อไป ดังรูปที่ 2.4 โดยในแต่ละการทำปฏิกิริยาเคมี 1 ครั้งจะใช้เวลาทั้งหมด 9 ชั่วโมง ค่าการก่อสร้างและการปฏิบัติการจะมีราคาสูงถ้าเครื่องปฏิกรณ์ถ้ามีขนาดเล็กเกินไป



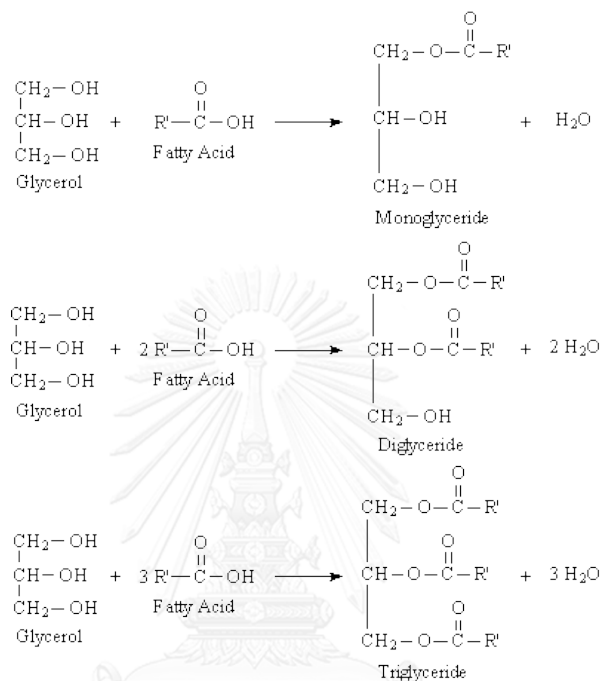
รูปที่ 2.5 แสดงการผลิตโมโนกลีเซอไรด์จากน้ำมันด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Willi Fischer [8])

ในกระบวนการผลิตสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์แบบต่อเนื่อง สารผสมจากการทำปฏิกิริยาจะถูกป้อนเข้าเครื่องแยกแก๊ส (Stripping column) กลีเซอรอลจะถูกทำให้ระเหยเป็นไอออกยอดหอ จากนั้นสารผสมที่เหลือจึงผ่านกระบวนการกลั่นแยกต่อไป ดังรูปที่ 2.5

2.2 ปฏิกริยาในการผลิตโมโนกลีเซอไรต์

2.2.1 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยกลีเซอรอล (Direct Esterification)

ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยกลีเซอรอล เป็นปฏิกริยาที่กลีเซอรอลทำปฏิกริยากับกรดไขมัน เกิดผลิตภัณฑ์เป็น โมโนกลีเซอไรต์ ไดกลีเซอไรต์ ไตรกลีเซอไรต์ และน้ำ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยตรง

ที่มา <http://www.chemistryexplained.com/Co-Di/Cosmetic-Chemistry.html>

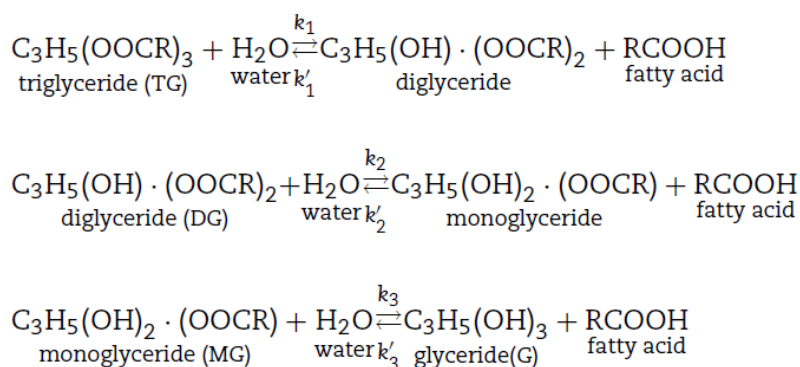
ตัวเร่งปฏิกริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) ในปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยกลีเซอรอล จะใช้กรดแก่เป็นตัวเร่งปฏิกริยา เช่น กรดซัลฟิวริก โดยมีอัตราส่วนการผลิตโมโนกลีเซอไรต์ ไดกลีเซอไรต์ ไตรกลีเซอไรต์อยู่ที่ (40:50:10) โดยโมล จึงจำเป็นต้องใช้หอกลับลำดับส่วนในการผลิตโมโนกลีเซอไรต์ที่มีความเข้มข้นสูง ในกระบวนการผลิตที่ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกริยาอาจทำให้เกิดการสลายตัวของกรดไขมัน หรือทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของกลีเซอรอล (เกิดปฏิกริยาออกซิเดชัน, การเกิดพอลิเมอร์เซชัน เป็นอะโครเลอิน) (Yannick และคณะ [5])

จากการศึกษาพบว่ากลีเซอรอลที่ทำปฏิกริยากับกรดลอริกด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยโมล โดยใช้ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นตัวเร่งปฏิกริยา มีปริมาณร้อยละ 5 โดยมวลของกรดลอริก อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อกรดลอริกถูกใช้ไปมากขึ้นค่าผลได้ของโมโนลอรีลินมีค่าลดลง โดยมีค่าผลได้ของโมโนลอรีลินร้อยละ 40 โดยโมล เมื่อเวลาผ่านไป 60 ชั่วโมง (M.S. Machadoและคณะ [9])

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยกลีเซอรอลสามารถเกิดขึ้นเองโดยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา แต่การทดลองจะทดลองที่อุณหภูมิสูงและใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานาน ซึ่งทำให้สีของผลิตภัณฑ์มีสีเข้ม นอกจากนี้จะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงคือ เกิดปฏิกิริยาไกลเซอโรไลซิสควบคู่ไปด้วยจึงทำให้การควบคุมปฏิกิริยาเป็นไปได้ยาก (Audrey T. GROS และคณะ [10])

2.2.2 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไตรกลีเซอไรด์ (Hydrolysis of triglyceride)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไตรกลีเซอไรด์ เป็นปฏิกิริยาที่น้ำทำปฏิกิริยากับหมู่เอสเทอร์ในโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ กลีเซอรอล และกรดไขมัน ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไตรกลีเซอไรด์

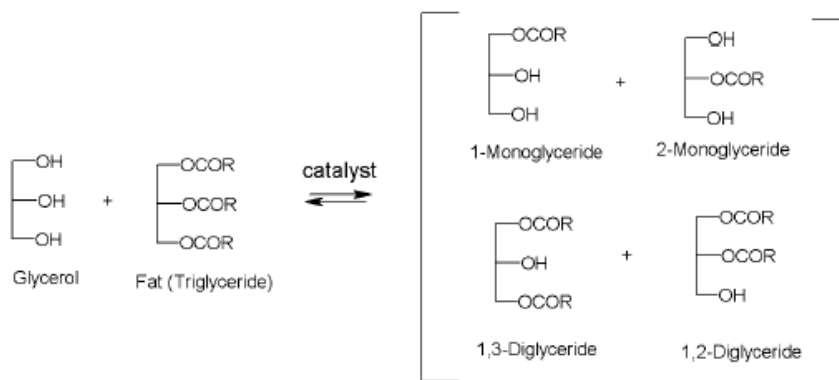
ที่มา http://mhchem.org/221/COTW/fats_and_oils/FatsANDOils.html

การศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันดอกทานตะวัน (sunflower oil) ในสภาวะใกล้จุดวิกฤต (subcritical water) โดยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 270-350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันดอกทานตะวัน และพบโมโนกลีเซอไรด์เกิดขึ้นร้อยละ 10 โดยโมล (R. Alenezi และคณะ[11])

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้ำมันพืชโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะสองชนิดบนตัวรองรับตัวเดียวกัน (double-metal cyanide) ด้วยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยมวลของน้ำมันพืช ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบค่าการเปลี่ยนของไตรกลีเซอไรด์ร้อยละ 92.7 โดยมวล เป็นโมโนกลีเซอไรด์ร้อยละ 14 โดยมวล ผลิตภัณฑ์ส่วนมากจะเป็นกรดไขมันถึงร้อยละ 50 โดยมวล (J.K. Satyarthi และคณะ [12]) การควบคุมปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นไปได้ยาก เนื่องจากการสลายพันธะของหมู่เอสเทอร์ที่รวดเร็วด้วยน้ำ จากงานวิจัยของ R. Alenezi และ J.K. Satyarthi จึงสรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไม่เหมาะสมในการผลิตโมโนกลีเซอไรด์

2.2.3 ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสไตรกลีเซอไรด์ (Glycerolysis of triglyceride)

ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสไตรกลีเซอไรด์ เป็นปฏิกริยาระหว่างกลีเซอรอลทำปฏิกริยากับไตรกลีเซอไรด์ เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารผสมของ โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ดังรูปที่ 2.8



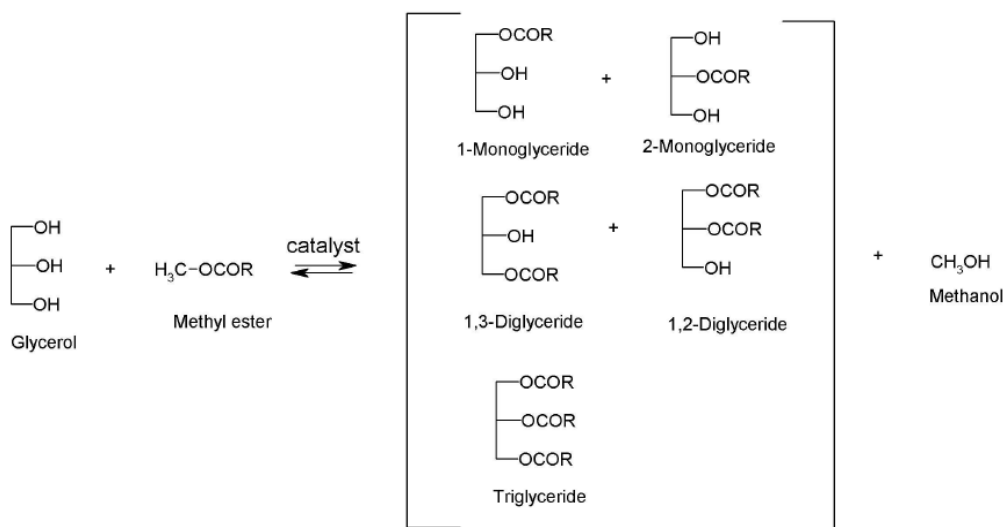
รูปที่ 2.8 ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสไตรกลีเซอไรด์ (Negi Devender [2])

การศึกษาปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสไตรกลีเซอไรด์โดยใช้โซเดียมเมทอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผสมอยู่ในกลีเซอรอลเป็นตัวเร่งปฏิกริยา ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส พบว่ามีปริมาณโมโนกลีเซอไรด์เกิดขึ้นร้อยละ 40 โดยมวล (David A.Echeverri และคณะ [13]) การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การละลายของกลีเซอรอลในโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ เกิดได้ดีขึ้น โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 250 องศาเซลเซียส ค่าการละลายของกลีเซอรอลในไตรกลีเซอไรด์ เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 65

การศึกษาปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสไตรกลีเซอไรด์ โดยใช้เอนไซม์ไลเปส (Angela F.A. และคณะ [14]) พบว่าโมโนกลีเซอไรด์ที่ถูกผลิตจากน้ำมันมะกอกกับกลีเซอรอล โดยใช้โพรเพนที่ถูกอัดให้เป็นของเหลวเป็นตัวช่วยทำละลายในปฏิกริยา อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันมะกอก 2:1 และอัตราส่วนโดยโมลของโพรเพนต่อไตรกลีเซอไรด์และกลีเซอรอลรวมกัน 4:1 ปริมาณเอนไซม์ร้อยละ 10 โดยมวลไตรกลีเซอไรด์ ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 30 บาร์ พบว่าเกิดโมโนกลีเซอไรด์ขึ้นร้อยละ 60 โดยมวลของผลิตภัณฑ์

2.2.4 ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ (Glycerolysis of Methyl Esters)

ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์เป็นปฏิกริยาย้อนกับในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยมีกลีเซอรอลและเมทิลเอสเทอร์เป็นสารตั้งต้น ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ (Negi Devender [2])

การศึกษาปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์พบว่า เมื่อนำเมทิลเอสเทอร์ที่มาจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอล โดยมีการนำเมทานอลออกจากระบบด้วยแก๊สไนโตรเจน โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส พบว่าเกิดโมโนกลีเซอไรด์ขึ้นร้อยละ 50 โดยมวลของผลิตภัณฑ์ (H. Nouredini [15]) การนำแก๊สเมทานอลออกจากระบบพบว่าปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้นประมาณสองเท่าเมื่อเทียบกับการทดลองระบบปิด (จากค่าการเปลี่ยนของเมทิลเอสเทอร์ 0.35 เป็น 0.8) และได้ค่าการเลือกเกิดของโมโนกลีเซอไรด์สูงขึ้นด้วย (Devender S. Negi และคณะ [16])

สำหรับปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง อัตราส่วนของโมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ จะขึ้นอยู่กับความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา (Yannick และคณะ [5], Sebastein และคณะ [17]) Cristian A. Feretti และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาการผลิตโมโนกลีเซอไรด์โดยใช้เมทิลโอลีเอทเป็นสารตั้งต้น โดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิในการทดลอง 220-250 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลโอลีเอท 2:1-6:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 30 กรัมต่อโมลเมทิลโอลีเอท พบว่า มีค่าผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ได้ร้อยละ 77 โดยโมล ซึ่งมากกว่าการผลิตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสแก่

แต่อย่างไรก็ตามการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ด้วยปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสจะต้องทำการลดอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ทันทีเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ (N.O.V. SONNTAG [6] และ US Patents [3])

สำหรับการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์จะเลือกปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์เป็นปฏิกิริยาในการศึกษา โดยมีเหตุผลดังที่กล่าวในหัวข้อ 1.1 จากการศึกษางานวิจัยสามารถสรุปการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์จากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ ดังตารางที่ 2.1

พบว่า การทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous catalyst) ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง ใช้เวลาในการทดลองต่ำกว่าการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalyst) มีค่าการเปลี่ยนของสารตั้งต้นใกล้เคียงกัน แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์มีค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิดีนสูงกว่า ในการทดลองทุกๆ การทดลองจะมีการนำเมทานอลออกจากระบบ ในงานวิจัยได้กล่าวว่าเพื่อให้ค่าการเปลี่ยนของสารตั้งต้นมีค่ามากขึ้น ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าพบปริมาณผลิตภัณฑ์มากขึ้น



ตารางที่ 2.1 แสดงปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตดในตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์และตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

สารตั้งต้น	ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิ	อัตราส่วน กลีเซอ อรอลต่อ เมทิลเอส เทอร์	เวลาใน การทำ การ ทดลอง (นาที)	นำเมทานอล ออกจาก ระบบ	ผลได้ ของโม โนกลี เซอไรด์	ผู้จัดทำ
ไบโอดีเซล จากน้ำมัน ถั่วเหลือง	โซเดียมไฮดรอก ไซด์ (ร้อยละ0.3 โดยมวล)	200- 210	1:1 ถึง 4:1	30	ไล่ออกจาก ระบบด้วย แก๊ส ไนโตรเจน	50	H. Noureddini และคณะ [15]
เมทิลโอลลี เอต	โซเดียมเมทอก ไซด์ (ร้อยละ1 โดยมวล)	135	2:1	240	ไล่ออกจาก ระบบด้วย แก๊ส ไนโตรเจน	40	Negi Devender และคณะ [2]
เมทิลโอลลี เอต	โพแทสเซียมไฮ ดรอกไซด์ (ร้อยละ0.5โดยมวล)	130	1.4:1	180	ความดัน สูญญากาศ	38.7	T.kimmel และคณะ [19]
ไบโอดีเซล จาก น้ำมันดอก ทานตะวัน	โพแทสเซียมไฮ ดรอกไซด์ (ร้อยละ0.1โดยมวล)	220	1.5:1-4:1	30	กลั่นแยก	53	Norman O.V. SONNTAG และคณะ[6]
เมทิลโอลลี เอต	แมกนีเซียม ออกไซด์ (30 กรัมต่อโมลเมทิล เอสเทอร์)	250	4.5:1	480	ไล่ออกจาก ระบบด้วย แก๊ส ไนโตรเจน	77	Cristian A. Ferretti และ คณะ [18]
เมทิลสเตีย เรท	แมกนีเซียม ออกไซด์ 0.5 กรัมต่อโมลเมทิล เอสเทอร์	220	1:1	360	ไล่ออกจาก ระบบด้วย แก๊ส ไนโตรเจน	42	J.Barrault และคณะ [20]
เมทิลสเตีย เรท	แมกนีเซียมบน ตัวรองรับอะลูมิเนียม รูพรุน ขนาดกลาง	220	3:1	960	ไม่ได้กล่าวถึง	50	Yannick และคณะ [5]

2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาไกลเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์

กระบวนการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ในปฏิกิริยาในปฏิกิริยาไกลเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการผลิตอยู่ 3 ประเภทด้วยกันคือ

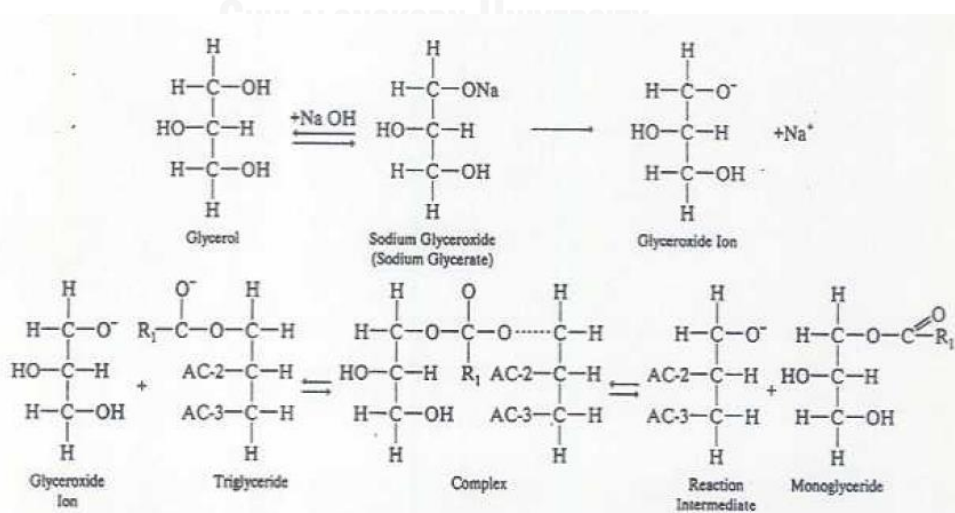
1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) คือตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกเบสแก่
2. เอนไซม์ ได้แก่ เอนไซม์ไลเปส (Enzyme catalyst)
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst)

2.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ในปฏิกิริยาไกลเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสแก่ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ บางครั้งอาจใช้เกลือโซเดียม เช่น NaOC_2H_5 NaOC_4H_9 (Norman O.V. SONNTAG และคณะ [6] และ US Patents [3])

การใช้เบสแก่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับกรดแก่ (Sulfuric acid) ในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของไตรอะซีทินพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่ามากกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้กรดซัลฟิวริกถึง 3 เท่า (Dora E. López และคณะ [21])

การผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปในกลีเซอรอล จะเกิดสารประกอบโซเดียมกลีเซอไรด์ (Sodium glyceroxide; $\text{NaOC}_3\text{H}_5(\text{OH})_2$) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาไกลเซอโรไลซิส โดยกลไกตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมกลีเซอไรด์แสดงดังรูปที่ 2.10 (วันจักร โชครัตนชัย และคณะ [30])



รูปที่ 2.10 กลไกตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอล (นาย วันจักร โชครัตนชัย และคณะ [30])

สารประกอบโซเดียมกลีเซอรอกไซด์จะแตกตัวเป็นไอออนประจุบวก(โซเดียม) และประจุลบ (กลีเซอรอกไซด์) โดยกลีเซอรอกไซด์ไอออนจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งเกิดปฏิกิริยากับเมทิลเอสเทอร์ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์

ข้อดีของการใช้เบสแก่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคือมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงและตัวเร่งปฏิกิริยามีราคาไม่แพงมากนัก สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตโมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ในขนาดอุตสาหกรรมได้ แต่มีข้อเสียคือต้องทำการสะเทินเบสด้วยกรดก่อน มีขั้นตอนในกระบวนการผลิตเพิ่มขึ้น โดยส่วนมากจะใช้กรดฟอสฟอริกในการสะเทิน อาจทำให้เกิดสบู่ในผลิตภัณฑ์ รวมทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และเป็นอันตรายต่อการบริโภคในอุตสาหกรรมอาหาร (Norman O.V. SONNTAG[6], Yuguo Zheng [1], Avelino Corma [4]) จึงมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.3.3

2.3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเอนไซม์ (Enzyme catalyst)

การผลิตโมโนกลีเซอไรด์ที่ใช้ไตรกลีเซอไรด์เป็นสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเอนไซม์ที่นิยมใช้คือเอนไซม์ไลเปส ทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นผลิตภัณฑ์คือ โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ การศึกษาปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์ม 7:1 โดยโมล พบว่ามีค่าผลได้โมโนกลีเซอไรด์ร้อยละ 100 โดยโมล มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาของโมโนกลีเซอไรด์ 0.338 มิลลิโมลต่อลิตรต่อชั่วโมง (Cheirsilp. B และคณะ [22])

เนื่องจากการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การควบคุมปฏิกิริยาเป็นไปได้ยาก ต้องใช้สภาวะที่เหมาะสมและเฉพาะเจาะจงกับเอนไซม์แต่ละชนิด อีกทั้งอัตราในการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ของเอนไซม์ยังต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นอยู่มาก ปัจจุบันการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ในอุตสาหกรรมจึงยังไม่ใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Cristian A. Feretti และคณะ [18])

2.3.3 ตัวเร่งปฏิกิริยารวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst)

เนื่องจากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน อีกทั้งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ การศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเริ่มศึกษาจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันก่อน

ในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าและใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด (Dora E. López [21]) เพราะฉะนั้นในการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาจึงศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสเป็นหลัก

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน

ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน		
Metal oxides	Alkaline earth oxides	MgO, CaO ,SrO
	Rare earth oxides	La ₂ O ₃ , Ce ₂ O ₃ ,
	Others	ZnO, TiO ₂
Zeolites		Al _x Si _x O _x
Supported alkaline metal		Na/Al ₂ O ₃ , Ca/Al ₂ O ₃
Clay minerals		Hydrotalcites
Sulfate, phosphate		Na ₂ SO ₄ , CaSO ₄ , Na ₃ PO ₄ , Ca ₃ (PO ₄) ₂
Non oxides		CaCO ₃ , Guanidine(C(NH)(NH ₂) ₂)

ที่มา D.W. Lee และคณะ 2009 [23]

ในการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันจึงเลือกหมู่ฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการศึกษา เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังไม่มีการศึกษามากนัก และสามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันได้ดี ดังตารางที่ 2.3

เนื่องจากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำให้สารตั้งต้น คือ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลละลายเป็นเนื้อเดียวกัน อีกทั้งปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์เกิดปฏิกิริยาได้ยากกว่าปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าต่ำ จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงเพื่อให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้น ดังนั้นเกณฑ์ในการเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 2.3 แสดงตัวเร่งปฏิกิริยาหมู่ฟอสเฟตในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชัน

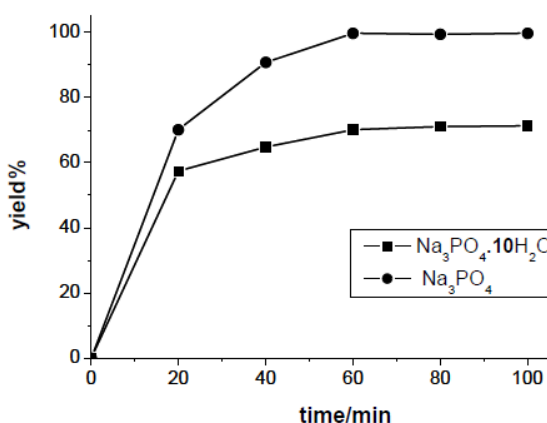
สารตั้งต้น	ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิในการทดลอง (เซลเซียส)	อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันโดยโมล	เวลาในการทำการทดลอง (นาที)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละโดยมวล	ค่าร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล	ผู้จัดทำ
น้ำมันถั่วเหลือง	Na_3PO_4	80	9:1	20	3	71.3	S.T. Jiang และคณะ [24]
น้ำมันเมล็ดงุ่น	Na_3PO_4	60	6:1	60	11	82.4	P.D.Filippis และคณะ [25]
น้ำมันถั่วเหลือง	K_3PO_4	60	6:1	30	4	94.4	Guoqing Guan และคณะ [26]
น้ำมันปาล์ม	Na_3PO_4	210	18:1	30	1	98.5	Khritsayaporn และคณะ [7]

จากการศึกษาของKhritsayaporn และคณะ [7] พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง (210 องศาเซลเซียส) โดยมีค่าผลได้ของไบโอดีเซล 98.5 ร้อยละโดยมวล เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตจึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการศึกษาปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตต่อไป

2.3.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต

จากการศึกษางานวิจัยของ P.D.Filippis และคณะ [25] เมื่อเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านกระบวนการเผา (Na_3PO_4) และโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรตในสภาวะปกติที่มีโมเลกุลน้ำล้อมรอบ 12 โมเลกุล ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) ในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของน้ำมันต่อเมทานอลโดยโมล 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 11 โดยมวลของน้ำมัน เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงพบว่า ค่าผลได้ของเมทิลเอสเทอร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตมีค่าร้อยละ 82.4 เมื่อเทียบกับค่าผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรต ซึ่งมีค่าร้อยละ 65.3 ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านกระบวนการเผามีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรต

จากการศึกษางานวิจัยของ S.T. Jiang และคณะ [24] พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่มีโมเลกุลน้ำล้อมรอบ 10 โมเลกุล ให้ค่าผลได้ของไบโอดีเซลต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ไม่มีน้ำล้อมรอบโมเลกุล ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการเปรียบเทียบผลได้ของไบโอดีเซลของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่มีโมเลกุลน้ำล้อมรอบ 10 โมเลกุล กับตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมัน อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันโดยโมล 9:1 ที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที (P.D.Filippis และคณะ [25])

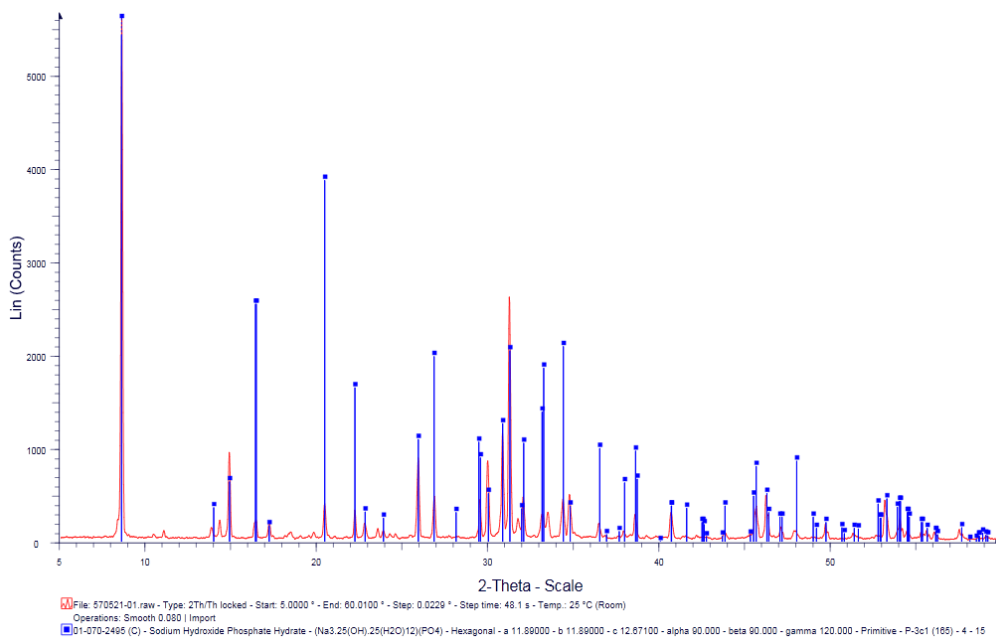
อีกทั้งยังพบว่าการละลายของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) ที่อยู่ในวัฏภาคเมทิลเอสเทอร์มีค่าน้อยมาก พบปริมาณโซเดียมฟอสเฟตในวัฏภาคเมทิลเอสเทอร์อยู่ประมาณร้อยละ 3-3.5 ของปริมาณโซเดียมฟอสเฟตทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าการละลายตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตในวัฏภาคเมทิลเอสเทอร์ในสภาวะการทดลองต่างๆกัน (S.T. Jiang และคณะ [24])

ตัวแปรคงที่ในการทดลอง	ตัวแปรที่ทำการศึกษา	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในวัฏภาคเมทิลเอสเทอร์ (มิลลิกรัม/กรัมไบโอดีเซล)	ค่าผลได้ไบโอดีเซลที่ 80 นาที
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส, ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที, อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันโดยโมล 6:1	2%	0.63	94.7
	3%	0.66	95.2
	4%	0.68	97.5
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส, ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันร้อยละ 3 โดยมวล	6:1	0.60	93.1
	9:1	0.61	94.1
	12:1	0.66	98.1
อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันโดยโมล 9:1, ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันร้อยละ 3 โดยมวล	60 °C	0.63	93.9
	70 °C	0.67	97.2
	80 °C	0.71	97.4

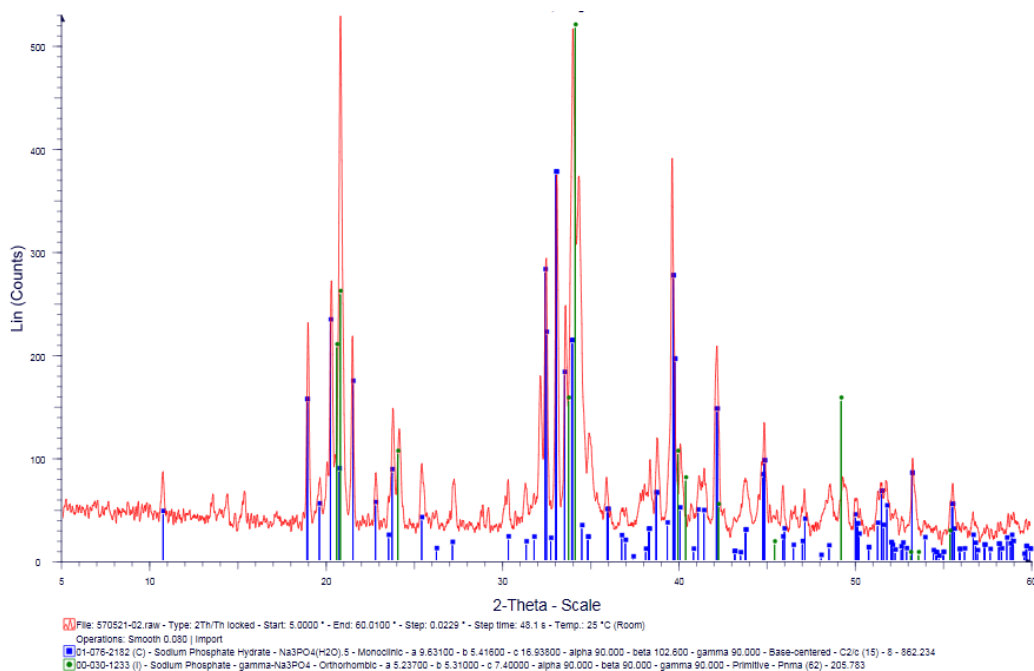
การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต จากงานวิจัยงานของ Khritsayaporn และคณะ [7] ศึกษาโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตโดยเครื่องมือวิเคราะห์ด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) โดยมีผลการทดลองดังนี้

ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตโดยปกติมีโครงสร้างคือโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งมีการดูดซับน้ำจากอากาศได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งมีโมเลกุลน้ำเกาะอยู่โดยรอบโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟต 12 โมเลกุล ในลักษณะเฮกซะกอนอล (Hexagonal) การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรต จะวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) ดัง รูปที่ 2.12



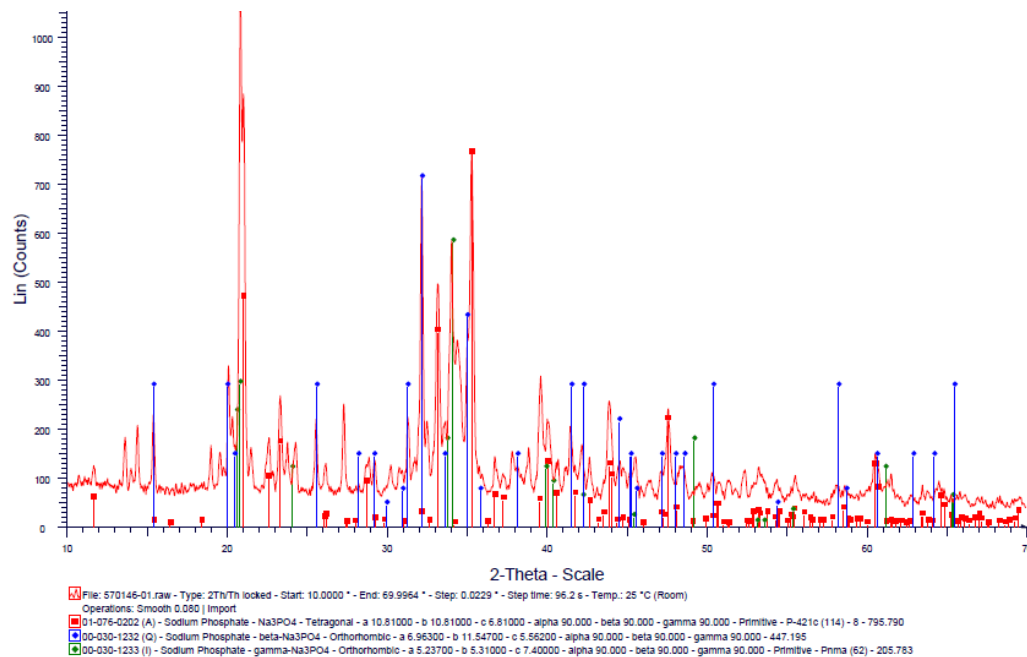
รูปที่ 2.12 เส้นสีน้ำเงินแสดงโครงสร้างผลึกของโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรตจากการวิเคราะห์ลักษณะผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD) (Khritsayaporn และคณะ [7])

เมื่อนำโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรตมาอบไล่ผลึกน้ำที่เกาะอยู่โดยรอบโมเลกุลฟอสเฟต พบว่าโครงสร้างผลึกของโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรตที่มีน้ำ 12 โมเลกุลอยู่รอบโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟต ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) ที่มีลักษณะผลึกแบบเฮกซะกอนอล เปลี่ยนเป็นโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรตที่มีน้ำ 5 โมเลกุลอยู่รอบโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟต ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ที่มีลักษณะผลึกแบบมอนอคลินิก (Monoclinic) และมีโครงสร้างเกิดขึ้นใหม่คือโซเดียมฟอสเฟตแกมมาโดยมีลักษณะผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เส้นสีน้ำเงินแสดงโครงสร้างผลึกของโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรตที่มีน้ำล้อมรอบ 5 โมเลกุล เส้นสีเขียวแสดงโครงสร้างผลึกของโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟตแกมมา จากการวิเคราะห์ลักษณะผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD) (Khritsayaporn และคณะ [7])

เมื่อนำโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านกระบวนการอบเพื่อสลายโมเลกุลน้ำบางส่วน มาเผาในเตาเผาอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าโครงสร้างผลึกของโซเดียมฟอสเฟตเปลี่ยนไปโดยน้ำ 5 โมเลกุล ที่ล้อมรอบโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรตจะถูกเผาหายไปจากโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรต เกิดเป็นโครงสร้างผลึกของโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) มีลักษณะผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) และโครงสร้างผลึกโซเดียมฟอสเฟตเบตา ($\text{Beta-Na}_3\text{PO}_4$) มีลักษณะผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) ส่วนโครงสร้างผลึกของโซเดียมฟอสเฟตแกมมา ยังไม่ถูกเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เส้นสีแดงแสดงโครงสร้างผลึกของโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟต เส้นสีน้ำเงินแสดงโครงสร้างผลึกของโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟตเบต้า เส้นสีเขียวแสดงโครงสร้างผลึกของโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟตแกมมา จากการวิเคราะห์ลักษณะผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD) (Khritsayaporn และคณะ [7])

จากการศึกษาวิจัยของ Khritsayaporn และคณะ [7] พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น ทำให้ค่าผลได้ของไบโอดีเซลสูง โดยมีค่าผลได้ของไบโอดีเซลอยู่ที่ร้อยละ 98.5 โดยมวล เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 18:1 ปริมาณโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมัน

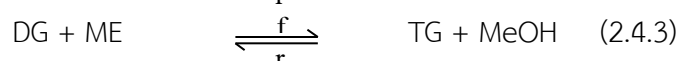
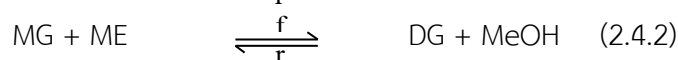
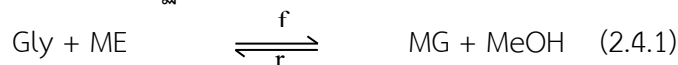
ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตมีการละลาย (leaching) ต่อเมทานอลและน้ำมันปาล์มลดลง ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตดูดซับน้ำในอากาศได้น้อยมาก มีความเสถียร สามารถนำมาใช้ใหม่ได้ โดยการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ 5 ครั้งค่าผลได้ของไบโอดีเซลไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

จึงสรุปได้ว่าในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านกระบวนการเผาที่มีโครงสร้างเป็น (Na₃PO₄) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาไกลเซอไรด์เมทิลเอสเทอร์

2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์

ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต เป็นปฏิกิริยาที่กลีเซอรอลทำปฏิกิริยากับเมทิลเอสเทอร์ (เมทิลปาล์มมิเตต) โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยา 2 แบบด้วยกัน

2.4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ 1



กลไกในการเกิดปฏิกิริยาโดยอ้างอิงจากขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของ H. Nouredini และคณะ [15]

2.4.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ 2



กลไกในการเกิดปฏิกิริยาโดยอ้างอิงจากขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของ Negi Devender และคณะ [2]

โดย Gly แทน กลีเซอรอล ME แทนเมทิลเอสเทอร์ MG แทนโมโนกลีเซอไรด์

DG แทนไดกลีเซอไรด์ TG แทนไตรกลีเซอไรด์ MeOH แทนเมทานอล

f แทนปฏิกิริยาไปข้างหน้า r แทนปฏิกิริยาเกิดย้อนกลับ

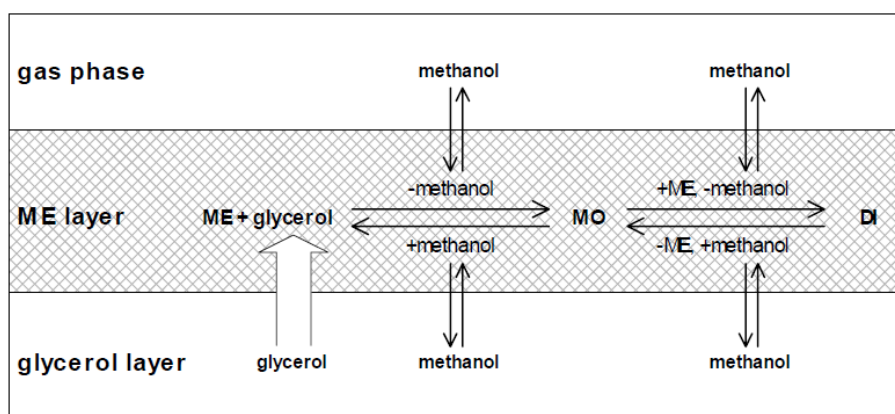
(1), (2), และ (3) แทนลำดับในการเกิดปฏิกิริยา

จากการศึกษาวิจัยของ Negi Devender และคณะ [2] ศึกษาปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลโอเลอที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าในวิญภาคกลีเซอรอล แทบไม่พบปริมาณเมทิลเอสเทอร์หลงเหลืออยู่ เมื่อเทียบกับปริมาณกลีเซอรอลที่พบในวิญภาคของเมทิลเอสเทอร์ ดังตารางที่ 2.5 ดังนั้นกลไกในการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ กลีเซอรอลละลายอยู่ในวิญภาคเมทิลเอสเทอร์ก่อน เกิดเป็นผลิตภัณฑ์โมโนกลีเซอไรด์ เมื่อโมโนกลีเซอไรด์เกิดขึ้น เนื่องจากโมโนกลีเซอไรด์เป็นสารอิมัลซิฟายเออร์ กลีเซอรอลจึงถูกพบในวิญภาคเมทิลเอสเทอร์ในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งวิญภาคเมทิลเอสเทอร์เป็นวิญภาคในการเกิดปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นอยู่ในวิญภาคของเมทิลเอสเทอร์

ตารางที่ 2.5 แสดงปริมาณสารที่พบในแต่ละวัฏภาคของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ Negi Devender และคณะ [2]

วัฏภาคเมทิลเอสเทอร์			วัฏภาคกลีเซอรอล		
X'_{MG}	X'_G	X'_{ME}	X''_{MG}	X''_G	X''_{ME}
0.234	0.100	0.666	0.004	0.990	0.007
0.375	0.258	0.367	0.005	0.987	0.008
0.423	0.386	0.190	0.006	0.983	0.011
0.429	0.456	0.115	0.006	0.981	0.013

ในงานวิจัย Negi Devender และคณะ [2] ได้อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ว่า กลีเซอรอลเป็นสารที่ข้ามวัฏภาค โดยกลีเซอรอลละลายในวัฏภาคเมทิลเอสเทอร์ เกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ขึ้น ผลิตภัณฑ์เกิดในวัฏภาคเมทิลเอสเทอร์ ดังตารางที่ 2.5 และ รูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์

2.5 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์

2.5.1 ผลกระทบความยาวสายโซ่อะตอมของสารตั้งต้นต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์

เนื่องจากในธรรมชาติน้ำมันพืชประกอบด้วยกรดไขมันหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีปริมาณคาร์บอนในสายโซ่กรดไขมันไม่เท่ากัน ทำให้กลไกในการเกิดปฏิกิริยาของสารแต่ละชนิดต่างกัน Lui Yijin [27] ได้ศึกษาชนิดของกรดไขมัน ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้กรดซัลฟิวริกและ SAC-13 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยแปรผันชนิดของสารตั้งต้น กรดอะซิติก(C1) ไปจนถึงกรดคาร์พริก (C10) โดยมี

แนวโน้มว่ากรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนน้อยกว่าจะเกิดค่าการเปลี่ยนที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาเดียวกัน โดยให้เหตุผลว่าค่าการดูดซับของชนิดของกรดไขมันที่แตกต่างกันทำปฏิกิริยาที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา SAC-13 ต่างกัน

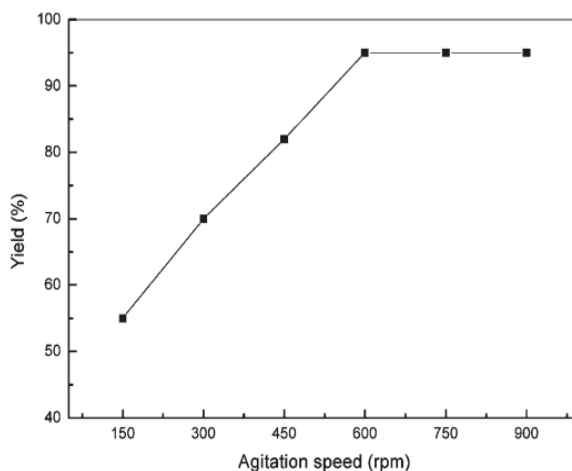
J.Barrault และคณะ [20] ทำการศึกษาความแตกต่างของเมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิดในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Mesopore) โดยพบว่าเมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิดให้ค่าการเปลี่ยนไม่เท่ากัน โดยเมื่อจำนวนอะตอมคาร์บอนเพิ่มขึ้นค่าการเลือกเกิดโมโนกลีเซอไรด์มีค่าต่ำลงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมอะลูมิเนียม Mg-ALMCM-41 ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบใบพัด 500 รอบต่อนาที (J.Barrault และคณะ [20])

ชนิด	อัตราส่วน	เวลาที่ค่าการ	ค่าการเลือกที่	เวลาที่ค่าการ	ค่าการเลือกที่
เมทิลเอสเทอร์	กลีเซอรอลต่อเมทิลเอสเทอร์	เปลี่ยนมีค่าร้อยละ 50 (ชั่วโมง)	ค่าการเปลี่ยนมีค่าร้อยละ 50	เปลี่ยนมีค่าร้อยละ 80 (ชั่วโมง)	ค่าการเปลี่ยนมีค่าร้อยละ 80
C12	1	2	65	4	45
C14	1	7	60	13	55
C18	1	14	28	26	15
C12	3	2	80	3	70
C14	3	8	75	10	68
C18	3	7	70	10	40

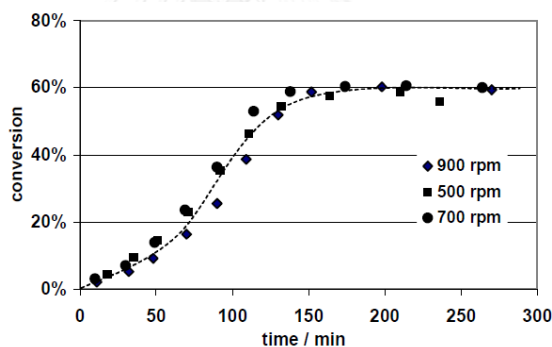
2.5.2 ผลกระทบของความเร็วยรอบของใบพัดที่มีผลต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์

การทดลองของ Y.C Sharma และคณะ [28] ศึกษาผลกระทบของการปั่นกววนต่อค่าผลได้ของไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ และการทดลองของ N. Jaya และคณะ [29] ศึกษาจลนศาสตร์ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมัน (Cotton seed) พบว่าความเร็วยรอบมีผลต่อค่าผลได้ในการผลิตไบโอดีเซล ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงค่าความเร็วรอบต่อค่าผลได้ของไบโอดีเซล (Y.C Sharma และคณะ [28])

การศึกษาปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ ของ T.kimmel และคณะ[19] ศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบต่อค่าการเปลี่ยนของเมทิลโอเลอเท พบว่าตั้งแต่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เป็นต้นไป ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนของเมทิลโอเลอเท ดังรูปที่ 2.17

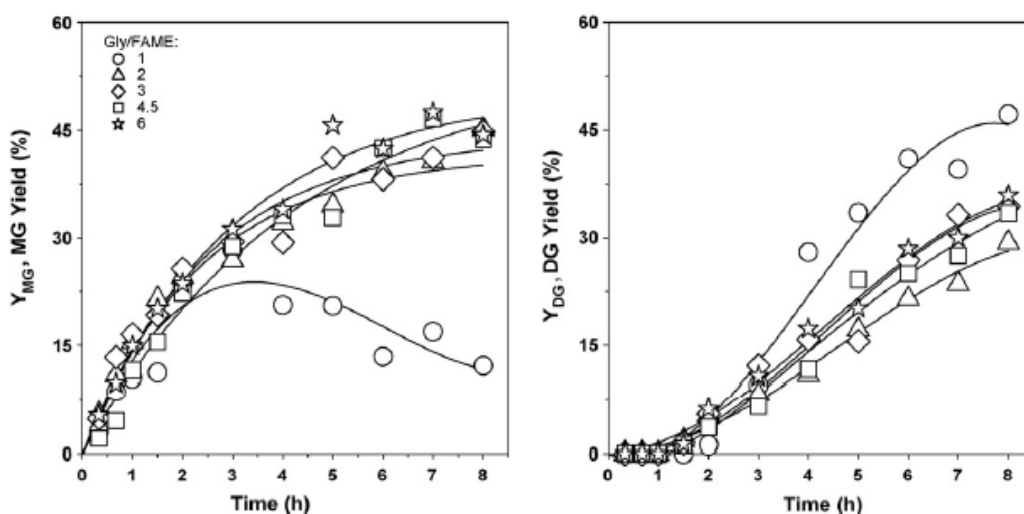


รูปที่ 2.17 แสดงผลของความเร็วรอบของไบพัต 500-900 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดัน 300 มิลลิบาร์ (T.kimmel และคณะ [19])

งานวิจัยของ Khritsayaporn และคณะ [7] ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต พบว่าที่ความเร็วรอบที่ 400 ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อความเร็วรอบมีค่ามากกว่านี้ ค่าผลได้ของไบโอดีเซลมีค่าคงที่ จากการศึกษา งานวิจัยของผลกระทบของความเร็วรอบของไบพัตที่มีผลต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ ในงานวิจัยนี้จะศึกษาความเร็วรอบของไบพัต 400-800 รอบต่อนาที

2.5.3 ผลกระทบอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์

ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้น มีผลต่ออัตราการเกิดของโมโนกลีเซอไรด์ โดยจากการทดลองของ Cristian A. Ferretti และคณะ [18] ได้แปรผันอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลโอเลอเทท พบว่าปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์มากขึ้น ดังรูปที่ 2.18



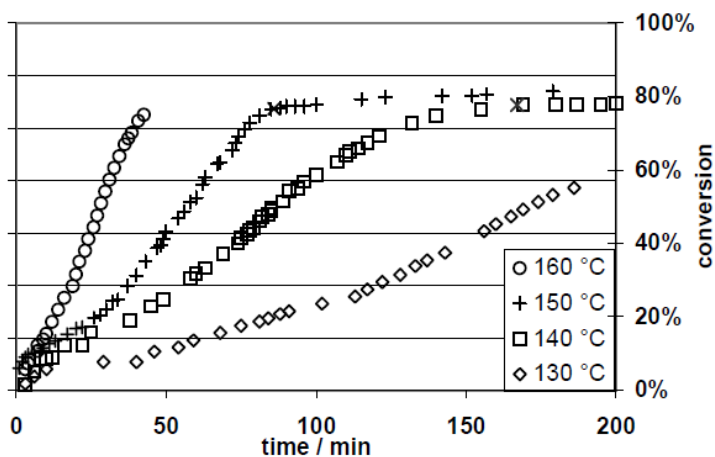
รูปที่ 2.18 แสดงอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลเอสเทอร์ด้วยอัตราส่วน 1:1-6:1 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ 11 กรัมต่อโมลเมทิลเอสเทอร์ ที่ความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที (Cristian A. Ferretti และคณะ [18])

J.Barrault และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลเอสเทอร์โดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) โดยพบว่า การป้อนอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลเอสเทอร์โดยโมล 3:1 ทำให้ค่าการเลือกเกิดสูงขึ้นที่ค่าการเปลี่ยนร้อยละ 50 ดังตารางที่ 2.6

จากการศึกษางานวิจัยของผลกระทบอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลกระทบอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อเมทิลเอสเทอร์ 1:1-6:1 โดยโมล

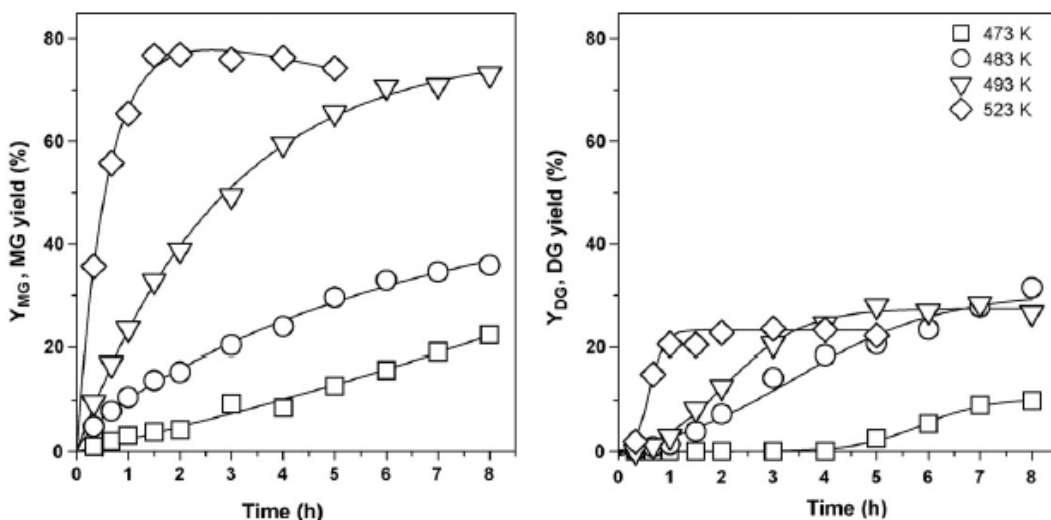
2.5.4 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลกระทบต่อการปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์

การทดลองของ T.kimmel และคณะ [19] ทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดแก้ว โดยจากผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้นและมีค่าการเปลี่ยนของเมทิลเอสเทอร์สูงขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าการเปลี่ยนของเมทิลเอสเทอร์ ที่ความดัน 300 มิลลิบาร์ อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลเอสเทอร์ 2:1 ปริมาณโซเดียมเมทอกไซด์ร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที (T.kimmel และคณะ [19])

การทดลองของ (Cristian A. Ferretti และคณะ [18]) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น อีกทั้งกลีเซอรอลละลายในวัฏภาคเมทิลเอสเทอร์ได้มากขึ้น ทำให้ค่าผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์สูงขึ้นดังรูปที่ 2.20

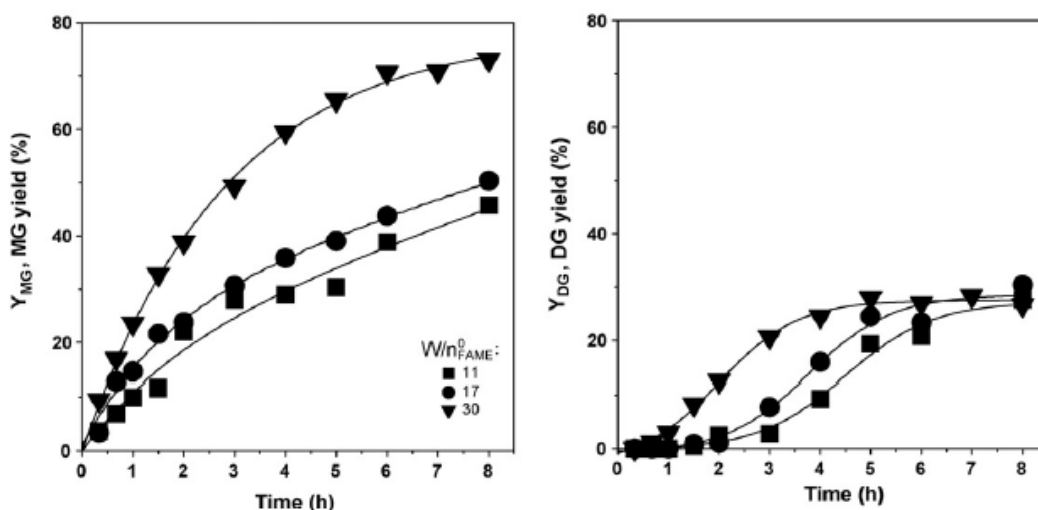


รูปที่ 2.20 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าผลได้การผลิตโมโนกลีเซอไรด์ ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลเอสเทอร์ 4.5:1 โดยโมล ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ 30 กรัมต่อโมลเมทิลเอสเทอร์ ที่ความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที

จากการศึกษาวิจัยของผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อการปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในช่วง 190 -250 องศาเซลเซียส

2.5.5 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์

จากงานวิจัยของ Cristian A. Ferretti และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อโมลเมทิลเอสเทอร์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ ค่าผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์มีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์สูงสุดร้อยละ 77 โดยโมล ดังรูปที่ 2.21



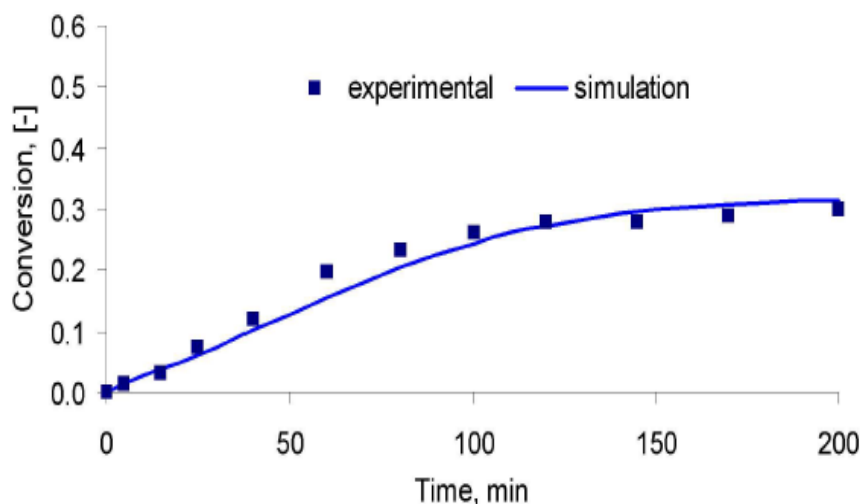
รูปที่ 2.21 แสดงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (กรัมต่อโมลเมทิลเอสเทอร์) อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลเอสเทอร์ 4.5 โดยโมล อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที Cristian A. Ferretti และคณะ [18]

ในงานวิจัยของ Cristian A. Ferretti และคณะ [18] กล่าวถึงผลกระทบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาดังนี้ การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ปริมาณพื้นที่ผิวที่ว่างไวในการเกิดปฏิกิริยา (Active site) มีปริมาณมากขึ้น แมกนีเซียมออกไซด์มีความจำเพาะต่อการเกิดโมโนโกลีอินทำให้ค่าผลได้ของโมโนโกลีอินมีค่าสูงขึ้น

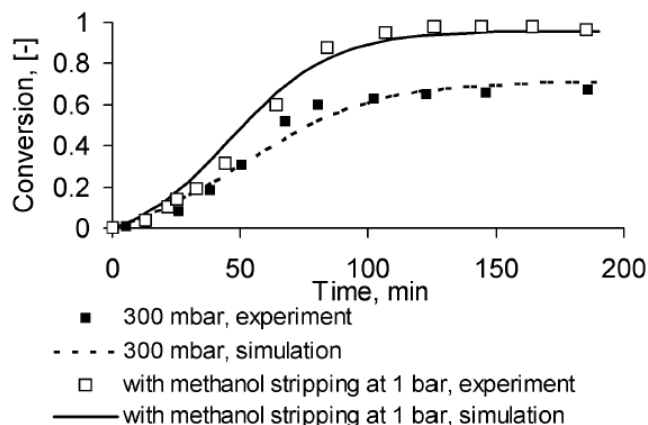
จากการศึกษางานวิจัยของผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อการปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงร้อยละ 0.5-2 โดยมวลของเมทิลเอสเทอร์

2.5.6 ผลกระทบของการนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียงออกจากระบบที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์

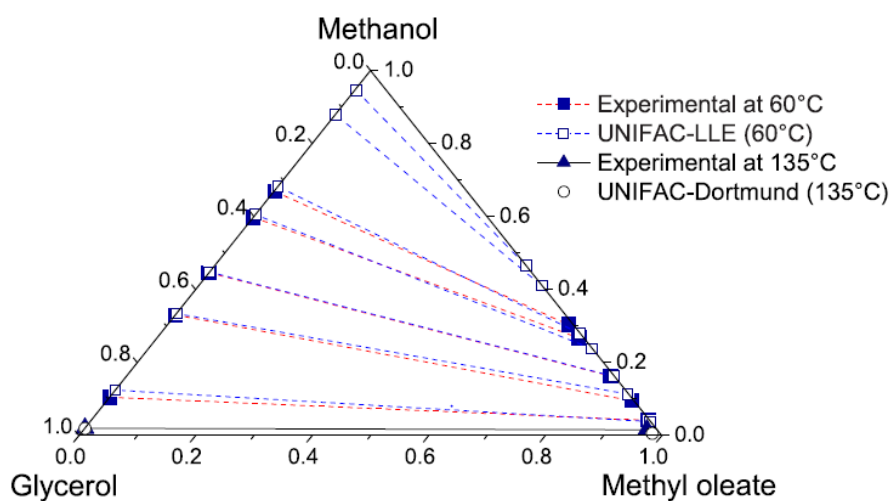
Vorgelegt von และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลโอเลอเท โดยใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเปรียบเทียบการทดลองในระบบปิดที่ไม่นำเมทานอลออกจากระบบ ดังรูปที่ 2.22 และการทดลองการนำเมทานอลออกจากระบบดังรูปที่ 2.23 พบว่าการนำเมทานอลออกจากระบบให้ค่าการเปลี่ยนของเมทิลเอสเทอร์มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมทานอลเป็นสารผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสด้วยเมทิลเอสเทอร์ การดึงออกแก๊สเมทานอลจากระบบเป็นการเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาไปข้างหน้า เมทิลเอสเทอร์ จะถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น ทำให้ค่าการเปลี่ยนของเมทิลโอเลอเทมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.22 แสดงค่าการเปลี่ยนของเมทิลโอเลอเทที่เปลี่ยนตามเวลา ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลโอเลอเท 1:1 โดยโมล โดยไม่ทำการดึงเมทานอลออกจากระบบ (Vorgelegt von [2])



รูปที่ 2.23 แสดงปริมาณเมทิลโอเลอที่เปลี่ยนตามเวลา ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลโอเลอ 1:1 โดยโมล โดยทำการนำเมทานอลออกจากระบบ ทั้งแบบ สูญญากาศ และด้วยการไล่ด้วยไนโตรเจน (Vorgelegt von [2])



รูปที่ 2.24 แสดงปริมาณเมทานอลในวัฏภาคของกลีเซอรอลและเมทิลโอเลอที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลโอเลอ 1:1 โดยโมล (Vorgelegt von [2])

เมื่อพิจารณาจากเส้น tie line ของแผนภาพไโดแกรมรูปที่ 2.24 พบว่าเมทานอลสามารถละลายในวัฏภาคของกลีเซอรอลได้ดีกว่าเมทิลโอเลอ

จากการศึกษาวิจัยของผลกระทบของการนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียงออกจากระบบที่มีผลต่อการปฏิกิริยากลิเซโรไลซิสเมทิลเอสเทอร์ ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลกระทบของการนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียงออกจากระบบเปรียบเทียบกับ การทดลองในระบบปิด

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 เมทิลปาล์มมีเตท (Methyl palmitate $C_{17}H_{34}O_2$, 98%) จากบริษัท Sigmag chemical
- 3.1.2 กลีเซอริน (Glycerin C_3H_8OH , 99.5%) จากบริษัทน้ำมันพืชปทุม
- 3.1.3 ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม (Mixed biodiesel, 96.5%) จากบริษัทน้ำมันพืชปทุม
- 3.1.4 โซเดียมฟอสเฟต (Sodium phosphate laboratory grade; $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$)
- 3.1.5 โซเดียมเพอริโอเดต (Sodium periodate ; $NaIO_4$, 99.8%)
- 3.1.6 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide Pellet; $NaOH$)
- 3.1.7 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4 , 98%)
- 3.1.8 N-methyl-N-trimethylsilyltrifluoroacetamide (MSTFA)
- 3.1.9 ไพริดีน (Pyridine)
- 3.1.10 เตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran; THF)
- 3.1.11 นอร์มอลเฮปเทน (N-Heptane)
- 3.1.12 Glyceryl mononadecanoate (Mono C19)
- 3.1.13 1-3 Glyceryl dinadecanoate (Di C38)
- 3.1.14. Glyceryl trinadecanoate (Tri C57)

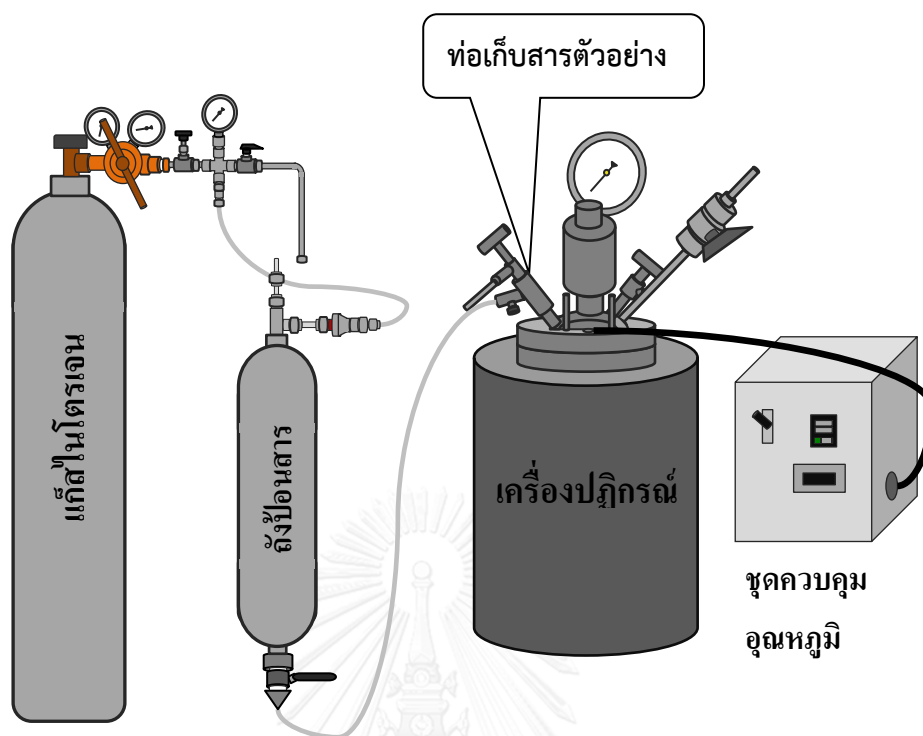
3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตชนิดแลปเกรด (Sodium phosphate laboratory grade; $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งมีโมเลกุลน้ำล้อมรอบ 12 โมเลกุล จะผ่านกระบวนการอบไอน้ำในตู้อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการอบจะผ่านกระบวนการเผาในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จะมีโครงสร้างเป็นโซเดียมฟอสเฟตที่ว่างไว้ในกาเกิดปฏิกิริยา (Na_3PO_4) จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตจะถูกคัดแยกขนาดให้มีความหนาแน่นในช่วง 400-1000 ไมโครเมตร ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าขนาดช่องว่างของตะแกรงใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2.2 การทดลองในปฏิกิริยากลิเซอรอลซิสเมทิลปาล์มมิเตต

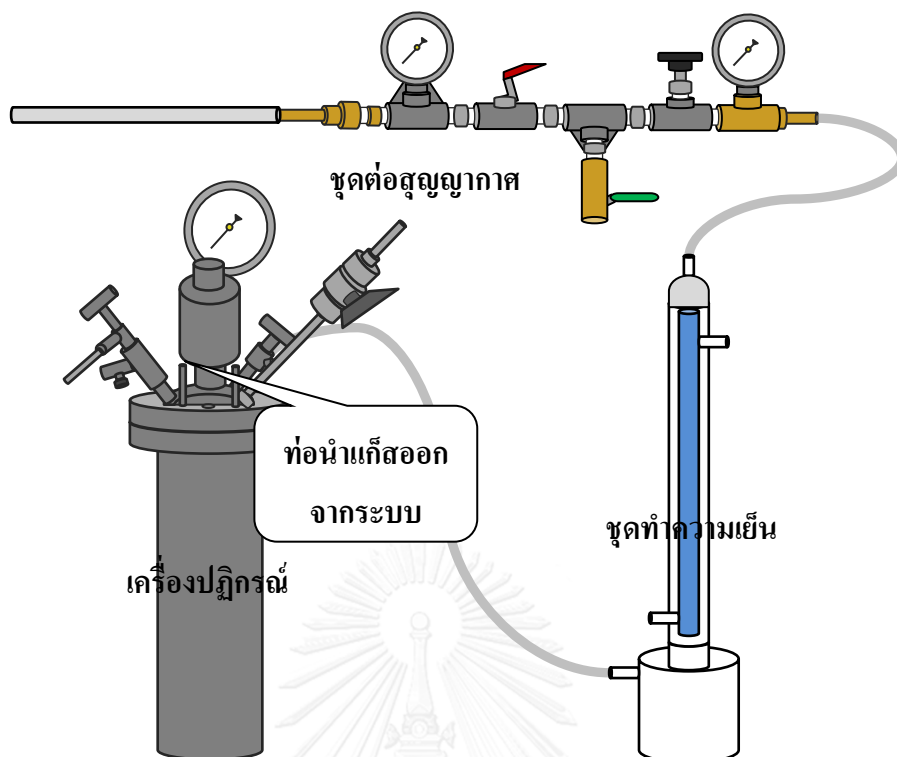
ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตจะถูกใส่ลงในตะแกรงสแตนเลส ตะแกรงจะถูกมัดด้วยลวดสแตนเลสภายในเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นนำสารตั้งต้นคือเมทิลปาล์มมิเตตใส่ลงไปในเครื่องปฏิกรณ์ ในถังป้อนสาร (Feed bomb) มีสารตั้งต้นอีกชนิดหนึ่งคือกลีเซอรอลใสในอัตราส่วนที่ทำการทดลอง ถังป้อนสารถูกเพิ่มความดันด้วยแก๊สไนโตรเจน จากนั้นเปิดวาล์วน้ำหล่อเย็นมอเตอร์ใบกวนของเครื่องปฏิกรณ์ เปิดสวิตช์เครื่องให้ความร้อนและมอเตอร์ใบกวน ความเร็วรอบในช่วงเริ่มต้นยังมีค่าไม่สูงมากนัก เมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่ต้องการทำการทดลอง จะเปิดวาล์วของถังป้อนสาร กลีเซอรอลจะถูกดันออกจากถังป้อนสารด้วยแก๊สไนโตรเจนสู่เครื่องปฏิกรณ์ ความดันของเครื่องปฏิกรณ์ช่วงแรกจึงเท่ากับ ความดันของถังป้อนสาร ปรับความเร็วรอบตามค่าที่ต้องการศึกษา เปิดวาล์วแก๊สเล็กน้อยเพื่อนำแก๊สเมทานอลออกจากระบบ การเก็บสารตัวอย่างจะเก็บสารตัวอย่างทางท่อเก็บสารตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.1 ตามเวลาที่ทำการทดลองเป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยมีการเก็บในหลอดทดลอง 3 หลอดต่อการเก็บสารตัวอย่างหนึ่งครั้ง โดยหลอดที่หนึ่งเก็บสารตัวอย่างเพื่อไล่สารที่ค้างอยู่ในท่อเก็บสาร หลอดที่สองเก็บสารตัวอย่างเพื่อนำไปไทเทรตหาปริมาณกลีเซอรอล และหลอดสุดท้ายนำไปวิเคราะห์หาปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์สำหรับปฏิกิริยาเคมีเซอโรไลซิส โดยประกอบด้วย ถังแก๊สไนโตรเจน ถังป้อนสาร เครื่องปฏิกรณ์แบบกะชนิดโลหะสแตนเลส ขนาด 2 ลิตร ชุดควบคุมอุณหภูมิ

3.2.3 การนำสารผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (แก๊สเมทานอล) ออกจากระบบ

ท่อซิลิโคนถูกเชื่อมกับท่อนำแก๊สออกจากระบบของเครื่องปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 3.2 สารผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (แก๊สเมทานอล) ที่เกิดขึ้นในระบบจะถูกควบแน่นโดยชุดทำความเย็น ซึ่งประกอบด้วยแท่งแก้วทำความเย็นโดยมีน้ำหล่อเย็นเป็นสารแลกเปลี่ยนความร้อน และกระบอกวัดปริมาตรเพื่อบอกปริมาณเมทานอลที่ถูกควบแน่น จากนั้นเปิดสวิตช์ปั๊มสุญญากาศ เปิดวาล์วจากชุดสุญญากาศ ดังรูปที่ 3.2 ทำการดึงสารผลิตภัณฑ์ข้างเคียงด้วยอัตราคงที่ผ่านชุดสุญญากาศจนความดันในเครื่องปฏิกรณ์มีค่า 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) จึงปิดสวิตช์ปั๊มสุญญากาศ เพื่อให้ความดันในเครื่องปฏิกรณ์เพียงพอต่อการเก็บสารตัวอย่าง



รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์ในการนำแก๊สเมทานอลออกจากระบบ โดยมีชุดทำความเย็นที่ประกอบด้วยแท่งแก้วทำความเย็น กระบอกวัดปริมาตร และชุดต่อสูญญากาศ

3.3 การวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลในปฏิกิริยาไกลซิโกลิซิสเมทิลปาล์มมิเตต

ในการทำการทดลองวัดปริมาณกลีเซอรอลที่อยู่ในสารตัวอย่าง (เมทิลปาล์มมิเตต โมโนปาล์มมิเตต ไดปาล์มมิเตต และไตรปาล์มมิเตต) สามารถทำได้โดยการวัดปริมาณกลีเซอรอลตามมาตรฐาน BS5711

3.3.1 การเตรียมสารเคมีในการวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอล

3.3.1.1. เตรียมสารละลายซัลฟิวริก ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาณ 100 มิลลิลิตร นำโซเดียมพอร์ไอเดต 60 กรัม ละลายในน้ำ 400 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 60 มิลลิลิตร ลงไปในขวดแก้ว (Flask) ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

3.3.1.2. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.125 โมลาร์

3.3.1.3. เตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอล โดยมีอัตราส่วนเอทิลีนไกลคอลต่อน้ำร้อยละ 50 โดยปริมาตร

3.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลในสารตัวอย่าง

การวัดปริมาณกลีเซอรอลในสารตัวอย่าง สามารถทำได้โดยชั่งสารตัวอย่าง (สารตัวอย่างควรมีปริมาณอยู่ในช่วง 2-3.5 มิลลิลิตร) หลังจากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) 25

มิลลิลิตร ทำการวัดค่า pH โดยถ้าค่า pH น้อยกว่า 8 ให้เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่ถ้ามากกว่า 8 ให้เติมสารละลายซัลฟิวริก ค่า pH สุดท้ายมีค่าประมาณ 8 เติมสารละลายโซเดียมพอร์ไอเดตที่ผสมกรดซัลฟิวริก 25 มิลลิลิตร ปั่นกวนในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที เติมสารละลายเอทิลีนไกลคอล 5 มิลลิลิตร จากนั้นปั่นกวนในที่มืดต่อไปอีก 30 นาที ไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.125 โมลาร์ โดยใช้ฟีนอลเรด (Phenol red) เป็นสารวัดการเปลี่ยนสี (อินดิเคเตอร์) จากสีเหลืองเป็นสีชมพู (pH ในจุดยุติเป็น 8.1) ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากการไทเทรตเป็น ปริมาตรของสารตัวอย่างที่ต้องมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณกลีเซอรอลโดยมวล

3.3.3 การไทเทรตสารเปล่า (Blank test)

การไทเทรตสารเปล่านั้นมีกระบวนการเหมือนกับไทเทรตสารตัวอย่างโดยมีการ เติมน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) 25 มิลลิลิตร โดยไม่เติมสารตัวอย่าง จากนั้นวัดค่า pH โดยถ้าค่า pH น้อยกว่า 8 ให้เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่ถ้ามากกว่า 8 ให้เติมสารละลายซัลฟิวริก ค่า pH สุดท้ายมีค่าประมาณ 8 เติมสารละลายโซเดียมพอร์ไอเดตที่ผสมกรดซัลฟิวริก 25 มิลลิลิตร ปั่นกวนในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที เติมสารละลายเอทิลีนไกลคอล 5 มิลลิลิตร จากนั้นปั่นกวนในที่มืดต่อไปอีก 30 นาที ไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.125 โมลาร์ ใช้ฟีนอลเรด (Phenol red) เป็นสารวัดการเปลี่ยนสี (อินดิเคเตอร์) จากสีเหลืองเป็นสีชมพู (pH ในจุดยุติเป็น 8.1) โดยปริมาตรที่ได้เป็นปริมาตรของสารเปล่าที่ต้องมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณกลีเซอรอลโดยมวล

สูตรการคำนวณเปอร์เซ็นต์ของกลีเซอรอลโดยมวล

$$\text{เปอร์เซ็นต์กลีเซอรอลโดยมวล} = 1.151(V \text{ สารตัวอย่าง} - V \text{ สารเปล่า}) / \text{ปริมาณสารตัวอย่าง}$$

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณโมโนปาล์มมิติน ไดปาล์มมิติน และไตรปาล์มมิติน

การวิเคราะห์ปริมาณโมโนปาล์มมิติน ไดปาล์มมิติน และ ไตรปาล์มมิติน จะทำตามมาตรฐานการวัดสารผสมกลีเซอไรด์ EN14105 เป็นหลัก

3.4.1 การเตรียมสารมาตรฐานในการวัด โมโนปาล์มมิติน ไดปาล์มมิติน และ ไตรปาล์มมิติน ในการเตรียมสารมาตรฐาน จะใช้สารกลีเซอรอลโมนานาโนเดคาโนเอต (Mono C19) กลีเซอรอลไดนาโนเดคาโนเอต (Di C38) และกลีเซอรอลไตรนาโนเดคาโนเอต (Tri C57) เป็นสารมาตรฐานในการเปรียบเทียบวัดปริมาณโมโนปาล์มมิติน ไดปาล์มมิติน และ ไตรปาล์มมิตินโดยซึ่งสารมาตรฐาน ชนิด

ละ 50 มิลลิกรัม ปรับปริมาตรด้วยเตตระไฮโดรฟูแลน (Tetrahydrofuran; THF) จนมีปริมาตร 20 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน (ควรเก็บสารตัวอย่างในอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส)

3.4.2 การเตรียมสารโมนอกลิเซอไรด์ตัวอย่างที่รู้ชนิดแน่นอน (โมนوپาล์มมิติน โมนอสเตียร์น โมนโอลีน)

การเตรียมสารโมนอกลิเซอไรด์ตัวอย่างที่รู้ชนิดแน่นอน เพื่อระบุตำแหน่งตามเวลาของกราฟ ในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยซึ่งสารผสมของโมนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และ ไตรกลีเซอไรด์ 100 มิลลิกรัม ปรับปริมาตรด้วยไพริดีน (Pyridine) จนมีปริมาตร 10 มิลลิลิตร

3.4.3 การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อทำการวัดปริมาณด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ซึ่งสารตัวอย่าง 50 มิลลิกรัม จากนั้นเติมตัวทำละลายไอโซโพรพานอล (Isopropanol) และ เฮกเซน (n-Hexane) อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน เติมสารมาตรฐานในการเปรียบเทียบวัดปริมาณโมนوپาล์มมิติน ไดปาล์มมิติน และ ไตรปาล์มมิติน 200 ไมโครลิตร เติมสารช่วยการระเหย (derivatizing reagent) MSTFA ปริมาณ 200 ไมโครลิตร ปิดฝา เขย่าตั้งทิ้งไว้ 15 นาที ภายในอุณหภูมิห้อง เตรียมขวดสารตัวอย่างสำหรับวัดปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

3.4.4 การวิเคราะห์ปริมาณสารโมนوپาล์มมิติน ไดปาล์มมิติน และ ไตรปาล์มมิตินด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

การวัดปริมาณโมนوپาล์มมิติน ไดปาล์มมิติน และ ไตรปาล์มมิติน สามารถวัดปริมาณได้โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีอุณหภูมิสูง คอลัมน์ 95% dimethyl- 5% diphenylpolysiloxane เป็นสารเคลือบอยู่ในคอลัมน์เพื่อให้เกิดการแยกของสารตัวอย่าง ความยาวคอลัมน์ 15 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.32 มิลลิเมตร ความหนาของชั้นสารที่เคลือบ 0.1 ไมโครเมตร โดยสามารถใช้งานในสภาวะที่อุณหภูมิสูงสุด 400 องศาเซลเซียส โดยมีเครื่องตรวจวัดสารตัวอย่าง (detector) แบบการวัดปริมาณไอออนที่เกิดจากการเผา (Flame Ionization detection) เผาสารที่ต้องการตรวจวัดที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส โดยมีแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สพาหะ ปริมาตรในการฉีดสารตัวอย่างหนึ่งครั้งเท่ากับ 1 ไมโครลิตร อุณหภูมิในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีเป็นดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอุณหภูมิและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลา ในสภาวะสำหรับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

	อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียสต่อนาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)
จุดเริ่มต้น	-	50	1
1	15	180	-
2	7	230	-
3	10	370	15

3.5 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต

3.5.1 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Mastersizer 2000, Malvern UK)

การวัดขนาดอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านกระบวนการเผา และทำการคัดแยกอนุภาค พบว่ามีขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต 400 – 1000 ไมโครเมตร

3.5.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตด้วยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ BEL model BELSORP-mini, Japan

การวัดปริมาณพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตด้วยวิธี BET ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ BEL model BELSORP-mini โดยใช้ไนโตรเจนเป็นสารพาหะในการดูดซับและคายตัว ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตมีพื้นที่ผิว 1.79 ตารางเมตรต่อกรัม และไม่มีการปนเปื้อนในโมเลกุล

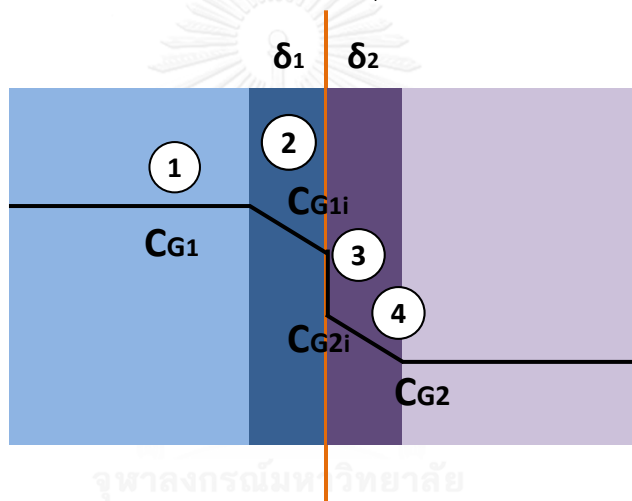
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต

4.1.1 ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous catalyst) ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของสารตั้งต้นสองชนิด เพราะเป็นจุดที่สารตั้งต้นสองชนิดสัมผัสกันครั้งแรก



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์

โดย G คือกลีเซอรอล, i คือความเข้มข้นเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล

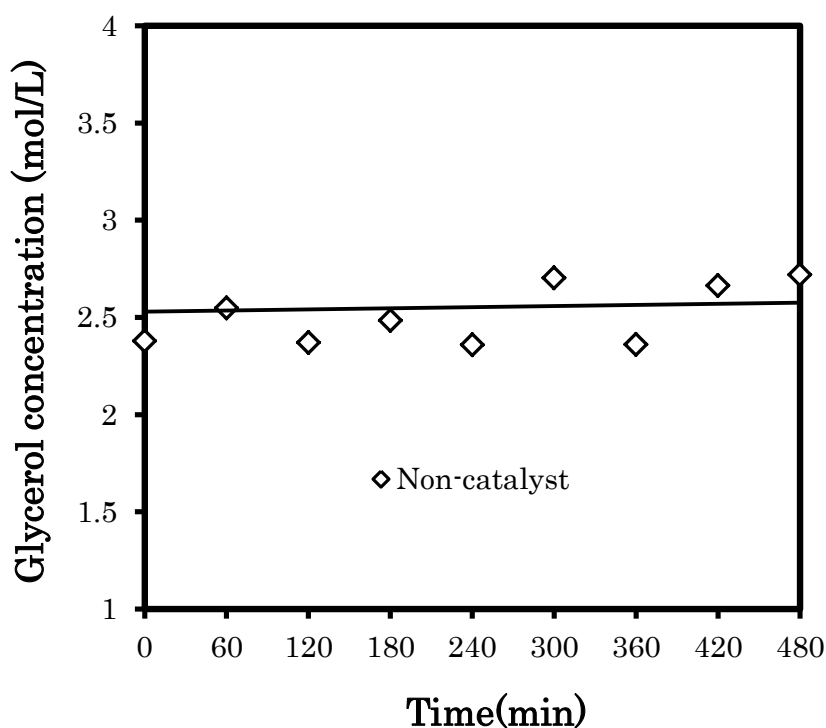
เลขห้อย 1,2 คือความเข้มข้นในวัฏภาคกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมิเตต ตามลำดับ

δ_1 และ δ_2 แทนระยะห่างของชั้นฟิล์มของวัฏภาคกลีเซอรอลและวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตตตามลำดับ

กลไกการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตมีสมมติฐานจากงานวิจัยของ Negi Devender และคณะ [2] ในตารางที่ 2.5 ในหัวข้อ 2.4 โดยไม่พบเมทิลโอเลอเตในวัฏภาคของกลีเซอรอล และไม่พบผลิตภัณฑ์ในวัฏภาคของกลีเซอรอล ดังนั้นในปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต กลีเซอรอลเป็นสารที่ละลายเข้าไปในวัฏภาคของเมทิลปาล์มมิเตต และวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตต

เป็นวัฏภาคในการเกิดปฏิกิริยา โดยมีลักษณะการเกิดปฏิกิริยา ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้

- 4.1.1.1. กลีเซอรอลละลายเข้ามาในชั้นฟิล์มด้านกลีเซอรอล
- 4.1.1.2. โมเลกุลกลีเซอรอลเคลื่อนที่ด้วยวิธีการแพร่ในชั้นฟิล์มด้านกลีเซอรอล
- 4.1.1.3. เกิดสมดุลของโมเลกุลกลีเซอรอลระหว่างวัฏภาคกลีเซอรอลและวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตต เกิดการสัมผัสของกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมิเตต เกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตขึ้น
- 4.1.1.4. โมเลกุลกลีเซอรอลเคลื่อนที่ด้วยวิธีการแพร่ในชั้นฟิล์มด้านเมทิลปาล์มมิเตต



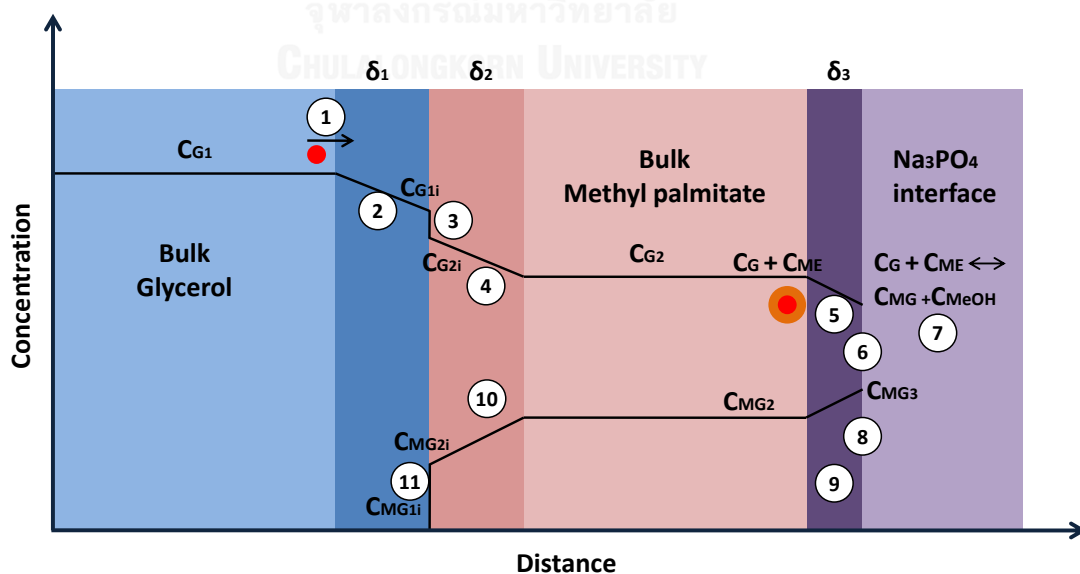
รูปที่ 4.2 แสดงความเข้มข้นของกลีเซอรอลตามเวลา ในการทดลองไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที

จากการทดลองในรูปที่ 4.2 พบว่าความเข้มข้นของกลีเซอรอลในเครื่องปฏิกรณ์แต่ละเวลาไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีความเข้มข้นของกลีเซอรอลเฉลี่ยอยู่ที่ 2.5 โมลต่อลิตร แตกต่างจากความเข้มข้นของกลีเซอรอลเริ่มต้น ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ที่ 2.67 โมลต่อลิตร อยู่ร้อยละ 5.7 โดยมวล ซึ่งเป็นค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

เนื่องจากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จากการคำนวณจาก Aspen simulation โดยคำนวณจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาในหัวข้อ 2.4.1 (การแสดงผลการคำนวณในภาคผนวก จ.1) ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส โดยเกิดผลิตภัณฑ์ไดโอลลีนมากที่สุด ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของไดโอลลีนเมื่อสภาวะสมดุลมีค่ามากที่สุด (การคำนวณจะใช้เมทิลโอเลตในการคำนวณแทนเมทิลปาล์มมิเตต เนื่องจากเป็นสารที่มีอยู่ในโปรแกรมและคุณสมบัติไม่ต่างกันมากนัก) ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดไดโอลลีนต้องเกิดโมโนโอลลีนตามกลไกการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนแรกก่อน ทำให้ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่ทำการทดลอง แต่จากการทดลองไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่พบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกลีเซอรอลตามเวลา ดังรูปที่ 4.2 จึงสรุปได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของโมโนปาล์มมิเตตยังมีค่าไม่มากพอที่ทำให้ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตเกิดขึ้นในระยะเวลาในการทดลองคือ 8 ชั่วโมง กลีเซอรอลซึ่งเป็นสารตั้งต้นจึงไม่ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาอย่างมีนัยสำคัญ ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงจำเป็นต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตเพื่อให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่ามากพอที่ทำให้ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเกิดในระยะเวลาที่ทำการทดลอง

4.1.2 ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต

ปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalyst) จะเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีลักษณะการเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต

G, ME, MG และ MeOH คือกลีเซอรอล, เมทิลปาล์มมิเตต, โมโนปาล์มมิเตตและเมทานอลตามลำดับ

i คือความเข้มข้นเมื่ออยู่ในสถานะสมดุล

เลขห้อย 1,2 คือความเข้มข้นในวัฏภาคกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมิเตต ตามลำดับ

δ_1 , δ_2 และ δ_3 แทนระยะห่างของชั้นฟิล์มของวัฏภาคกลีเซอรอล วัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตต และระหว่างวัฏภาคกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมิเตต ตามลำดับ

กลไกการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตมีสมมติฐานจากงานวิจัยของ Negi Devender และคณะ [2] ในตารางที่ 2.5 ในหัวข้อ 2.4 ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1 ซึ่งมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

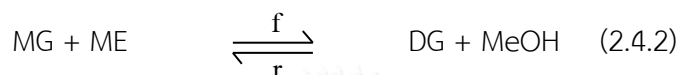
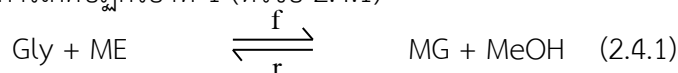
- 4.1.2.1 กลีเซอรอลละลายในชั้นฟิล์มในวัฏภาคกลีเซอรอล
- 4.1.2.2 กลีเซอรอลเคลื่อนที่ในชั้นฟิล์มในวัฏภาคกลีเซอรอลด้วยวิธีการแพร่
- 4.1.2.3 ความเข้มข้นของกลีเซอรอลสมดุลในวัฏภาคของเมทิลปาล์มมิเตต
- 4.1.2.4 กลีเซอรอลเคลื่อนที่ในชั้นฟิล์มของวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตตด้วยวิธีการแพร่
- 4.1.2.5 กลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมิเตตเคลื่อนที่ในชั้นฟิล์มของวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตตและผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต
- 4.1.2.6 สารตั้งต้นทั้งสองชนิดถูกดูดซับของลงบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต
- 4.1.2.7 เกิดพันธะเคมีปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต
- 4.1.2.8 การคายตัวของผลิตภัณฑ์ออกจากผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต
- 4.1.2.9 การเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์ในชั้นฟิล์มของเมทิลปาล์มมิเตตและผิวของโซเดียมฟอสเฟตด้วยการแพร่
- 4.1.2.10 ผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ในชั้นฟิล์มของวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตต
- 4.1.2.11 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์สมดุลในวัฏภาคกลีเซอรอล

4.1.3 การศึกษาแบบจำลองทางจลนศาสตร์ที่เหมาะสมกับปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตด

จากการศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตดพบว่ามีแบบจำลองทางจลนศาสตร์ 2 แบบจำลอง ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4

4.1.3.1 แบบจำลองจลนศาสตร์ของ H. Nouredini [15]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ 1 (หัวข้อ 2.4.1)



กลไกในการเกิดปฏิกิริยาโดยอ้างอิงจากขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของ H. Nouredini และคณะ [15]

นิยามอัตราการเกิดปฏิกิริยา

$$-r_A = -\frac{1}{V} \frac{dN_A}{dt} = kC_A, \left[\frac{\text{mol}}{\text{dm}^3 \cdot \text{min}} \right] \quad (4.1)$$

$$-r'_A = -\frac{1}{W} \frac{dN_A}{dt} = k'C_A, \left[\frac{\text{mol}}{\text{g cat} \cdot \text{min}} \right] \quad (4.2)$$

โดยที่ r_A คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่คำนวณเทียบกับปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์

r'_A คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่คำนวณเทียบกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

V และ W คือ ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ

k และ k' คือค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่คำนวณเทียบกับปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และเทียบกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ

N_A และ C_A คือปริมาณของสาร A โดยโมลและความเข้มข้นของสาร A (โมลต่อลิตร) ตามลำดับ

t คือเวลา (นาที)

สมการสมดุลมวล (Mass balance) ของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะของกลไกการเกิดปฏิกิริยาในหัวข้อ 2.4.1 โดยนิยามอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ดังสมการที่ 4.2) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{ME}}{dt} = -k_{1f}C_G C_{ME} + k_{1r}C_{MG} C_{MeOH} - k_{3f}C_{DG} C_{ME} + k_{3r}C_{TG} C_{MeOH} \quad (2.5.1)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{MG}}{dt} = k_{1f}C_G C_{ME} - k_{1r}C_{MG} C_{MeOH} - k_{2f}C_{MG} C_{ME} + k_{2r}C_{DG} C_{MeOH} \quad (2.5.2)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{DG}}{dt} = k_{2f}C_{MG} C_{ME} - k_{2r}C_{DG} C_{MeOH} - k_{3f}C_{DG} C_{ME} + k_{3r}C_{TG} C_{MeOH} \quad (2.5.3)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{TG}}{dt} = k_{3f}C_{DG} C_{ME} - k_{3r}C_{TG} C_{MeOH} \quad (2.5.4)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_G}{dt} = -k_{1f}C_G C_{ME} - k_{1r}C_{MG} C_{MeOH} \quad (2.5.5)$$

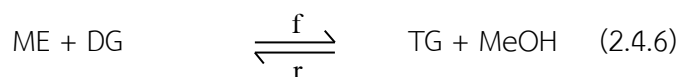
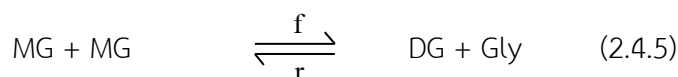
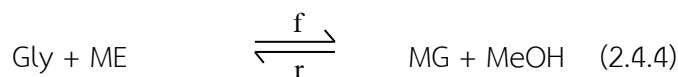
$$\begin{aligned} \frac{1}{W} \frac{dN_{MeOH}}{dt} = & k_{1f}C_G C_{ME} - k_{1r}C_{MG} C_{MeOH} + k_{2f}C_{MG} C_{ME} - k_{2r}C_{DG} C_{MeOH} + \\ & k_{3f}C_{DG} C_{ME} - k_{3r}C_{TG} C_{MeOH} \end{aligned} \quad (2.5.6)$$

โดยค่า k_1 , k_2 และ k_3 แทนค่าคงที่ของปฏิกิริยาในสมการที่ 2.4.1-2.4.3 เลขห้อย (subscript) f และ r แทนปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับตามลำดับ จากสมการที่ 2.5.1 ถึง 2.5.6 ในหัวข้อที่ 2.5.1 สามารถหาค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาด้วยการคำนวณจากโปรแกรม solver ของ Microsoft excel (ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ฉ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.3.2 แบบจำลองจลนศาสตร์ของ Negi Devender [2]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ 2 (หัวข้อ 2.4.2)



กลไกในการเกิดปฏิกิริยาโดยอ้างอิงจากขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของ Negi Devender และคณะ [2]

สมการสมดุลมวล (Mass balance) ของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะของกลไกการเกิดปฏิกิริยาในหัวข้อ 2.4.2 โดยนิยามอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ดังสมการที่ 4.5) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{ME}}{dt} = -k_{1f}C_G C_{ME} + k_{1r}C_{MG} C_{MeOH} - k_{3f}C_{DG} C_{ME} + k_{3r}C_{TG} C_{MeOH} \quad (2.5.7)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{MG}}{dt} = k_{1f}C_G C_{ME} - k_{1r}C_{MG} C_{MeOH} - 2k_{2f}C_{MG}^2 + k_{2r}C_{DG} C_G \quad (2.5.8)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{DG}}{dt} = k_{2f}C_{MG}^2 - k_{2r}C_{DG} C_G - k_{3f}C_{DG} C_{ME} + k_{3r}C_{TG} C_{MeOH} \quad (2.5.9)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{TG}}{dt} = k_{3f}C_{DG} C_{ME} - k_{3r}C_{TG} C_{MeOH} \quad (2.5.10)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_G}{dt} = -k_{1f}C_G C_{ME} + k_{1r}C_{MG} C_{MeOH} + 2k_{2f}C_{MG}^2 - k_{2r}C_{DG} C_G \quad (2.5.11)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{MeOH}}{dt} = k_{1f}C_G C_{ME} - k_{1r}C_{MG} C_{MeOH} + k_{3f}C_{DG} C_{ME} - k_{3r}C_{TG} C_{MeOH} \quad (2.5.12)$$

โดยค่า k_1 , k_2 และ k_3 แทนค่าคงที่ของปฏิกิริยาในสมการที่ 2.4.4-2.4.6 เลขห้อย (subscript) f และ r แทนปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับตามลำดับ

จากสมการที่ 2.5.7 ถึง 2.5.12 ไม่สามารถหาค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สอดคล้องกับผลการทดลองด้วยการคำนวณจากโปรแกรม solver ของ Microsoft excel และพบว่าจากสมการที่ 2.5.1 ถึง 2.5.6 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม solver ของ Microsoft excel ในแบบจำลองของ H. Nouredini [15] สอดคล้องกับผลการทดลอง จึงใช้แบบจำลองของ H. Nouredini [15] ในการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาไกลซีเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตในหัวข้อถัดไป การคำนวณแสดงในภาคผนวก ฉ.

4.1.4 ปฏิกิริยาไกลซีเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตโดยการคำนวณจากโปรแกรม Aspen simulation ด้วยวิธีการคำนวณด้วยพลังงานอิสระกิบส์ต่ำสุด (minimization of Gibbs free energy)

เมื่อคำนวณค่าคงที่ในสภาวะสมดุลของแบบจำลองจลนศาสตร์ของ H. Nouredini [15] (ในหัวข้อ 4.1.3.1) ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ความดันเกจ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยป้อนกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมิเตต 1 โมล ในเครื่องปฏิกรณ์สภาวะสมดุล (R-equilibrium) การคำนวณแสดงในภาคผนวก ฉ.1 พบว่าค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะสมดุล K_1 ค่าคงที่ของอัตราการเกิดโมโนโอเลอินมีค่าเท่ากับ 4.27×10^{-11} (การคำนวณจะใช้เมทิลโอลีเอตในการคำนวณแทนเมทิลปาล์มมิเตต เนื่องจากเป็นสารที่มีอยู่ในโปรแกรมและคุณสมบัติไม่ต่างกันมากนัก), K_2 ค่าคงที่

ของของอัตราการเกิดไดโอะเลอินมีค่าเท่ากับ 2.23×10^8 และ K_3 ค่าคงที่ของอัตราการเกิดไตรโอะเลอินมีค่าเท่ากับ 0.17 และพบปริมาณโมนโอะเลอิน ไดโอะเลอินและไตรโอะเลอิน ในสภาวะสมดุล 1.02×10^{-12} , 0.49 และ 9.67×10^{-12} โมลตามลำดับ

ในกระบวนการคิดของโปรแกรม Aspen simulation จะทำการคำนวณสมการพร้อมกันทั้งสามสมการ (สมการที่ 2.4.1 ถึง สมการที่ 2.4.3) โดยปฏิกิริยาที่มีค่าพลังงานอิสระกิบส์น้อยที่สุด ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะสมดุลจะมีค่ามากที่สุด จากการคำนวณทำให้ทราบว่าปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตดอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของโมนโอะปาล์มมิเตดมีค่าสูง เนื่องจากมีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะสมดุลต่ำ โปรแกรมจะคิดเสมือนว่าสารทุกตัวในระบบเป็นเนื้อเดียวกัน ในสภาวะที่ไม่มีการนำเมทานอลออกจากระบบ เมื่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตดเกิดขึ้นปฏิกิริยาจะย้อนกลับทันที โมนโอะปาล์มมิเตดที่เกิดขึ้นในปริมาณน้อยเมื่อพบกับเมทิลปาล์มมิเตดในปริมาณมากจึงเกิดไดปาล์มมิเตดซึ่งเป็นเส้นทางที่มีพลังงานอิสระกิบส์ต่ำกว่า ทำให้ที่สภาวะสมดุลไม่พบโมนโอะปาล์มมิเตดอยู่เลย

แต่เมื่อจำลองสมการที่ 2.4.1 ในสภาวะที่ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส และเพิ่มสมการการใช้เมทานอล (ใช้สมการการเผาไหม้ในการคำนวณ) เพื่อเป็นการเลื่อนสภาวะสมดุลให้ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตด พบว่ามีปริมาณโมนโอะปาล์มมิเตดมากขึ้นคือ 0.66 โมล แสดงว่าปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตดที่มีการเลื่อนสมดุลโดยการนำเมทานอลออกจากระบบจะทำให้พบปริมาณโมนโอะปาล์มมิเตดที่สภาวะสมดุลได้ ดังการคำนวณในภาคผนวก จ

4.2 ผลกระทบของการนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (ไอเมทานอล) ออกจากระบบในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตด

เมทานอลเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตด จากกลไกการเกิดปฏิกิริยา 2.4.1 เมทานอลเกิดในทุกขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา ทั้งโมนโอะปาล์มมิเตด ไดปาล์มมิเตด และไตรปาล์มมิเตด ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตดเกิดในวัฏภาคของเหลวของเมทิลปาล์มมิเตด ดังนั้นเมทานอลเกิดขึ้นในวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตด เมื่อเมทานอลถูกแยกออกจากวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตดทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น ขั้นตอนการนำเมทานอลออกจากระบบอธิบายในหัวข้อ 3.2.3

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากการศึกษาผลกระทบของการนำไอเมทานอลออกจากระบบ ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมีเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมีเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที

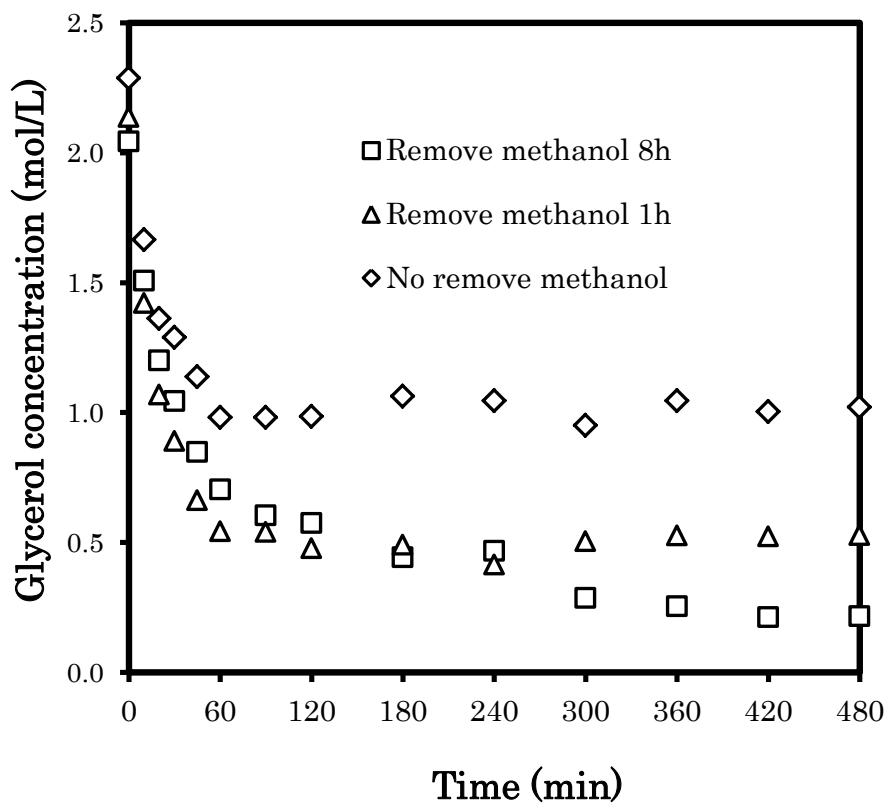
ค่าคงที่ของอัตรา การเกิดปฏิกิริยา (10^2)	การทดลองที่ไม่นำ เมทานอลออกจาก ระบบ	การทดลองที่นำ เมทานอลออก จากระบบ 1 ชั่วโมง	การทดลองที่นำเม ทานอลออกจาก ระบบ 8 ชั่วโมง
k_{1f}	6.76	9.58	6.35
k_{1r}	1.04	0.91	0.66
k_{2f}	0.83	1.86	0.57
k_{2r}	1.81	3.83	1.19
k_{3f}	0.37	0.93	0.36
k_{3r}	1.67	4.83	1.39

(ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยามีหน่วยคือลิตรกำลังสองต่อโมลต่อนาทีต่อกรัมของตัวเร่งปฏิกิริยา)

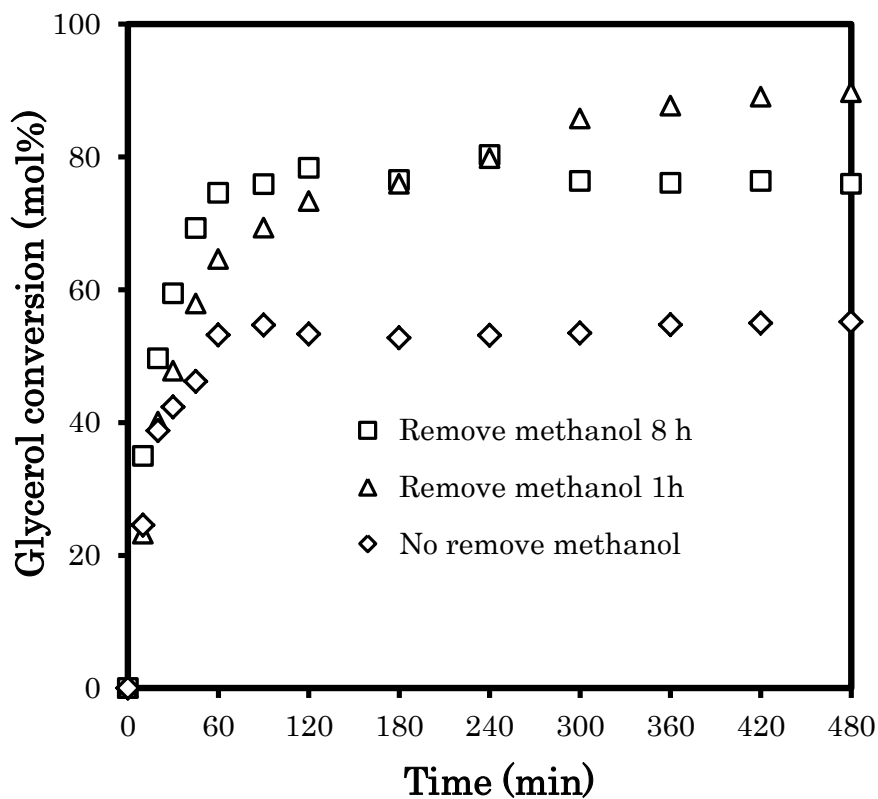
4.2.1 ผลกระทบของการนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (ไอเมทานอล) ออกจากระบบ ในอิมัลชันประเภทกลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมีเตต

4.2.1.1 ผลกระทบของการไม่นำผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (ไอเมทานอล) ออกจากระบบ ในอิมัลชันประเภทกลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมีเตต

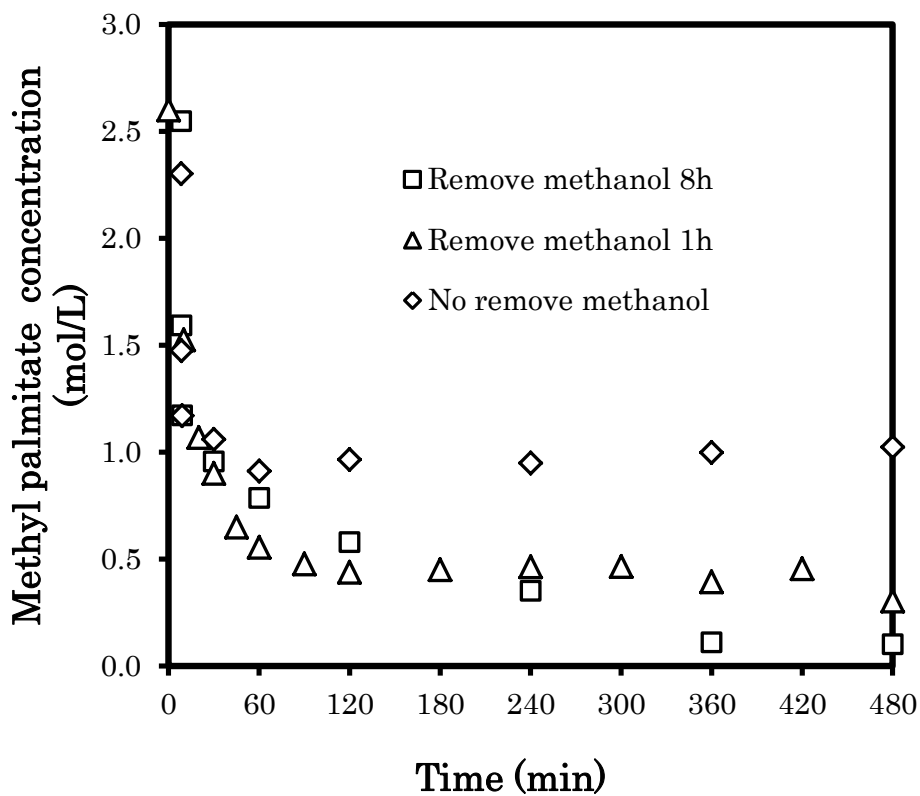
จากการศึกษาผลกระทบของการไม่นำเมทานอลออกจากระบบ ในอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมีเตต 1:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมีเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมีเตต 1:1 โดยโมล ระบบมีลักษณะเป็นอิมัลชันแบบกลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมีเตต วัฏภาคของเหลวเมทิลปาล์มมีเตตที่มีปริมาณมากกว่าล้อมรอบวัฏภาคของกลีเซอรอล โดยมีผลการทดลองดังนี้



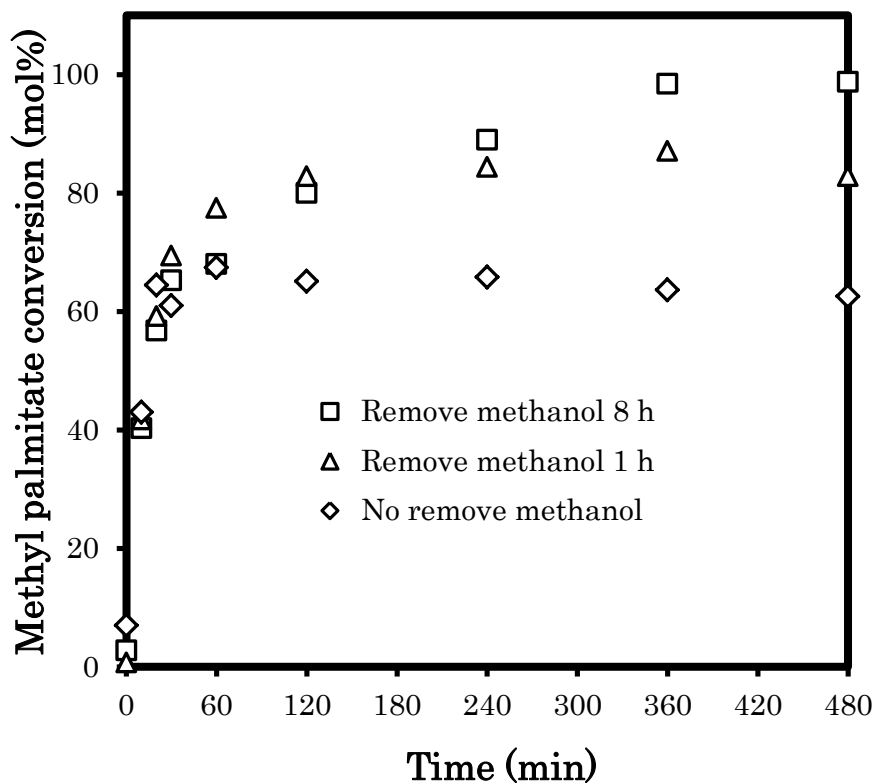
รูปที่ 4.4 แสดงความเข้มข้นของกลีเซอรอลในปฏิกิริยากลิเซโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตด จากการศึกษาการนำเมทานอลออกจากระบบและไม่นำออกจากระบบ ในอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.5 แสดงค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการศึกษานำเมทานอลออกจากระบบและไม่นำออกจากระบบ ในอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที



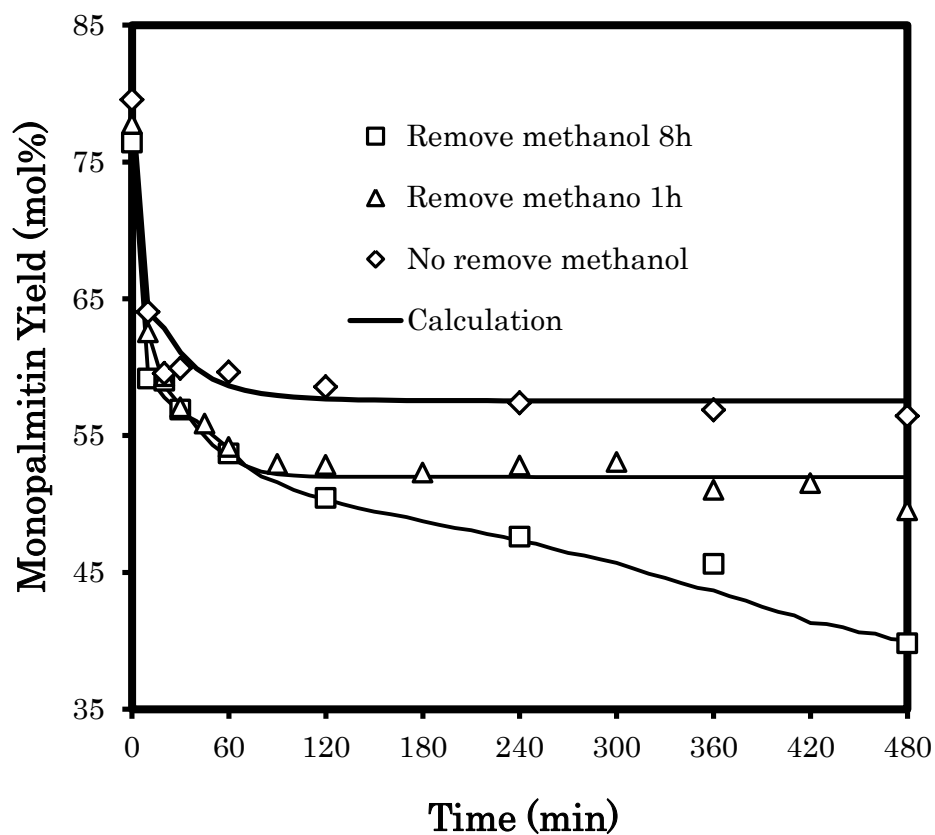
รูปที่ 4.6 แสดงความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมิเตต ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการศึกษาการนำเมทานอลออกจากระบบและไม่นำออกจากระบบ อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที



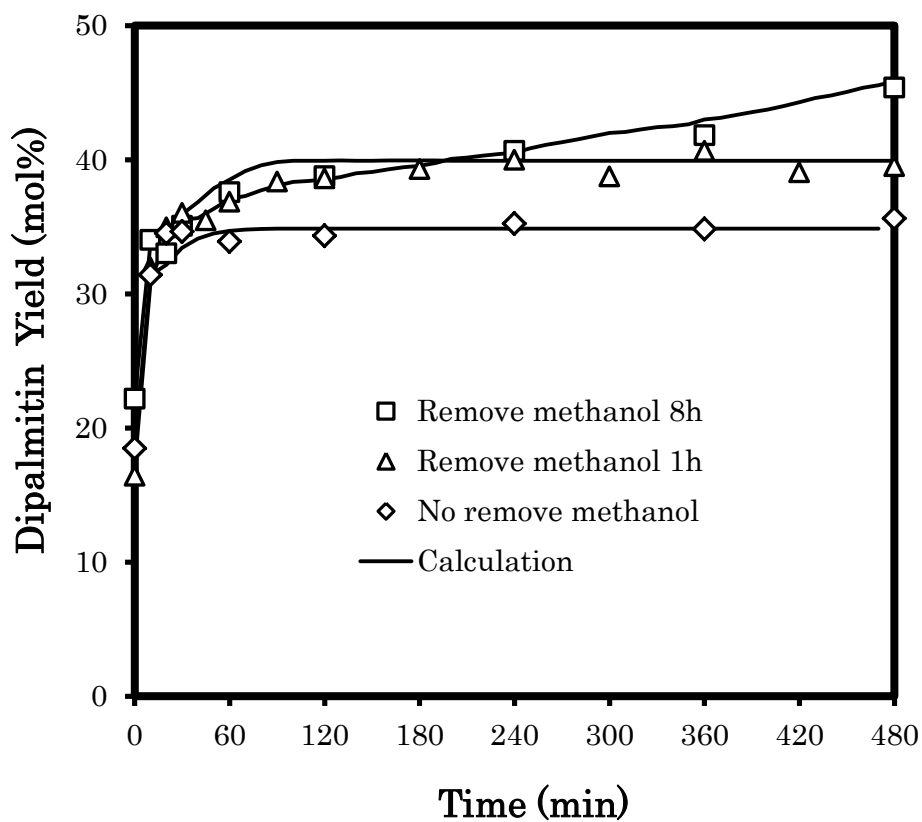
รูปที่ 4.7 แสดงค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตดโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตด จากการศึกษาการนำเมทานอลออกจากระบบและไม่นำออกจากระบบ อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที

จากการคำนวณปริมาณเมทานอลในวัฏภาคของเหลวและวัฏภาคแก๊ส ด้วยโปรแกรม Aspen simulation ในภาคผนวก จ.2 พบว่าการทดลองที่ไม่มีการนำเมทานอลออกจากระบบที่ความดันแกว 380 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไม่มีเมทานอลระเหยกลายเป็นไอในระบบ เมทานอลอยู่ในวัฏภาคของเหลวทั้งหมด จากการศึกษาในหัวข้อ 4.1.4 เมื่อเมทานอลอยู่ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตดจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับอย่างรวดเร็ว แต่การทดลองที่ไม่มีการนำเมทานอลออกจากระบบ ยังเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตดและพบปริมาณโมโนปาล์มมิตินมากที่สุด (เมื่อเปรียบเทียบค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ในรูป 4.8 ถึง 4.10) เนื่องจากเมทานอลในวัฏภาคของเหลวถูกแยกออกจากวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตดด้วยวัฏภาคกลีเซอรอล เนื่องจากเมทานอลละลายเป็นเนื้อเดียวกับกลีเซอรอลได้ดีกว่าเมทิลปาล์มมิเตด ดังเส้น tie line ของเฟสไดอะแกรมสำหรับระบบที่มีสามองค์ประกอบ (Ternary phase diagram) ดังรูปที่ 2.24 (จากการศึกษางานวิจัยใช้เมทิลโอเลอิตเป็นสารตั้งต้น แต่คุณสมบัติไม่ต่างจากเมทิลปาล์มมิเตดที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในงานวิจัยนี้มากนัก)

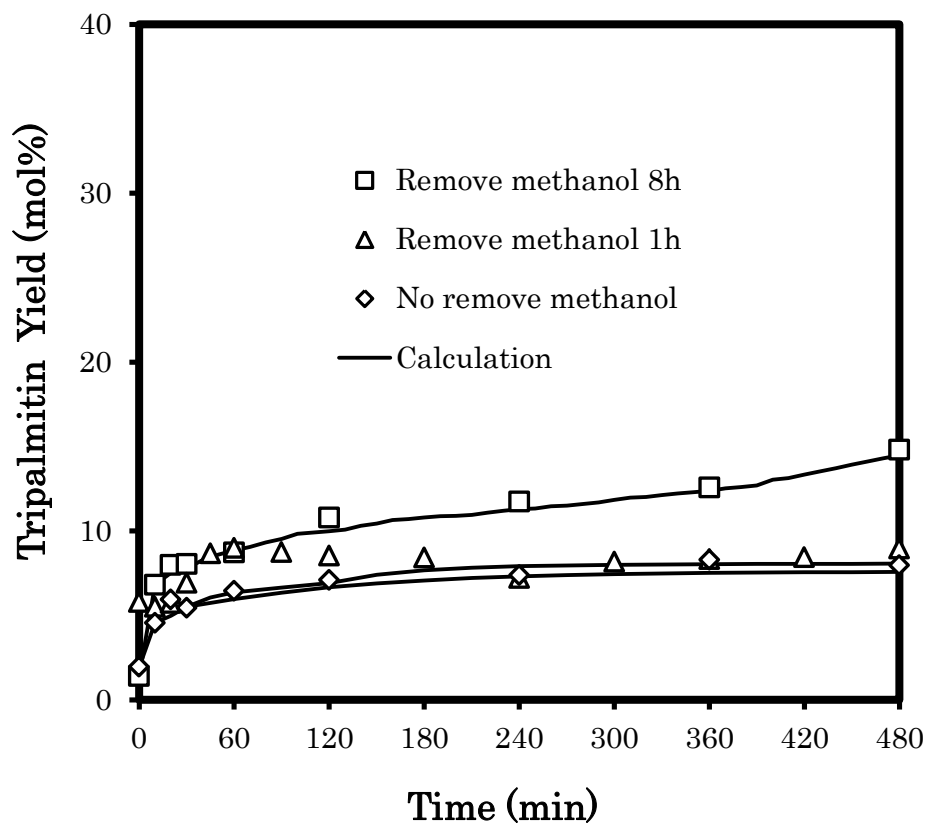
เมื่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตเกิดขึ้น เมทานอลถูกแยกออกจากวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตตด้วยกลีเซอรอล อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับจึงมีค่าไม่สูงนัก เมื่อโมโนปาล์มมิเตตเกิดขึ้นทำให้กลีเซอรอลอยู่ในวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตตมากขึ้น (Negi Devender และคณะ [2] ในตารางที่ 2.5 ในหัวข้อ 2.4) โมโนปาล์มมิเตตและกลีเซอรอลจะแข่งขันกันเกิดปฏิกิริยากับเมทิลปาล์มมิเตตตามกลไกการเกิดปฏิกิริยาในหัวข้อ 2.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีผลต่อปฏิกิริยา เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตมีความเลือกเกิดต่อโมโนปาล์มมิเตตมากกว่าไดปาล์มมิเตต (อธิบายในหัวข้อ 4.6 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา) ทำให้อัตราการใช้ไปของกลีเซอรอลกับเมทิลปาล์มมิเตตมากกว่าอัตราการการใช้ไปของโมโนปาล์มมิเตตกับเมทิลปาล์มมิเตต สังเกตจากค่า k_{1f} มีค่ามากกว่า k_{2f} ดังตารางที่ 4.1 ปริมาณโมโนปาล์มมิเตตมีค่าสูงขึ้น เมื่อกลีเซอรอลปริมาณลดลงเนื่องจากถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้เมทานอลในวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตตมีปริมาณมากขึ้น เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของโมโนปาล์มมิเตตและเมทานอล ทำให้พบปริมาณเมทิลปาล์มมิเตตและกลีเซอรอลมากขึ้น ดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.6 พบความเข้มข้นของกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมิเตตในสถานะสมดุลมากกว่าการนำเมทานอลออกจากระบบ ค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมิเตตมีค่าน้อยกว่าการนำเมทานอลออกจากระบบดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ในระบบยังคงมีความเข้มข้นของกลีเซอรอลเหลืออยู่ (ปริมาณกลีเซอรอลที่เหลืออยู่ร้อยละ 10 โดยมวลของสารทั้งหมดในระบบ) ทำให้เมทานอลยังถูกแยกออกจากวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตตบางส่วน โมโนปาล์มมิเตตจึงไม่เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับจนถูกใช้จนหมด เมื่อความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมิเตตและเมทานอลมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้าหรือย้อนกลับอีก (อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับมีค่าใกล้เคียงกัน) ปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะสมดุล ในสภาวะสมดุลนี้จึงพบปริมาณโมโนปาล์มมิเตตมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ในรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.8 แสดงค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิตินในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตโดย โม่ล จากการศึกษการนำเมทานอลออกจากระบบและไม่นำออกจากระบบ อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อ เมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโม่ล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต ร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที



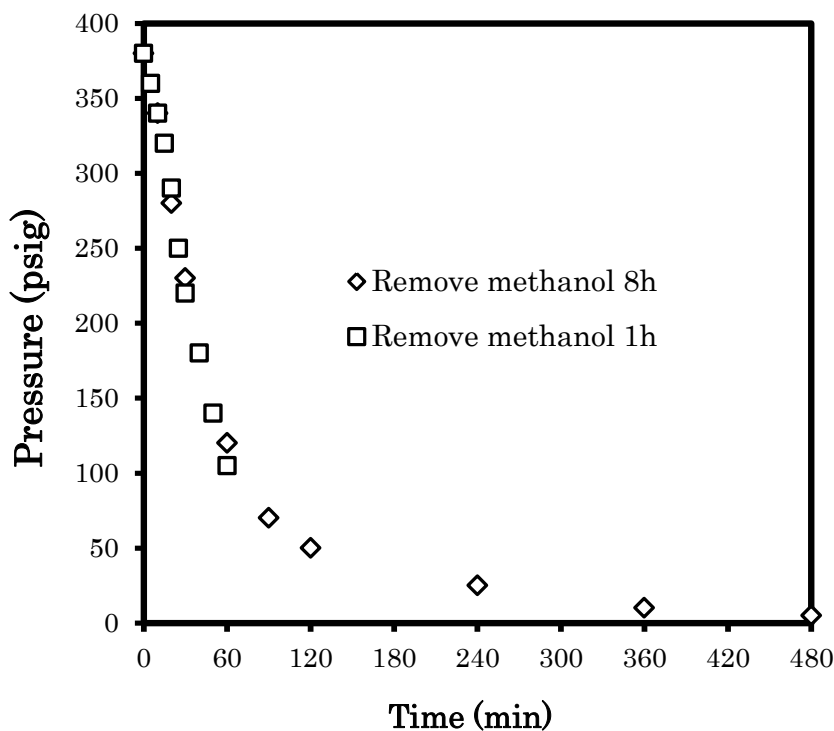
รูปที่ 4.9 แสดงค่าผลได้ของไดปาล์มิตินในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มิตेटโดยโมลจากการศึกษาการนำเมทานอลออกจากระบบและไม่นำออกจากระบบ อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มิตेट 1:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มิตेट ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.10 แสดงค่าผลได้ของไตรปาล์มมิตินในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตดโดยโมล จากการศึกษากำหนดนำเมทานอลออกจากระบบและไม่นำออกจากระบบ อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที

เมื่อพิจารณาค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นพบว่า การทดลองที่ไม่นำเมทานอลออกจากระบบ ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิตินมีค่าสูงที่สุดเนื่องจาก ปริมาณเมทานอลในวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตดมากกว่าการนำเมทานอลออกจากระบบ อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับมีค่ามากขึ้น ทำให้เมทิลปาล์มมิเตดถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาในปริมาณต่ำ อัตราการเกิดปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามีค่าไม่มากนัก (เมทิลปาล์มมิเตดเป็นสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบแข่งขัน; consecutive reaction) อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตมีความเลือกเกิดต่อโมโนปาล์มมิติน ทำให้ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิตินมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการนำเมทานอลออกจากระบบ ดังรูปที่ 4.8 และค่าผลได้ของไดปาล์มมิตินมีค่าต่ำสุดคล้องกับค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิติน ดังรูปที่ 4.9 ค่าผลได้ไตรปาล์มมิตินมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ การนำเมทานอลออกจากระบบ 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.10

4.2.1.2 ผลกระทบของการนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (ไอเมทานอล) ออกจากระบบ ในอิมัลชันประเภท ก्लीเซอร์อลในเมทิลปาล์มมีเตท เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.11 แสดงความดันเกจในระบบที่ลดลงในแต่ละเวลาจากการทำงานของปั๊มสุญญากาศ ในการทดลองนำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และการทดลองนำเมทานอลออกจาก ระบบเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

เมื่อมีการนำเมทานอลออกจากระบบด้วยปั๊มสุญญากาศทำให้ความดันในระบบลดลง เมทานอลระเหยเป็นไอน้ำมากขึ้น โดยจากการทดลองที่ผ่านมาทุกๆการทดลอง ความดันเกจในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าคงที่ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เพื่อเป็นความดันที่มากพอในการเก็บสารตัวอย่างจากท่อเก็บสารตัวอย่าง การนำเมทานอลออกจากระบบจะเปิดปั๊มสุญญากาศเป็นเวลา 60 นาที ความดันในระบบลดลงเหลือ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ดังรูปที่ 4.11 จากการคำนวณในภาคผนวก จ เมื่อความดันในระบบลดลงเหลือ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีปริมาณเมทานอลในวัฏภาคของเหลวร้อยละ 16.6 โดยโมลของเมทานอลที่เกิดขึ้น

ในช่วงเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาไกลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตท เมทานอลถูกแยกออกจากวัฏภาคเมทิลปาล์มมีเตท เนื่องจากความดันของระบบมีค่าลดลงและยังมีปริมาณกลีเซอร์อลในระบบในปริมาณมาก (เนื่องจากเมทานอลละลายเป็นเนื้อเดียวกับกลีเซอร์อลได้ดีกว่าเมทิลปาล์มมี

เตต) ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาเหมือนกับหัวข้อ 4.2.1.1 เมื่อเวลาผ่านไปกลีเซอรอลมีปริมาณลดลงแต่ความดันในระบบมีค่าลดลงด้วย ทำให้ปริมาณเมทานอลอยู่ในวัฏภาคของเมทิลปาล์มมีเตตมีค่าน้อยกว่าการทดลองที่ไม่นำเมทานอลออกจากระบบ ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น กลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมีเตตถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที ปิดปั๊มสุญญากาศ เมทานอลในวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลวเกิดสภาวะสมดุล ความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมีเตตและเมทานอลมีปริมาณต่ำ ซึ่งทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับมีค่าใกล้เคียงกันเกิดสภาวะสมดุล ความเข้มข้นของกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมีเตตในสภาวะสมดุลที่นำเมทานอลออกจากระบบ 1 ชั่วโมง จึงมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นของกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมีเตตในสภาวะสมดุลที่ไม่ได้มีการนำเมทานอลออกจากระบบ รูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.6 และค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมีเตตในสภาวะสมดุลมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.7

เมื่อพิจารณาค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์พบว่าเมื่อค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมีเตตมีค่ามากขึ้น ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเมทิลปาล์มมีเตตเป็นสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบแข่งขัน (consecutive reaction) เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่นำเมทานอลออกจากระบบ จึงพบปริมาณไดปาล์มมีตินและไตรปาล์มมีตินมากขึ้น ทำให้ค่าผลได้ของโมนอปาล์มมีติน ดังรูปที่ 4.8 มีค่าลดลง ค่าผลได้ของไดปาล์มมีติน ดังรูปที่ 4.9 มีค่าสูงขึ้น และค่าผลได้ของไตรปาล์มมีตินไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่นำเมทานอลออกจากระบบ ดังรูปที่ 4.10

4.2.1.3 ผลกระทบของการนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (ไอเมทานอล) ออกจากระบบ ในอิมัลชันประเภทกลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมีเตต เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

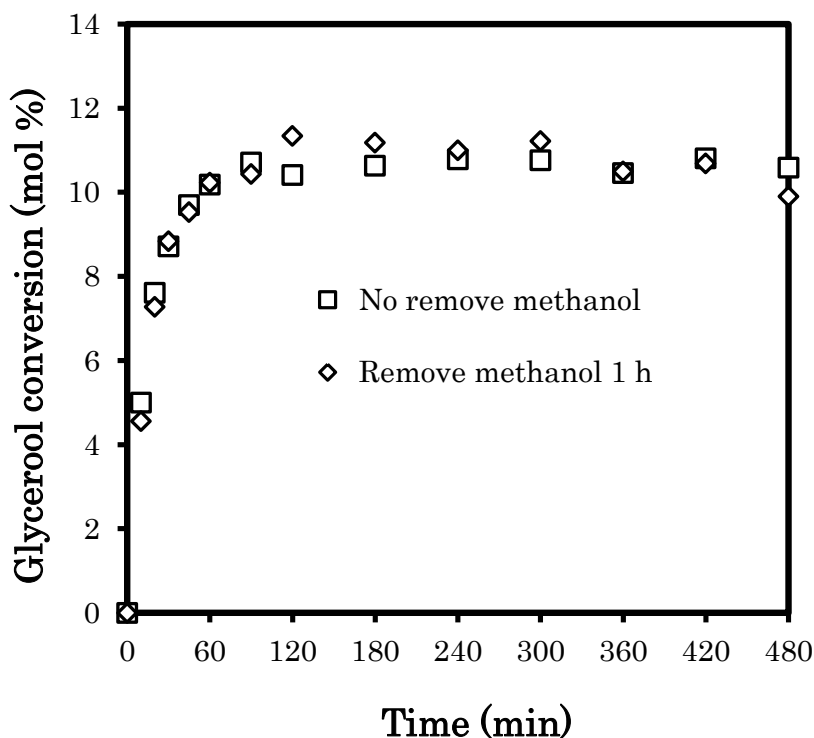
ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาเหมือนกับหัวข้อ 4.2.1.2 เมื่อเวลาผ่านไปความดันในระบบมีค่าลดลง ทำให้ปริมาณเมทานอลอยู่ในวัฏภาคของเมทิลปาล์มมีเตตมีค่าลดลง ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป 480 นาที ปิดปั๊มสุญญากาศ ความดันเกจในระบบลดลงเหลือ 5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งความดันในระบบมีค่าต่ำกว่าการทดลองที่นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปริมาณเมทานอลในวัฏภาคเมทิลปาล์มมีเตตมีค่าลดลง (มีปริมาณเมทานอลในวัฏภาคของเหลว 3% โดยโมลของเมทานอลทั้งหมดที่เกิดขึ้น) ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น จึงพบความเข้มข้นของสารตั้งต้นของกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมีเตตถูกใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น (พบความเข้มข้นของกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมีเตตในปริมาณที่ลดลง) ดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.6 ค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมีเตตมีค่ามากขึ้น ดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.7 (ค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมีเตตที่เวลา 8 ชั่วโมง มีค่าร้อยละ 95 โดยโมลซึ่งมีค่าสูงที่สุดในการทดลอง) เนื่องจากการนำเมทานอลออกจากระบบตลอดเวลา ระบบถูกรบกวนสภาวะสมดุล จึงไม่พบความเข้มข้นของ

กลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมีเตตในสภาวะสมดุล ดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.6 (ไม่พบความเข้มข้นของกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมีเตตมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง)

เมื่อพิจารณาค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์พบว่าเมื่อค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมีเตตที่ค่ามากขึ้น ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเมทิลปาล์มมีเตตเป็นสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบแข่งขัน (consecutive reaction) เมื่อเปรียบเทียบกับกรทดลองที่นำเมทานอลออกจากระบบ 1 ชั่วโมง จึงพบปริมาณไดปาล์มมีตินและไตรปาล์มมีตินมากขึ้น ทำให้ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมีติน ดังรูปที่ 4.8 มีค่าลดลง ค่าผลได้ของไดปาล์มมีตินและค่าผลได้ของไตรปาล์มมีตินมีค่าสูงขึ้นสอดคล้องกับค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมีเตตที่สูงขึ้นดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 ตามลำดับ

4.2.2 ผลกระทบของการนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (แก๊สเมทานอล) ออกจากระบบ ในอิมัลชันประเภทเมทิลปาล์มมีเตตในกลีเซอรอล

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการนำเมทานอลออกจากระบบ จากการค้าคำนวณปริมาณเมทานอล จากภาคผนวก จ พบว่าที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมีเตต 6:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส เมทานอลเป็นของเหลวทั้งหมดที่ความดันเกจ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อีกนัยหนึ่งคือเมทานอลเป็นของเหลวทุกๆช่วงเวลาในการทดลองที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมีเตต 6:1 โดยโมล โดยมีผลการทดลองดังนี้



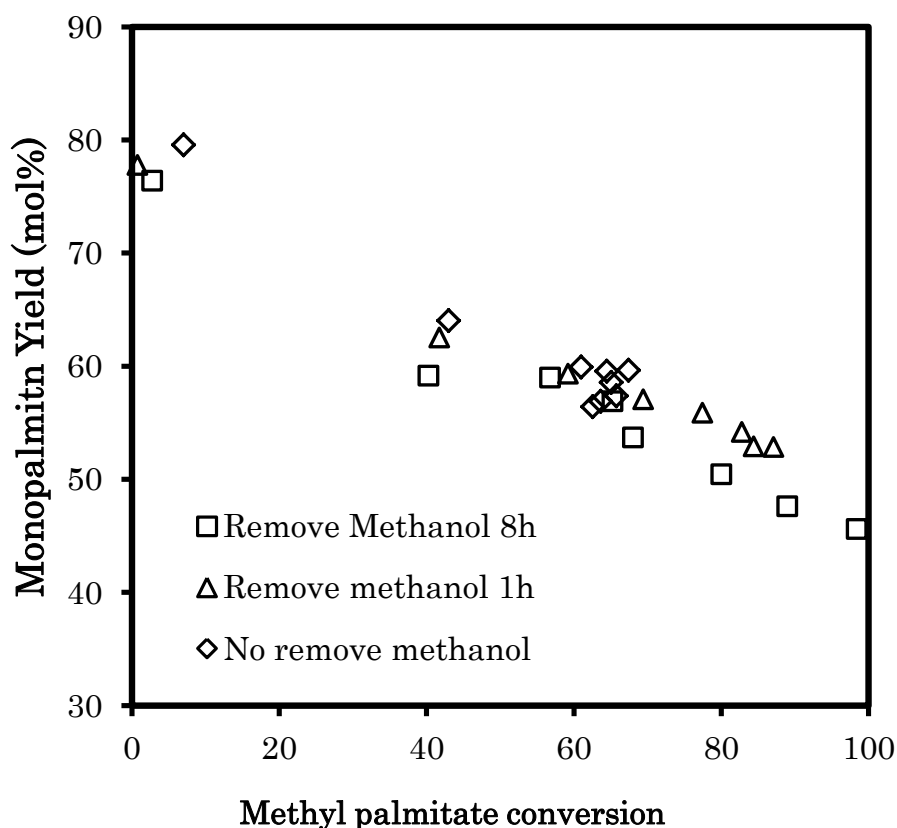
รูปที่ 4.12 แสดงค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการศึกษาการนำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมงและไม่นำออกจากระบบ อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 6:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที

ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 6:1 โดยโมล ระบบมีลักษณะเป็นอิมัลชันแบบเมทิลปาล์มมิเตตในกลีเซอรอล ภูมิภาคของเหลวกลีเซอรอลที่มีปริมาตรมากกว่าล้อมรอบภูมิภาคของเมทิลปาล์มมิเตต ปฏิกิริยาเกิดในภูมิภาคของเมทิลปาล์มมิเตตดังนั้นเมทานอลจึงเกิดในภูมิภาคของเมทิลปาล์มมิเตต แต่เนื่องจากเมทานอลละลายเป็นเนื้อเดียวกับกลีเซอรอลได้ดีกว่าเมทิลปาล์มมิเตต ดังนั้น tie line ของเฟสไดอะแกรมสำหรับระบบที่มีสามองค์ประกอบ (Ternary phase diagram) ดังรูปที่ 2.22 เมื่อเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ปริมาณกลีเซอรอลที่เหลือมากเกินไปในการทำปฏิกิริยาทำให้ของเหลวเมทานอลถูกแยกออกจากชั้นเมทิลปาล์มมิเตตไปยังภูมิภาคของกลีเซอรอล

อีกทั้งจากการทดลองนำเมทานอลออกจากระบบที่ความดันเกจ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ผลจากการคำนวณไม่พบไอของเมทานอลดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้การนำเมทานอลออกจากระบบไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตที่มีลักษณะอิมัลชันแบบเมทิลปาล์มมิเตตในกลีเซอรอล ดังรูปที่ 4.12 ค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลโดยโมลไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ (ค่าการแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณกลีเซอรอลโดยมวลอยู่ที่ 0.52 เปอร์เซ็นต์)

จึงสามารถสรุปผลการทดลองการศึกษาผลกระทบของการไม่นำเมทานอลออกจากระบบและการนำเมทานอลออกจากระบบได้ว่า เมื่อสารในระบบเป็นอิมัลชันแบบกลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมิเตต (อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล) การทดลองไม่นำเมทานอลออกจากระบบค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมิเตตมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับการทดลองที่นำเมทานอลออกจากระบบ ค่าผลได้โมโนปาล์มมิเตดมีค่าสูงที่สุดเนื่องจากสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบแข่งขัน (consecutive reaction) ถูกใช้ไปในปริมาณน้อย การทดลองนำเมทานอลออกจากระบบส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมิเตตมีค่าสูงขึ้น ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น แต่ทำให้ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิเตดมีค่าลดลง สวนทางกับค่าผลได้ของไดปาล์มมิเตดและไตรปาล์มมิเตดที่เพิ่มขึ้น และเมื่อสารในระบบเป็นอิมัลชันแบบเมทิลปาล์มมิเตตในกลีเซอรอล (อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 6:1 โดยโมล) การนำเมทานอลออกจากระบบไม่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต

โดยจากการทดลองพบว่า การนำเมทานอลออกจากระบบไม่ทำให้ค่าเลือกเกิดในการเกิดโมนอปาล์มมิตินสูงขึ้น สังเกตจากรูปที่ 4.13 โดยที่เส้นตรงของโมนอปาล์มมิตินในการนำเมทานอลออกจากระบบและไม่นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเส้นตรงเดียวกัน โดยที่การไม่นำเมทานอลออกจากระบบมีค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิตินสูง เนื่องจากค่าการเปลี่ยนในสภาวะสมดุลของเมทิลปาล์มมิเตตมีค่าต่ำ เมื่อนำเมทานอลออกจากระบบมากขึ้น ค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตตในสภาวะสมดุลมีค่าสูงขึ้น ทำให้ค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิตินมีค่าลดลง



รูปที่ 4.13 แสดงค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิตินต่อค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตต ในการทดลองไม่นำเมทานอลออกจากระบบและนำเมทานอลออกจากระบบ อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที

4.3 ผลกระทบของความเร็รรอบใบพัดต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต

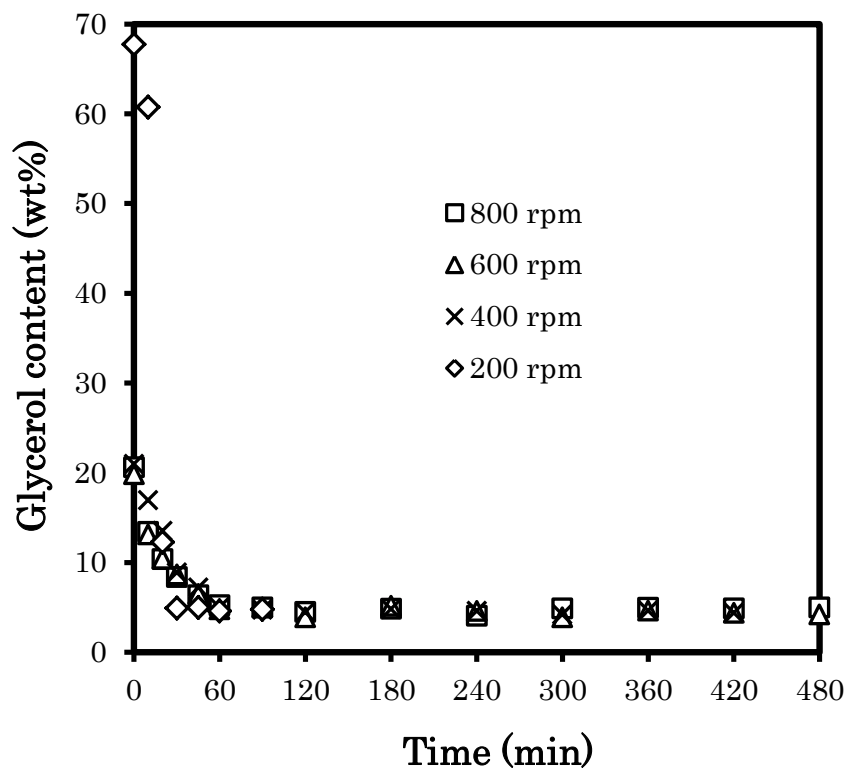
ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมฟอสเฟต มีวัฏภาคในเครื่องปฏิกรณ์ 4 วัฏภาค คือ สารตั้งต้นซึ่งได้แก่กลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมิเตต 2 วัฏภาค ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมฟอสเฟต 1 วัฏภาค และแก๊สเมทานอลที่เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง 1 วัฏภาค ความเร็รรอบใบพัดจึงส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต โดยความเร็รรอบใบพัดส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต 2 ทางด้วยกัน คือ การกระจายตัวกันของสารตั้งต้นสองชนิดอย่างสมบูรณ์ (well mixed) และส่งผลต่อการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งในระบบมีการถ่ายเทมวลสารระหว่างวัฏภาคของเหลวสองวัฏภาคของสารตั้งต้น และการถ่ายเทมวลสารระหว่างของเหลวกับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมฟอสเฟต ดังกลไกในการเกิดปฏิกิริยาในหัวข้อ 4.1.2

การกระจายตัวกันของสารตั้งต้นสองชนิดอย่างสมบูรณ์ (well mixed) คือการที่ความเร็รรอบของใบพัดมีค่ามากพอที่ทำให้ความเข้มข้นของสารทั้งหมดในระบบ มีค่าเท่ากันทุกจุดภายในเครื่องปฏิกรณ์ การเก็บสารตัวอย่างในการทดลองจะแสดงถึงความเข้มข้นของสารภายในระบบที่เวลาการเก็บสารตัวอย่าง อีกทั้งการกระจายตัวกันของสารตั้งต้นสองชนิดอย่างสมบูรณ์ ทำให้สารตั้งต้นทั้งสองชนิดมีโอกาสสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งถูกจำกัดไว้ที่ตะกร้าใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ได้เท่าๆกัน

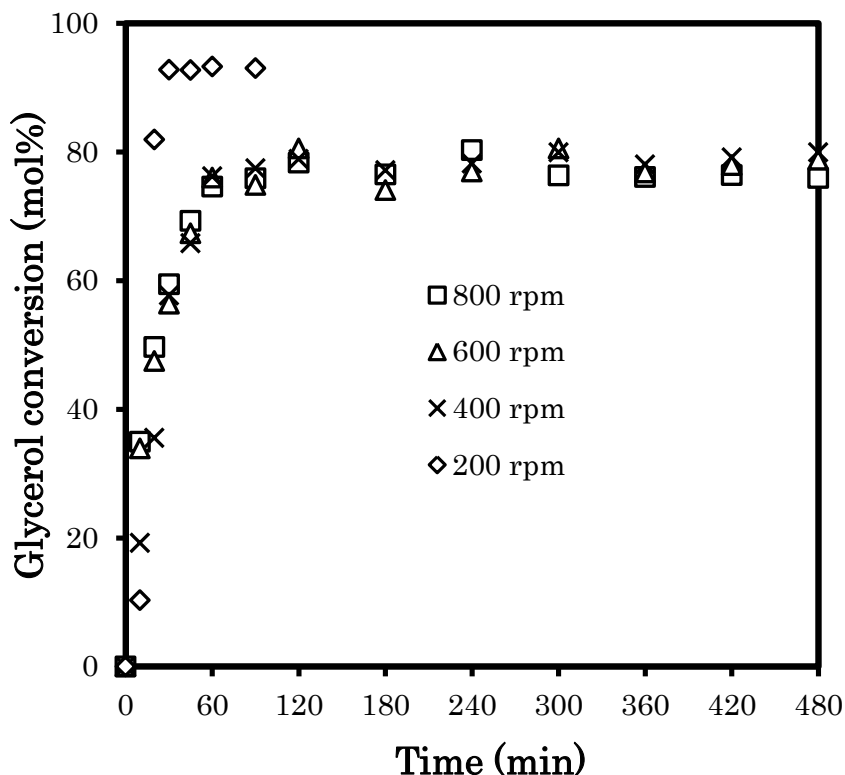
การถ่ายเทมวลสารระหว่างสารสองวัฏภาค (แสดงภาพและแสดงกลไกในการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละวัฏภาคโดยละเอียดหัวข้อ 4.1.2) พบว่าปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมฟอสเฟต มีการถ่ายเทมวลสาร 2 ขั้นตอน คือ 1. การถ่ายเทมวลสารระหว่างสารตั้งต้นสองวัฏภาค ซึ่งใช้ทฤษฎีฟิล์มของเหลว 2 ฟิล์ม ในการอธิบาย 2. การถ่ายเทมวลสารระหว่างอิมัลชันของสารตั้งต้น 2 ชนิดกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นชั้นฟิล์มของของเหลวและของแข็ง 1 ชั้นฟิล์ม

4.3.1 ผลกระทบของความเร็รรอบใบพัดต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาการแปรผันความเร็รรอบใบพัด ต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต มีผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.14 แสดงผลกระทบของการแปรผันความเร็วรอบใบพัดต่อปริมาณกลีเซอรอลโดยมวล ในปฏิกิริยากลิเซอรอลไฮดรอกซีเมทิลพาล์มิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลพาล์มิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลพาล์มิเตต นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.15 แสดงผลกระทบของการแปรผันความเร็วรอบใบพัดต่อค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ที่ความเร็วรอบใบพัด 200 รอบต่อนาที ปริมาณกลีเซอรอลโดยมวลมีค่าเริ่มต้นสูงกว่าปริมาณกลีเซอรอลที่ป้อนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 4.14 มีค่าถึงร้อยละ 70 โดยมวล ซึ่งมากกว่าค่ากลีเซอรอลที่ป้อนในเครื่องปฏิกรณ์ คือร้อยละ 25.4 โดยมวล เนื่องจากท่อเก็บสารตัวอย่างของเครื่องปฏิกรณ์มีปลายท่อทางเข้าอยู่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ อีกทั้งกลีเซอรอลมีความหนาแน่นมากกว่าเมทิลปาล์มมิเตต ดังนั้นปริมาณกลีเซอรอลที่พบในเวลาเริ่มต้นจึงมีค่าสูงกว่าปริมาณกลีเซอรอลที่ป้อนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ สามารถสรุปได้ว่าที่ความเร็วรอบใบพัด 200 รอบต่อนาที ไม่เพียงพอในการทำให้สารตั้งต้นทั้งสองชนิดกระจายตัวอย่างสมบูรณ์ ทำให้กลีเซอรอลบางส่วนอยู่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ไม่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งเครื่องปฏิกรณ์

เมื่อพิจารณาอัตราการถ่ายเทมวลสารทั้ง 2 ขั้นตอนของปฏิกิริยากลิเซโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต สามารถอธิบายด้วยสมการดังนี้

ค่าคงที่ในการถ่ายเทมวลสารทั้ง 2 ขั้นตอน สามารถอธิบายจากความสัมพันธ์ในสมการของเชอร์วูด (Sherwood)

$$Sh = Sc^n \cdot Re^m \qquad Sh = \text{Sherwood number} \left(\frac{k_c l}{D_{G/ME}} \right)$$

$$Sc = \text{Schmidt number} \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \qquad Re = \text{Reynold number} \left(\frac{\rho N D^2}{\mu} \right)$$

$$\text{แทนค่า} \qquad \frac{k_c l}{D_{G/ME}} = \left(\frac{\mu}{\rho D_{G/ME}} \right)^n \left(\frac{\rho N D^2}{\mu} \right)^m$$

$$\text{จะได้} \qquad k_c = f(N^m) (D_{G/ME})^x \qquad (4.1)$$

จากการแทนค่าคงที่ของตัวแปรไร้หน่วยลงในสมการของเชอร์วูด (Sherwood) พบว่าค่าคงที่การถ่ายเทมวลสาร (k_c) แปรผันตามความเร็วรอบ (N) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D_{AB}) ดังสมการที่ 4.1 โดยที่ความเร็วรอบมีผลกระทบต่อค่าคงที่การถ่ายเทมวลสารของของเหลวทั้ง 2 ภูมิภาคไม่มากนัก เนื่องจากของเหลวทั้งสองวัฏเคลื่อนที่ไปภายใต้ความเร็วรอบใบพัดเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการถ่ายเทมวลสารของภูมิภาคของเหลวและผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาหยุดนิ่งอยู่ในตะกร้าใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ความเร็วรอบสัมพัทธ์ของภูมิภาคของเหลวและของแข็งมีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่อธิบายโดยสมการของสโตกและไอน์สไตน์ (Stokes-Einstein equation)

$$D_{G/ME} = \frac{k_B T f(V)}{\mu_{ME}} \qquad (4.2)$$

$D_{G/ME}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ของตัวถูกละลายกลีเซอรอลในตัวทำละลาย เมทิลปริมิต

k_B คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์

T คือ อุณหภูมิของของเหลว (Absolute temperature)

μ_{ME} คือ ความหนืดของตัวทำละลายเมทิลปาล์มมิเตด

V คือ ปริมาตรต่อสาร 1 โมล

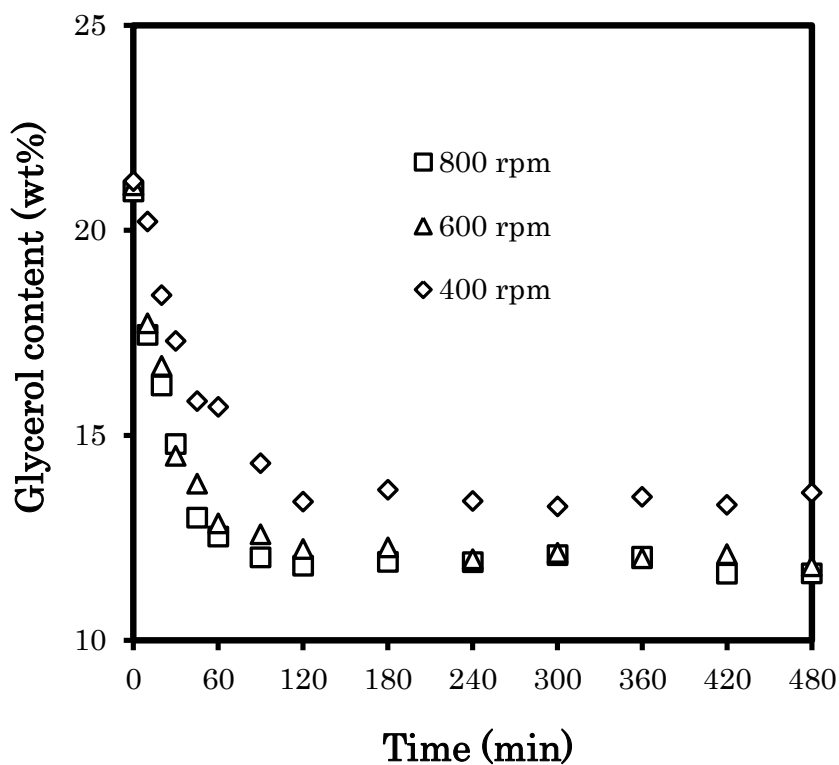
สมการค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสโตกและไอน์สไตน์ใช้อธิบายอนุภาคทรงกลมที่เคลื่อนที่ผ่านของเหลวที่มีค่าคงที่ไร้หน่วยเรย์โนลด์ต่ำ แต่ในการทดลองที่ค่าคงที่ไร้หน่วยเรย์โนลด์สูง ค่า

สัมประสิทธิ์การแพร่ยังแปรผันตรงกับอุณหภูมิกำลังหนึ่ง ดังนั้นจึงใช้สมการค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสโตกและไอน์สไตน์ในการอธิบาย

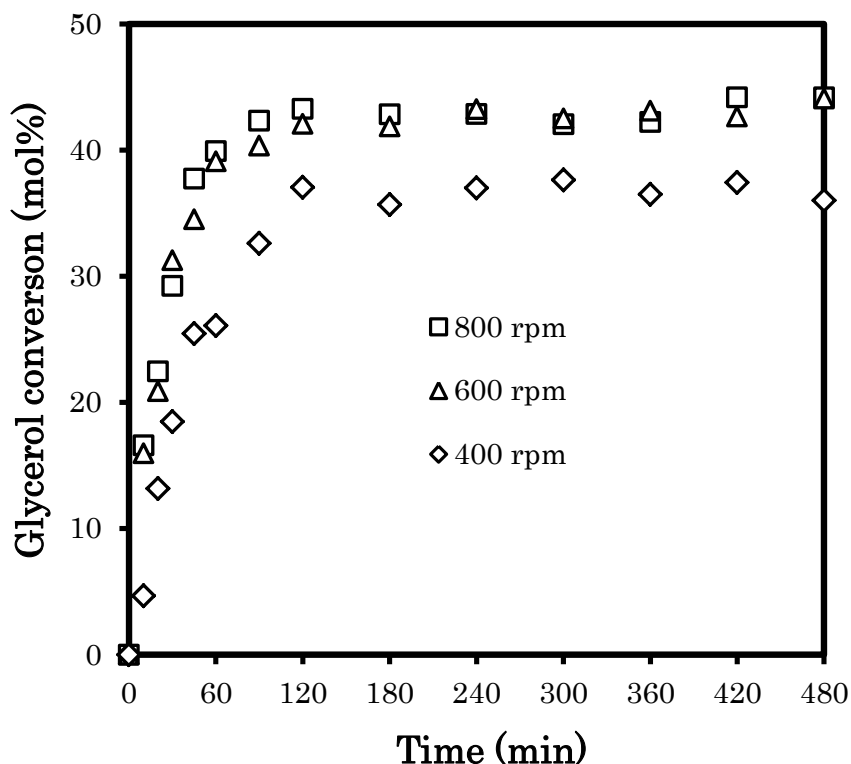
สมการค่าคงที่ในการถ่ายเทมวลสาร (สมการที่ 4.1) เลขยกกำลังของความเร็วยุโรปและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่ามากกว่าศูนย์ ทำให้ความเร็วยุโรปและอุณหภูมิส่งผลต่อค่าคงที่ของการถ่ายเทมวลสาร (สัมประสิทธิ์การแพร่แปรผันตามอุณหภูมิกำลังหนึ่ง)

การลดความเร็วยุโรปทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารมีค่าลดลง (ดังสมการที่ 4.1) ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวลสารมีค่าลดลงด้วย จึงมีโอกาที่ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไกลเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต แต่จากการทดลองเมื่อพิจารณาการแปรผันความเร็วยุโรปที่ 400 ถึง 800 รอบต่อนาที พบว่าปริมาณกลีเซอรอลโดยมวลและค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลที่วัดในแต่ละเวลา ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญร้อยละ 8 และร้อยละ 6 ตามลำดับ) รูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 เนื่องจากการทดลองแปรผันความเร็วยุโรปที่อุณหภูมิสูง 245 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีมีค่ามาก ทำให้ปริมาณกลีเซอรอลที่ถูกใช้ไป มีปริมาณมากขึ้น อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการถ่ายเทมวลสารมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) มีค่าสูงขึ้น ดังสมการที่ 4.2 ของสโตกและไอน์สไตน์ (Stokes-Einstein equation) การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและอัตราการถ่ายเทมวลสารมีค่าสูงขึ้น ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งสองที่เพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ปริมาณกลีเซอรอลที่ถูกใช้ไปในการแปรผันความเร็วยุโรปจึงไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้ความเร็วยุโรปที่ทำการศึกษาคืออาจเป็นความเร็วยุโรปที่ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไกลเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต

4.3.2 ผลกระทบของความเร็รรอบใบพัดต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตด ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.16 แสดงผลกระทบของการแปรผันความเร็รรอบใบพัดต่อปริมาณกลีเซอรอลโดยมวล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตด ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

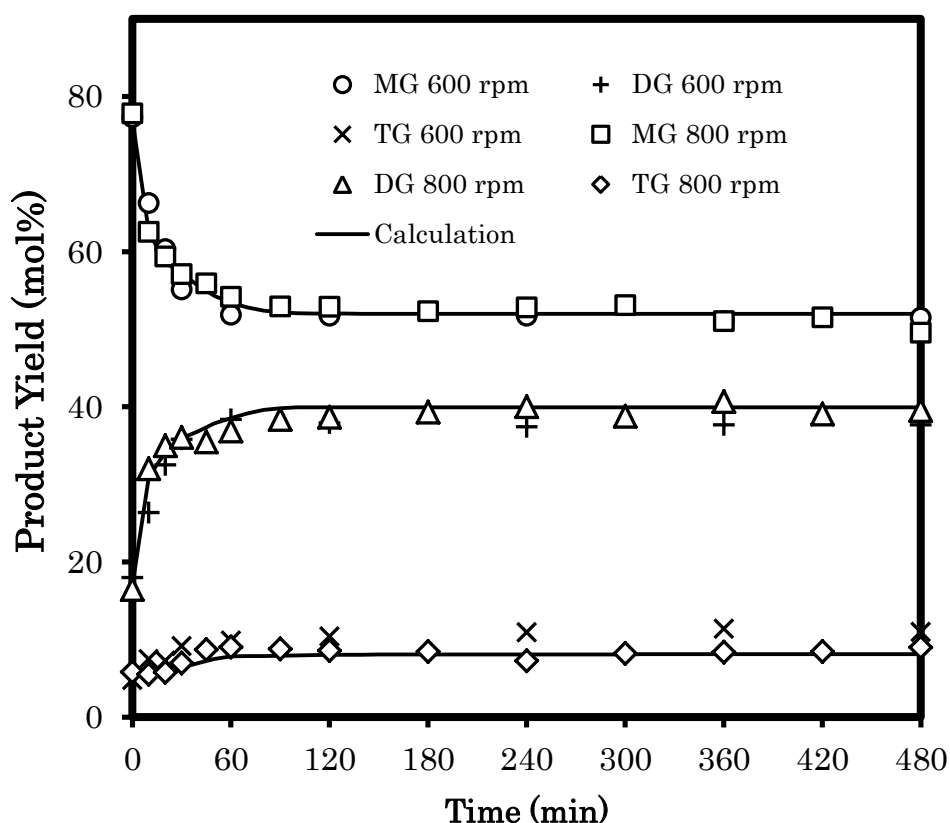


รูปที่ 4.17 แสดงผลกระทบของการแปรผันความเร็วรอบใบพัดต่อค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากการศึกษาการแปรผันความเร็วรอบใบพัดต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต พบว่าเมื่อความเร็วรอบของใบพัดมีค่าลดลง จนมีความเร็วรอบใบพัดอยู่ที่ 400 รอบต่อนาที ปริมาณกลีเซอรอลโดยมวลที่ลดลงตามเวลา และค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลโดยโมล มีค่าแตกต่างจากการทดลองที่ความเร็วรอบ 600 และ 800 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 เนื่องจากที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีมีค่าต่ำ อัตราการถูกใช้ไปของกลีเซอรอลน้อยกว่าการทดลองที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราการถ่ายเทมวลสารมีค่าต่ำลง เนื่องจากอุณหภูมิต่ำลงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าต่ำลง แต่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ต่ำลง ส่งผลให้ความเร็วรอบมีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทมวลสารอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นเมื่อทำการทดลองที่ความเร็วรอบใบพัด 400 รอบต่อนาที อัตราการถ่ายเทมวลสารระหว่างสองวัฏภาคมีผลกระทบต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต

โดยทั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าที่ความเร็วรอบใบพัด 400 รอบต่อนาที เป็นความเร็วรอบที่ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้ผลของการถ่ายเทมวลสารในวัฏภาคของเหลวกับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต ไม่มีผลกระทบต่อการศึกษา

4.3.3 ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการแปรผันความเร็วรอบของใบพัดที่ ความเร็วรอบ 600 และ 800 รอบต่อนาที



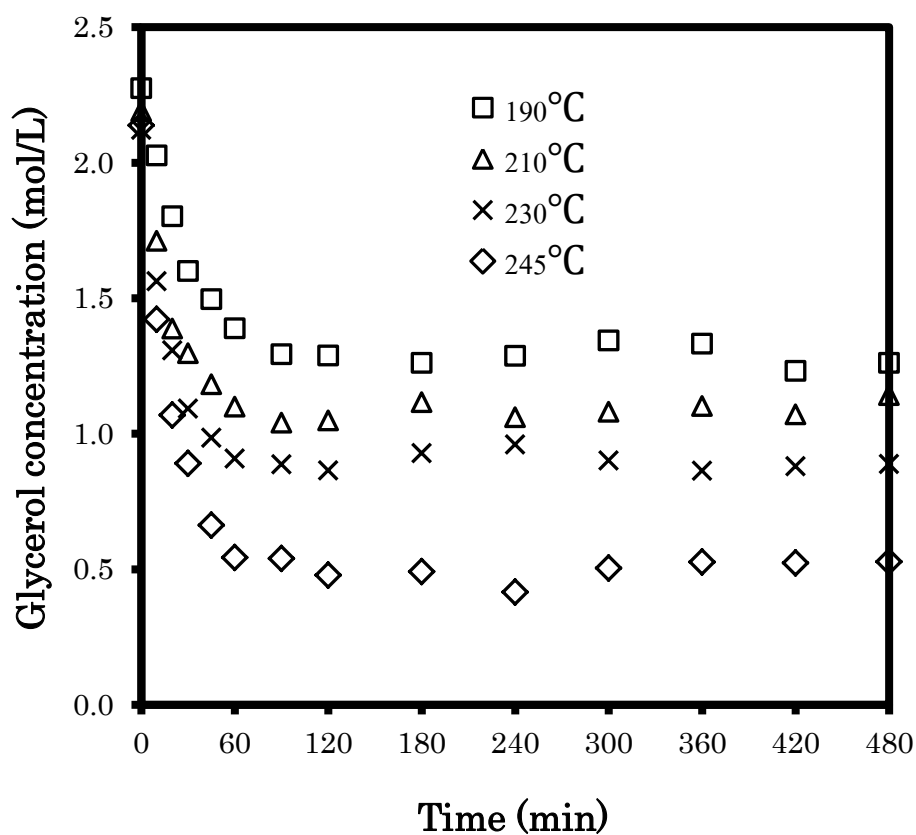
รูปที่ 4.18 แสดงค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตด จากการแปรผันความเร็วรอบใบพัด 600 และ 800 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากผลการทดลองพบว่าค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิเตด ไดปาล์มมิเตด และไตรปาล์มมิเตด ในแต่ละช่วงเวลาไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.18 และจากการทดลองการแปรผันความเร็วรอบใบพัด 600 และ 800 รอบต่อนาที ปริมาณกลีเซอรอลโดยมวลและค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลโดยโมลไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.14 และ รูปที่ 4.15 ทำให้สรุปได้ว่าที่

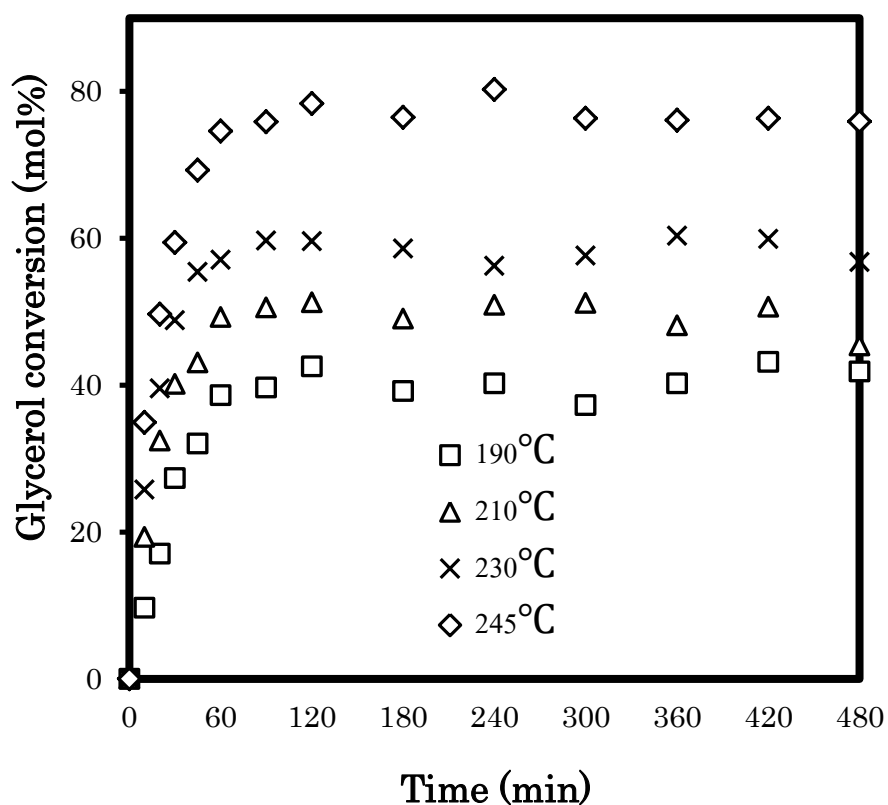
ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที เป็นความเร็วรอบที่มากพอที่ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารในวัฏภาคของเหลวสองวัฏภาคของสารตั้งต้นและวัฏภาคของเหลวกับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต ไม่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต

4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต

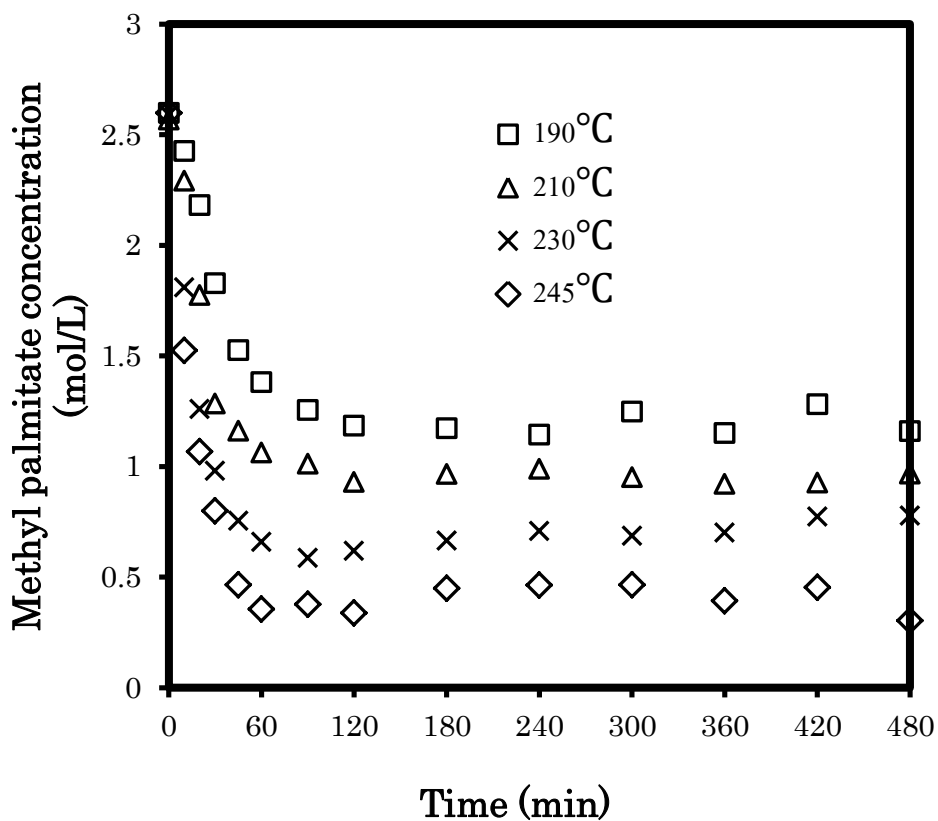
การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตมีผลการทดลองดังนี้



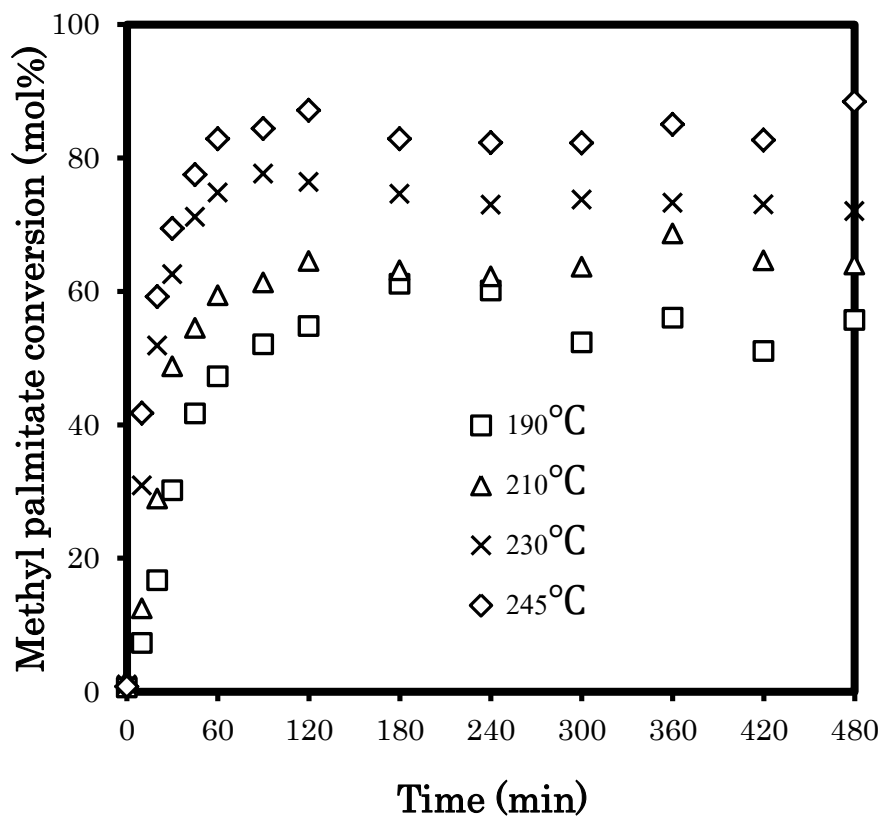
รูปที่ 4.19 แสดงความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่เหลืออยู่ในแต่ละช่วงเวลา ของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



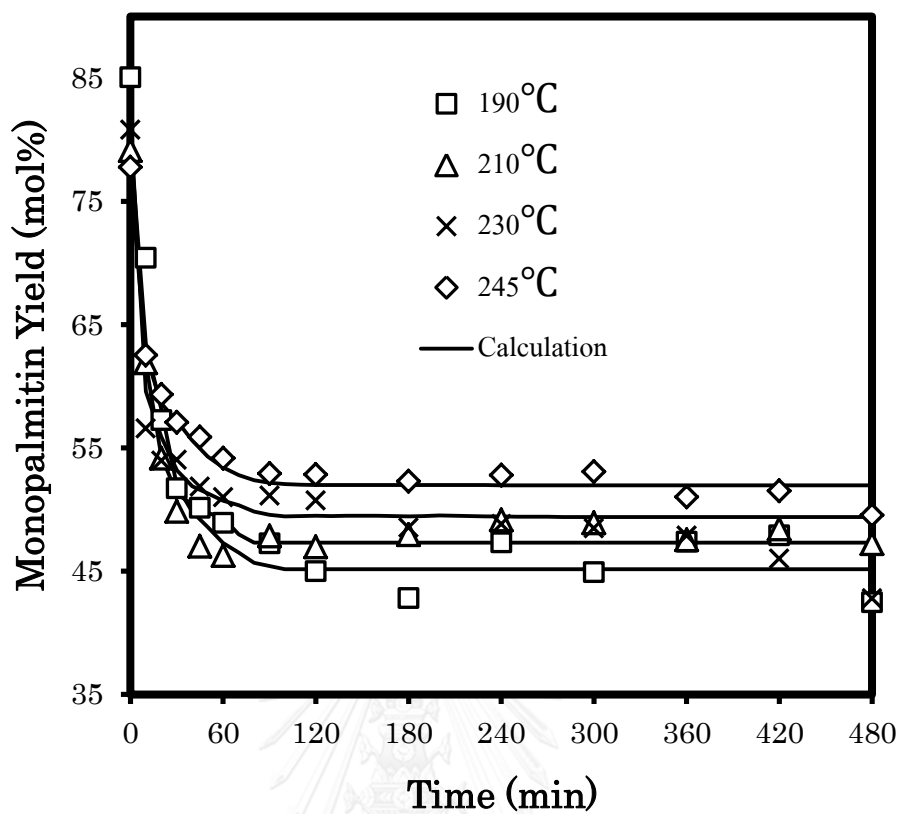
รูปที่ 4.20 แสดงค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตดจากการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



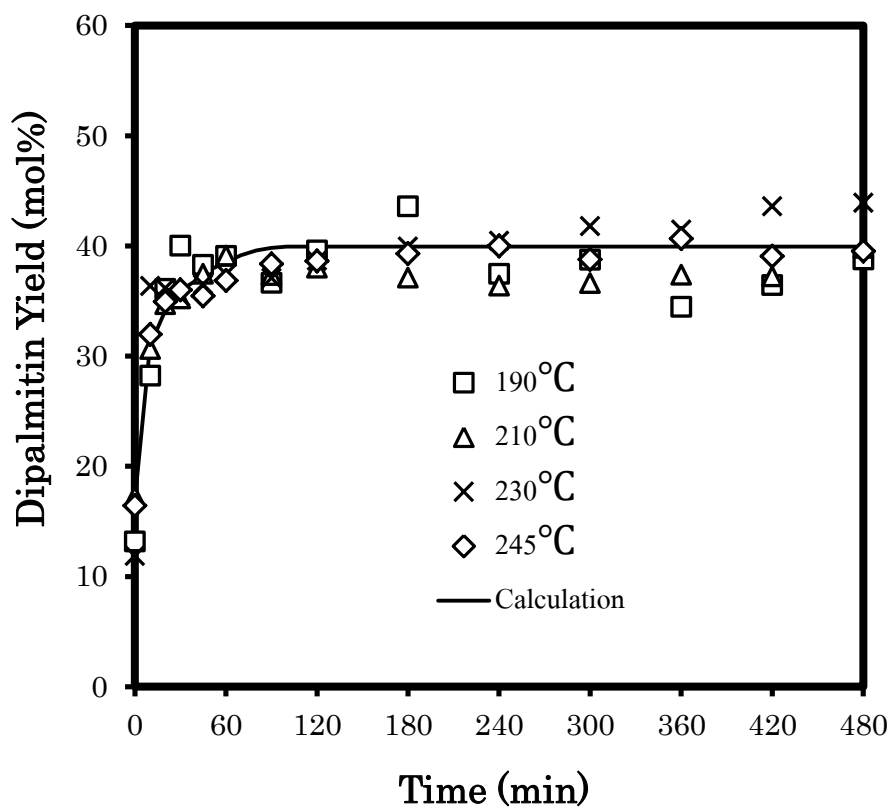
รูปที่ 4.21 แสดงความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมิเตตที่เหลืออยู่ในแต่ละช่วงเวลา ของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



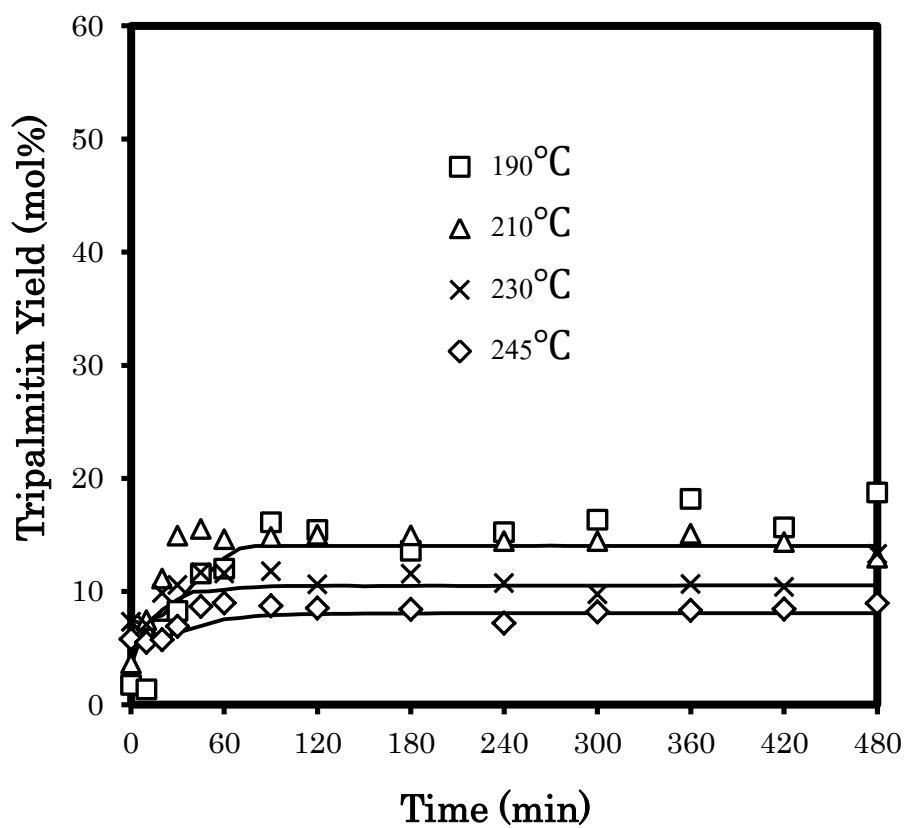
รูปที่ 4.22 แสดงค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตตของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.23 แสดงค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิตินโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.24 แสดงค่าผลได้ของไดปาล์มิตินโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.25 แสดงค่าผลได้ของไตรปาล์มมิตินโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต ร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที จากกรคำนวณด้วยโปรแกรม excel

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา	190 องศาเซลเซียส	210 องศาเซลเซียส	230 องศาเซลเซียส	245 องศาเซลเซียส
$k_{1f} \times 10^2$	2.35	3.71	7.82	9.58
$k_{1r} \times 10^2$	0.49	0.61	0.88	0.91
$k_{2f} \times 10^2$	0.58	1.03	1.68	1.86
$k_{2r} \times 10^2$	1.21	2.39	3.43	3.83
$k_{3f} \times 10^2$	0.97	0.86	1.45	0.93
$k_{3r} \times 10^2$	3.47	3.12	6.85	4.83
K_1	4.81	6.12	8.91	10.55
K_2	0.48	0.43	0.49	0.48
K_3	0.28	0.28	0.21	0.19

4.4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าการละลายของกลีเซอรอลในวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตต

เนื่องจากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต มีสารตั้งต้นสองวัฏภาคที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง การเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตกลีเซอรอลละลายเข้าไปในวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตต โดยกลีเซอรอลเป็นตัวถูกละลายและเมทิลปาล์มมิเตตเป็นตัวทำละลาย (กลไกการเกิดปฏิกิริยาในหัวข้อ 4.1.2) ในการศึกษาผลกระทบของการละลายของกลีเซอรอลต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ใช้สมการของโนเยสและวิธินีย์ (Noyes-Whitney equation) ในการอธิบายดังนี้

$$r_{\text{dissolution}} = A \frac{D_{G/ME}}{d} (C_s - C_b) \quad (4.3)$$

$r_{\text{dissolution}}$ คือ อัตราการละลายของกลีเซอรอลในวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตต

A คือ พื้นที่ผิวของโมเลกุลกลีเซอรอล

$D_{G/ME}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของกลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมิเตต

d คือ ระยะห่างระหว่างโมเลกุลกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมิเตต

$C_{G,S}$ คือ ความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ผิวของกลีเซอรอล

$C_{G,ME}$ คือ ความเข้มข้นของกลีเซอรอลในวัฏภาคของตัวทำละลายเมทิลปาล์มมิเตต

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และความเข้มข้นของตัวถูกละลายส่งผลต่ออัตราการละลาย ซึ่งการละลายของของเหลวส่วนมากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราการละลายมีค่ามากขึ้น เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อยู่ในสมการการละลายมีค่าสูงขึ้น ดังสมการ 4.2 และค่าการละลาย (solubility) มีค่ามากขึ้น ค่าการละลายของกลีเซอรอลคือความเข้มข้นของกลีเซอรอลในวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตตที่มากที่สุด ในสภาวะสมดุล ($C_{G,ME}$ มากที่สุด) ที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง ค่าการละลาย (solubility) ขึ้นกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุลมีค่ามากขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้กลีเซอรอลละลายเข้าไปในวัฏภาคของเมทิลปาล์มมิเตตได้มากขึ้น กลีเซอรอลถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น ทำให้ค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.20 เมื่อกลีเซอรอลถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น อัตราการเกิดโมโนปาล์มมิเตตมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้เมทิลปาล์มมิเตตถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น ดังรูปที่ 4.22

4.4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

อุณหภูมิมิมีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยที่เมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีมีค่าสูงขึ้นไปด้วย ดังสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius)

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (4.4)$$

k คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (หน่วยขึ้นกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี)

A คือ ค่าคงที่ของอาร์เรเนียส ซึ่งขึ้นกับการชนกันของโมเลกุล (หน่วยขึ้นกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี)

E_a คือ พลังงานก่อกัมมันต์ในการเกิดปฏิกิริยา (จูลต่อโมล)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (จูลต่อโมลเคลวิน)

T อุณหภูมิสมบูรณ์ (เคลวิน)

จากการศึกษาการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความเข้มข้นของกลีเซอรอลลดลงในปริมาณที่มากขึ้น ความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ลดลงภายใน ช่วงเวลาหนึ่งคืออัตราการใช้ไปของกลีเซอรอลเพื่อเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งคือความชันของกราฟ รูปที่ 4.19 สังเกตจากความชันของกราฟภายในเวลา 60 นาที ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส มีความชันมากกว่าที่อุณหภูมิ 230 210 และ 190 องศาเซลเซียส สอดคล้องความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมีเตตที่ความชันของกราฟภายในเวลา 60 นาทีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ อุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.21 เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีมี ค่าสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการใช้กลีเซอรอลเพื่อเกิดเป็นผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้น ตามสมการของอาร์เรเนียส (สมการที่ 4.4) จากการคำนวณค่าคงที่ของปฏิกิริยาของกลีเซอรอลโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตตดังแสดงในตาราง ที่ 4.2 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับการ ทดลอง

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลขึ้นกับกลไกในการเกิดปฏิกิริยา (ค่าคงที่ของ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลในแต่ละขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังสมการที่ 4.5 ถึง 4.7) ซึ่งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของโมโนปาล์มมีดินที่สภาวะสมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมีดินที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.23 ค่าคงที่ของอัตราการ เกิดปฏิกิริยาของไดปาล์มมีดินที่สภาวะสมดุลมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ค่าผลได้ของ ไดปาล์มมีดินไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น รูปที่ 4.24 และค่าคงที่ของอัตราการ เกิดปฏิกิริยาของไตรปาล์มมีดินที่สภาวะสมดุลมีค่าลดลง ทำให้ค่าผลได้ของไตรปาล์มมีดินมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น รูปที่ 4.25

$$K_1 = \frac{C_{MG}C_{MeOH}}{C_G C_{ME}} \quad (4.5)$$

$$K_2 = \frac{C_{DG}C_{MeOH}}{C_{MG}C_{ME}} \quad (4.6)$$

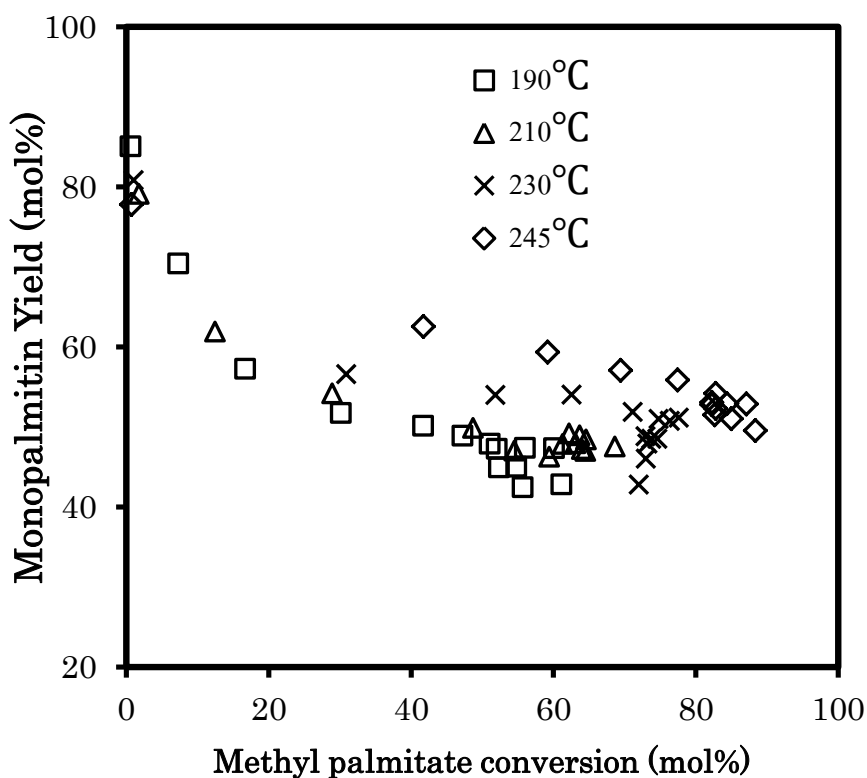
$$K_3 = \frac{C_{TG}C_{MeOH}}{C_{DG}C_{ME}} \quad (4.7)$$

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิหนึ่งอัตราการใช้ไปของกลีเซอรอลมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ดังรูปที่ 4.18 เนื่องจากเมื่อเวลาเริ่มต้นความเข้มข้นของกลีเซอรอลมีค่ามาก อัตราการใช้กลีเซอรอลในการเกิด เป็นผลิตภัณฑ์ มีค่ามากไปด้วย เมื่อเวลาผ่านไปกลีเซอรอลถูกใช้ไปเพื่อเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ ทำให้ความ เข้มข้นของกลีเซอรอลลดลง อีกทั้งเครื่องปฏิกรณ์เป็นแบบกะ เมื่อผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นด้วยปริมาตรที่เท่า เดิม ไม่มีการนำสารออกจากระบบ ทำให้ความเข้มข้นของกลีเซอรอลลดลง ซึ่งความเข้มข้นของกลีเซ

ออรอลที่ลดลงส่งผลให้อัตราการใช้กลีเซอรอลในการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง สอดคล้องกับอัตราการใช้เมทิลปาล์มมิเตตที่ลดลงตามเวลา ดังรูปที่ 4.21

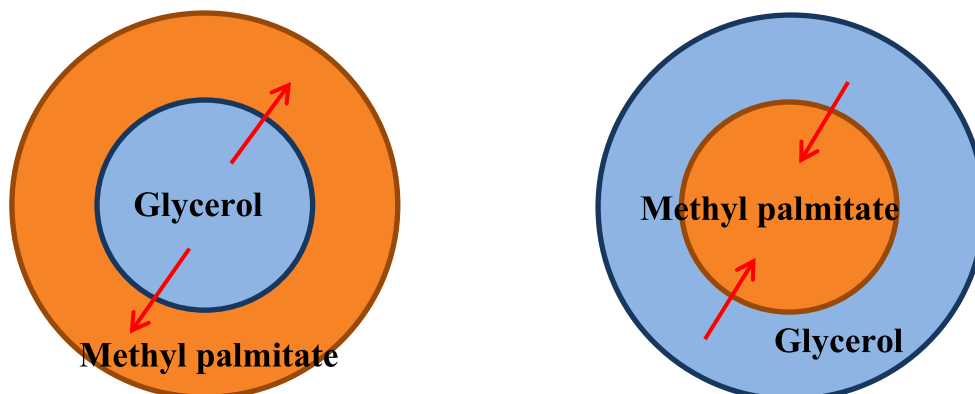
จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิในการทดลองสูงขึ้น ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้น ทำให้อัตราการใช้ไปของสารตั้งต้นมีค่าสูงขึ้น แต่ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลขึ้นกับลักษณะของปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิตินมีค่าสูงขึ้น ค่าผลได้ของไดปาล์มมิตินมีค่าต่ำลง และค่าผลได้ของไตรปาล์มมิตินมีค่าลดลง อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการละลายของกลีเซอรอลมีค่าสูงขึ้น ทำให้ค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลที่สภาวะสมดุลมีค่าสูงขึ้น

จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิตินมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย ที่ค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตตเดียวกันดังรูปที่ 4.26 จึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิตินมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.26 แสดงค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิตินและค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตต ในปฏิกิริยาไกลเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.5 ผลกระทบของอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตตโดยโมลในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต

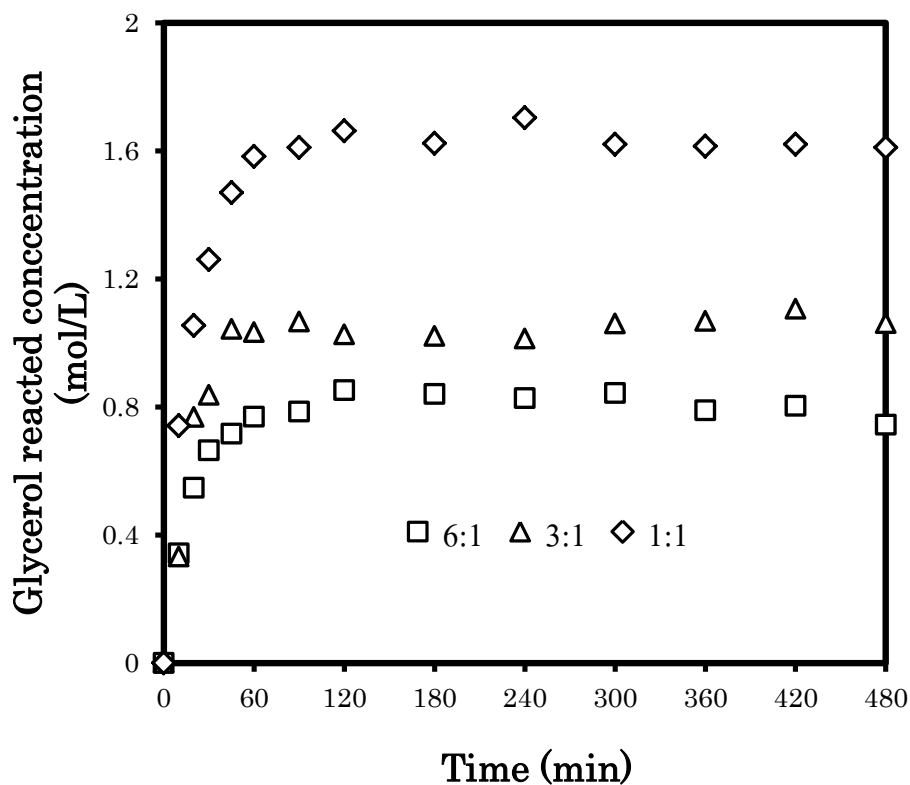


รูปที่ 4.27 แสดงลักษณะอิมัลชันของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต แบบกลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมิเตต และเมทิลปาล์มมิเตตในกลีเซอรอล

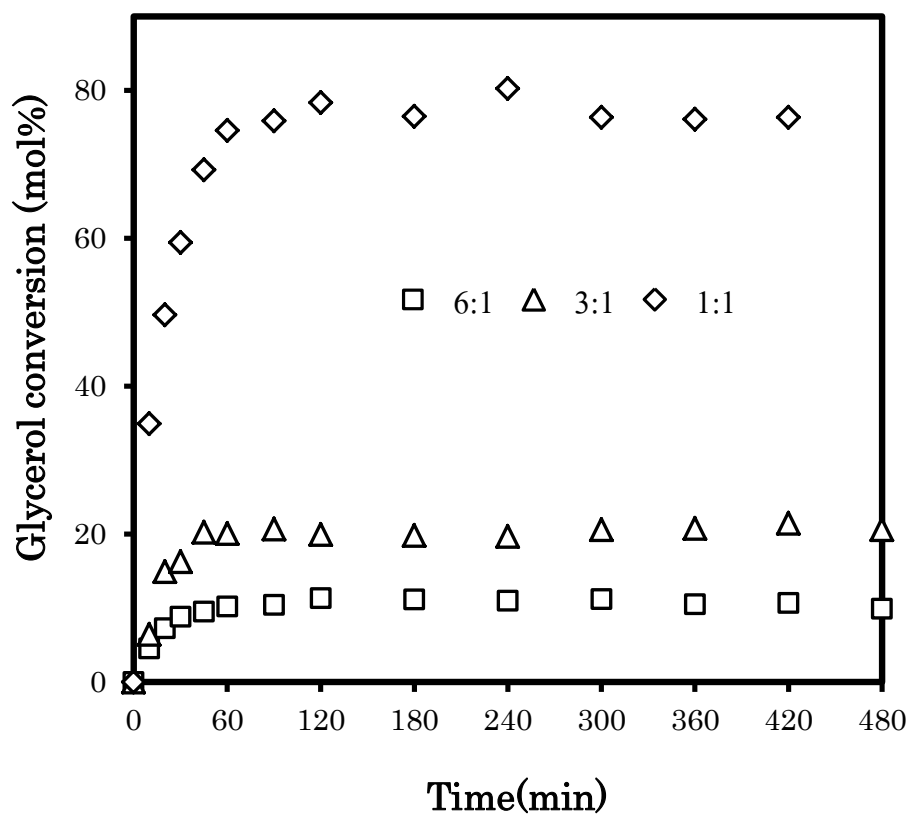
เนื่องจากสารตั้งต้นสองชนิดเป็นของเหลวที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อทำการปั่นกวาดด้วยใบพัดของเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้ของเหลวสองชนิดเกิดอิมัลชัน ซึ่งลักษณะการเกิดอิมัลชันขึ้นกับปริมาตรของสารตั้งต้นชนิดใดที่มีปริมาณมากกว่า โดยอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล มีลักษณะเป็นอิมัลชันแบบกลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมิเตต และอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 3:1 และ 6:1 โดยโมล มีลักษณะเป็นอิมัลชันแบบเมทิลปาล์มมิเตตในกลีเซอรอล ลูกศรในรูปที่ 4.27 แสดงทิศทางการละลายข้ามวัฏภาคของกลีเซอรอล ในการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต

4.5.1 ผลกระทบของอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตโดยโมลในอิมัลชันประเภทกลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมิเตต

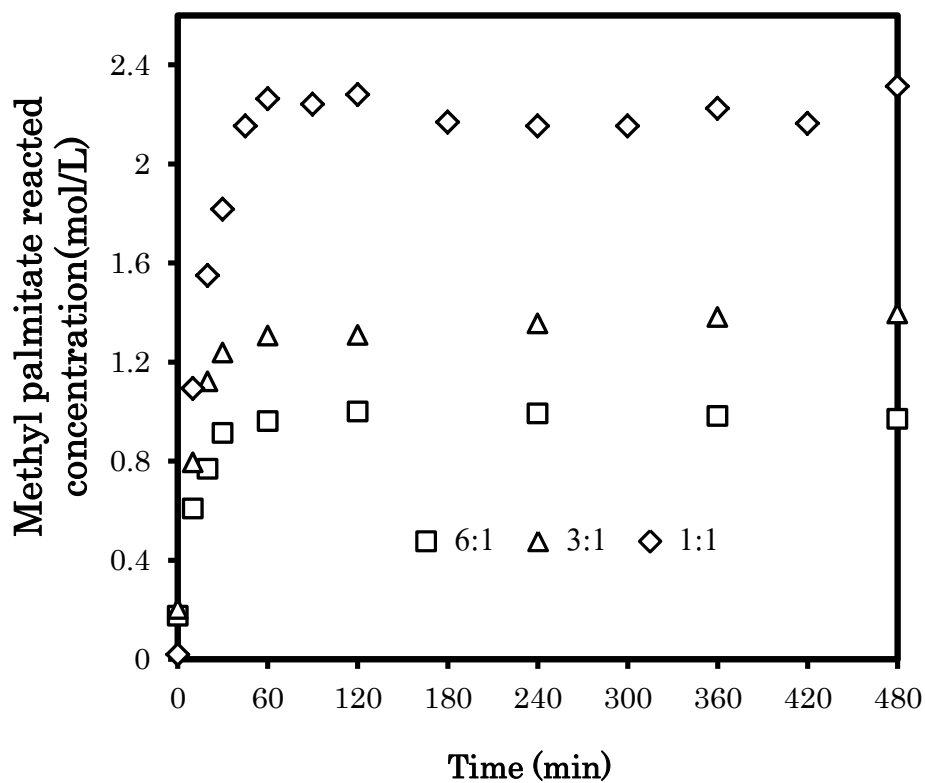
การทดลองศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต มีผลการทดลองดังนี้



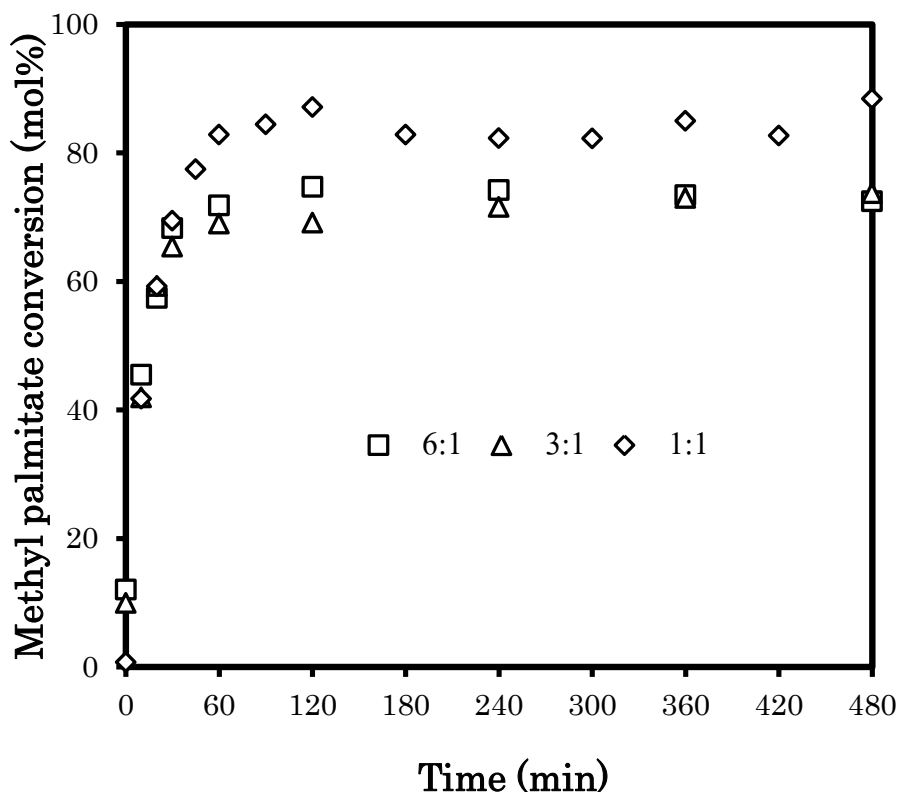
รูปที่ 4.28 แสดงความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ถูกใช้ไปในแต่ละช่วงเวลา ของปฏิกิริยากลิเซอโรลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 ถึง 6:1 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.29 แสดงค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลโดยโมล ของปฏิกิริยากลิเซโรไลซิสเมทิลปาล์มไมเตต จากการแปรผันอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มไมเตต 1:1 ถึง 6:1 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มไมเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.30 แสดงความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมิเตดที่ถูกใช้ไปในแต่ละช่วงเวลา ของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตด จากการแปรผันอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 ถึง 6:1 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



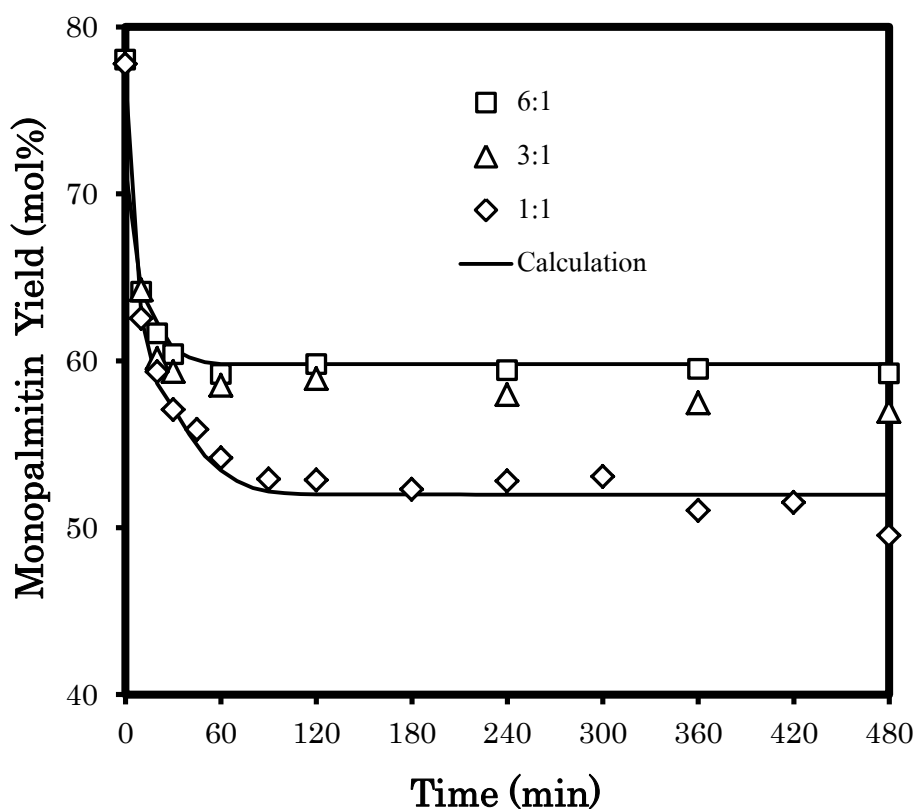
รูปที่ 4.31 แสดงค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตตโดยโมล ของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส เมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 ถึง 6:1 โดยโมล ที่ อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากการศึกษากลไกในการเกิดปฏิกิริยาในหัวข้อ 2.4 พบว่ากลีเซอรอลเป็นตัวถูกละลายในตัวทำละลายเมทิลปาล์มมิเตต ปฏิกิริยาเกิดในชั้นของเหลวเมทิลปาล์มมิเตต การทดลองในอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล มีลักษณะเป็นอิมัลชันแบบกลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมิเตต เมทิลปาล์มมิเตตมีปริมาตรเริ่มต้นเป็น 4 เท่าของกลีเซอรอล เมื่อวัฏภาคของเมทิลปาล์มมิเตตอยู่ภายนอกอิมัลชันซึ่งมีปริมาณมากกว่ากลีเซอรอล เมื่อทำการปั่นกวนปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตมีโอกาสเกิดขึ้นได้มากกว่าอิมัลชันแบบเมทิลปาล์มมิเตตในกลีเซอรอล เนื่องจากวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตตเป็นวัฏภาคการเกิดปฏิกิริยา

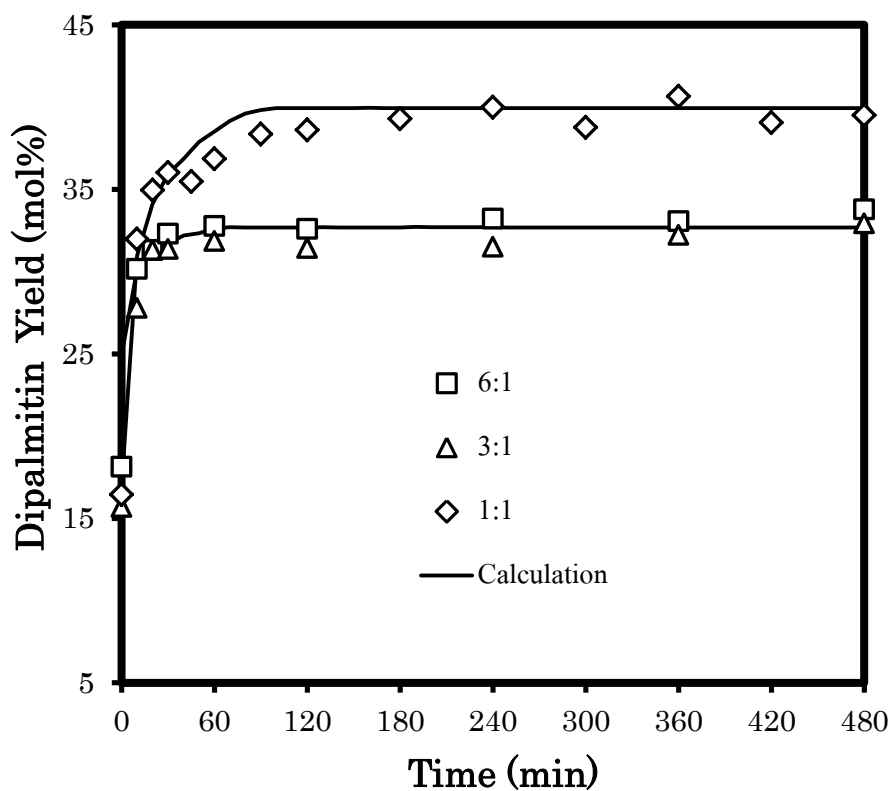
เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ถูกละลายในอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต ปาล์มมิเตต 3:1 และ 6:1 โดยโมล กับอัตราส่วน 1:1 โดยโมล พบว่าอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ที่เป็นอิมัลชันแบบกลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมิเตต ความเข้มข้นของกลี

เซอร์บอลถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าอิมัลชันแบบเมทิลเอสเทอร์ในกลีเซอรอล ดังรูปที่ 4.28 ซึ่งทำให้ค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลที่อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล มีค่ามากกว่าค่าการเปลี่ยนของอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 3:1 และ 6:1 โดยโมล ดังรูปที่ 4.29

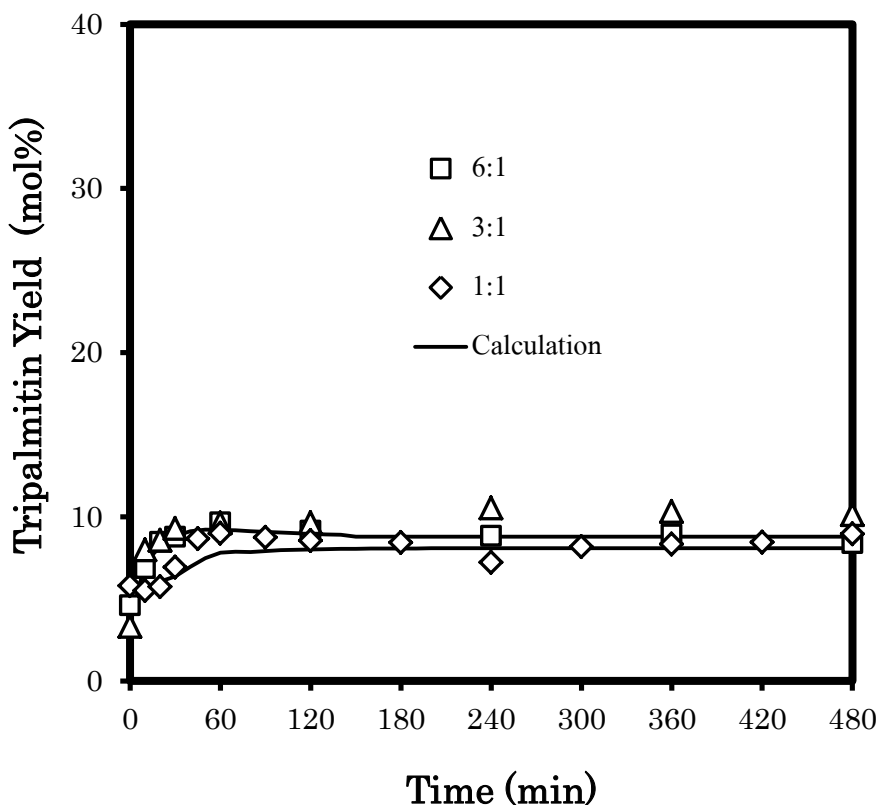
เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมิเตตที่ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยา สอดคล้องกับความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ซึ่งมีลักษณะเป็นอิมัลชันแบบกลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมิเตต ความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมิเตตถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าอิมัลชันแบบเมทิลปาล์มมิเตตในกลีเซอรอล ดังรูปที่ 4.30 ซึ่งทำให้ค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตตที่อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล มีค่ามากกว่าค่าการเปลี่ยนอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 3:1 และ 6:1 โดยโมล ดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.32 แสดงค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิตินโดยโมล ของปฏิกิริยากลิเซโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 ถึง 6:1 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.33 แสดงค่าผลได้ของไดปาล์มิตินโดยโมล ของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 ถึง 6:1 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.34 แสดงค่าผลได้ของไตรปาล์มมิตินโดยโมล ของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 ถึง 6:1 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์พบว่าที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิตินมีค่าต่ำ เนื่องจากความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมิเตตซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบแข่งขัน (consecutive reaction) ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าอิมัลชันแบบเมทิลปาล์มมิเตตในกลีเซอรอล ดังรูปที่ 4.30 ทำให้ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตมีอัตราการเกิดไดปาล์มมิตินและไตรปาล์มมิตินสูงขึ้น ทำให้ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิตินมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 3:1 และ 6:1 โดยโมล ดังรูปที่ 4.32 ค่าผลได้ของไดปาล์มมิตินมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.33 และค่าผลได้ของไตรปาล์มมิตินมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ (มีค่าความแตกต่างนัยสำคัญของ อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1, 3:1 และ 6:1 โดยโมล อยู่ที่ร้อยละ 7.5, 9.8 และ 3.6 มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 10 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้) ดังรูปที่ 4.34

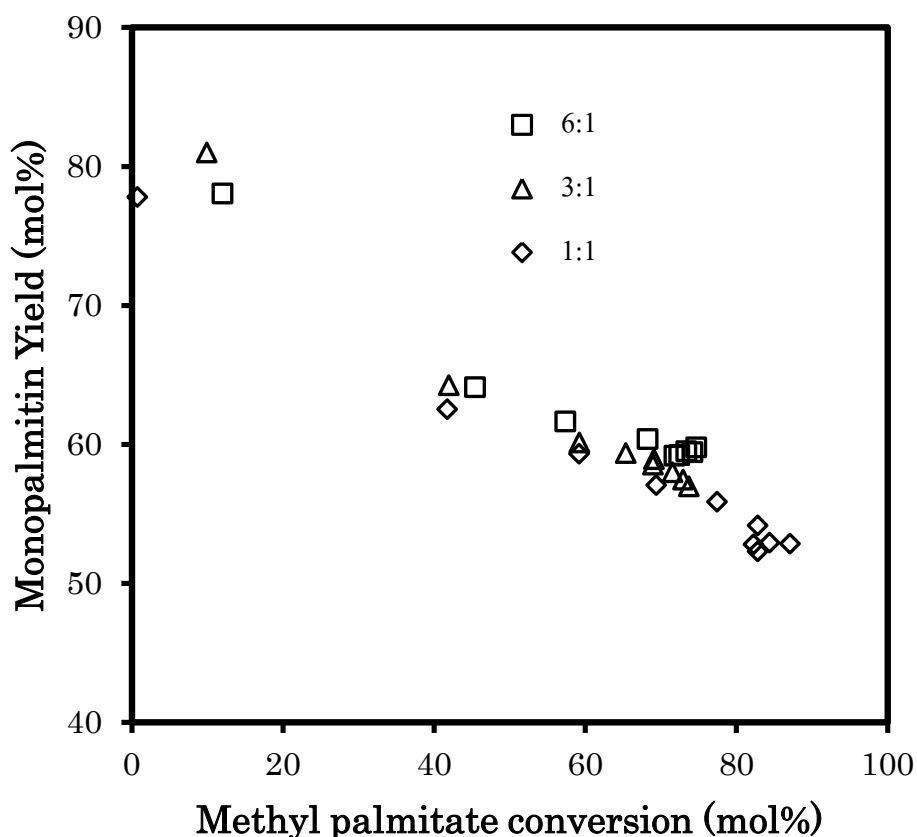
4.5.2 ผลกระทบของอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตตโดยโมลในอิมัลชันประเภทเมทิลปาล์มมิเตตในกลีเซอรอล

อิมัลชันประเภทเมทิลปาล์มมิเตตในกลีเซอรอลคืออิมัลชันที่วัฏภาคของเหลวกลีเซอรอลล้อมรอบวัฏภาคของเหลวของเมทิลปาล์มมิเตต การเกิดปฏิกิริยาเป็นไปได้ยากกว่าอิมัลชันแบบเมทิลเอสเทอร์ในกลีเซอรอล เนื่องจากกลีเซอรอลไม่ได้เป็นวัฏภาคของเหลวในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้วัฏภาคของเหลวของเมทิลปาล์มมิเตตมีโอกาสสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตได้ลดลง ปฏิกิริยากลิเซโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตเกิดได้ลดลง สังเกตจากค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมิเตตในอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 3:1 และ 6:1 โดยโมล มีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.29 และ รูปที่ 4.31

แต่เมื่อพิจารณาค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิเตต และไดปาล์มมิเตต พบว่าเมื่ออัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตตมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิเตตมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งตรงข้ามกับค่าผลได้ของไดปาล์มมิเตตที่ลดลง เนื่องจากโอกาสที่เมทิลปาล์มมิเตตถูกใช้ในขั้นตอนการเกิดไดปาล์มมิเตต และไตรปาล์มมิเตตลดลง ปริมาณของโมโนปาล์มมิเตตที่พบจึงมีค่ามากกว่าปริมาณเมทิลปาล์มมิเตตที่ถูกใช้ไปอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิเตตมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าผลได้ของไดปาล์มมิเตตมีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.32 และ รูปที่ 4.33

จึงสามารถสรุปการทดลองการแปรผันอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 ถึง 6:1 โดยโมล พบว่าเมื่ออัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตตมีค่าสูงขึ้น กลีเซอรอลที่อยู่ชั้นนอกของอิมัลชันประเภทเมทิลปาล์มมิเตตในกลีเซอรอลมีปริมาณมากขึ้น ปฏิกิริยากลิเซโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตเกิดได้น้อยลง ค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมิเตตมีค่าลดลง เมทิลปาล์มมิเตตซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ถูกใช้ในการเกิดไดปาล์มมิเตตและไตรปาล์มมิเตตเกิดปฏิกิริยาได้น้อยลง ทำให้ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิเตตเมื่ออัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 3:1 และ 6:1 โดยโมล มีค่าสูงขึ้น

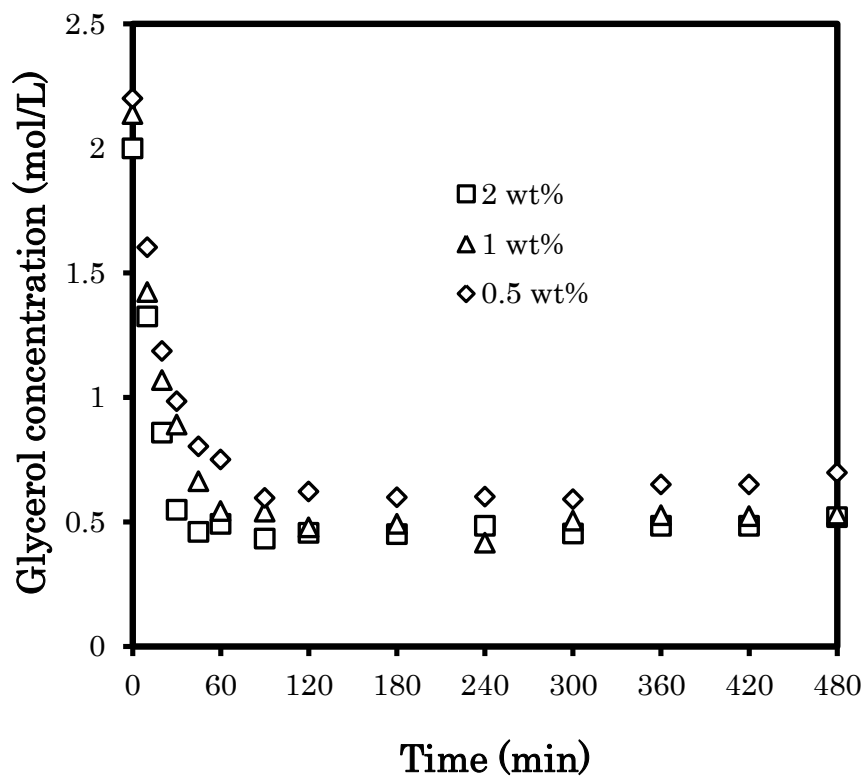
โดยจากการทดลองพบว่าอัตราส่วนกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นไม่ทำให้ค่าเลือกเกิดในการเกิดโมโนปาล์มมิเตตสูงขึ้น สังเกตจากรูปที่ 4.35 โดยที่เส้นตรงของโมโนปาล์มมิเตตในอัตราส่วนกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเดียวกัน โดยที่การอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ค่าการเปลี่ยนในสถานะสมดุลของเมทิลปาล์มมิเตตมีค่าสูง ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิเตตมีค่าต่ำ เมื่ออัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 3:1 และ 6:1 โดยโมล ค่าการเปลี่ยนในสถานะสมดุลของเมทิลปาล์มมิเตตมีค่าต่ำ ทำให้ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิเตตมีค่าสูงขึ้น



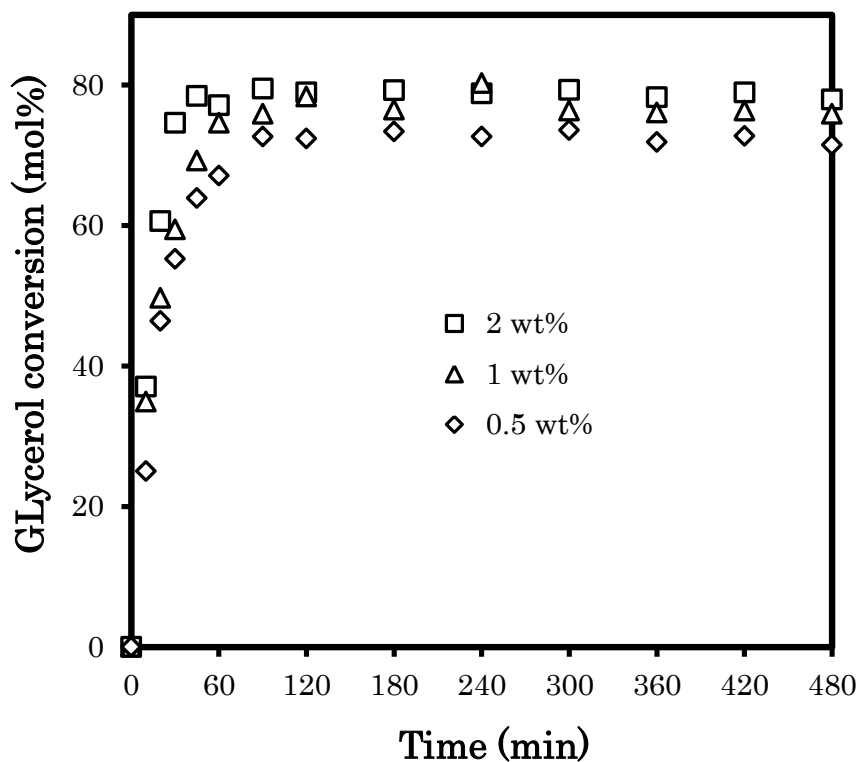
รูปที่ 4.35 แสดงค่าผลได้ของโมนิโนปาล์มมิตินต่อค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 ถึง 6:1 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.5 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต

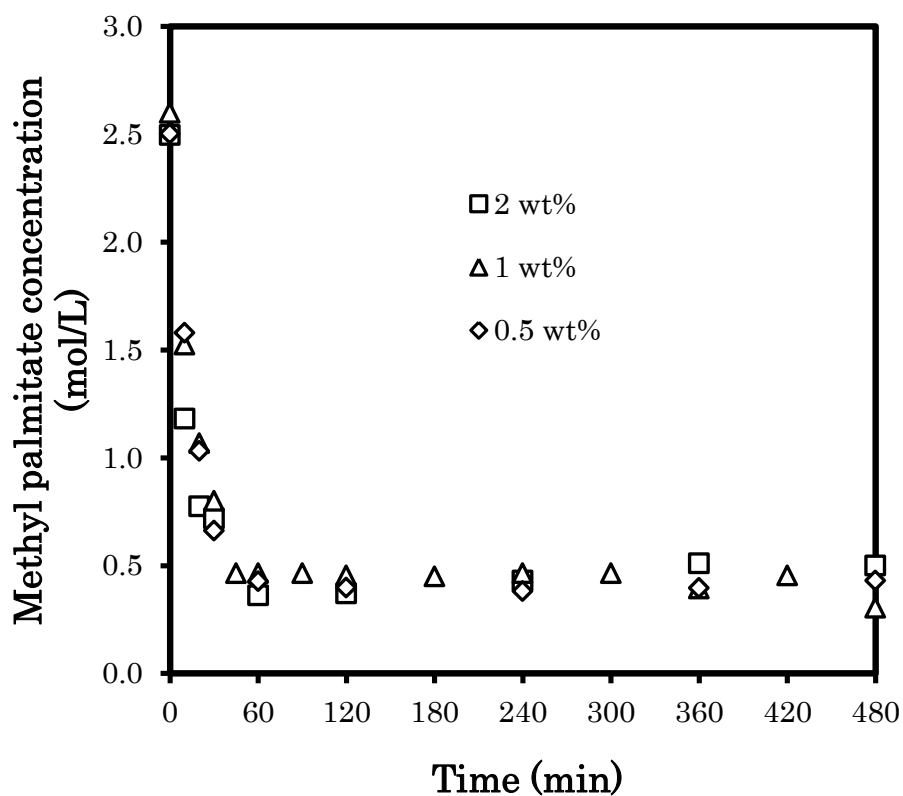
ตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่คือลดพลังงานการก่อกัมมันต์ ทำให้ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี มีค่าสูงขึ้นตามสมการของอาร์เรเนียส ดังสมการที่ 4.4 โดยค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในแต่ละขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่เท่ากัน ขึ้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีค่าเลือกเกิดกับขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาใดมากกว่ากัน จากการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตในหัวข้อ 3.5 พบว่าไม่มีรูพรุนภายในตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงปริมาณพื้นที่ผิวของโซเดียมฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้นในการเกิดปฏิกิริยา



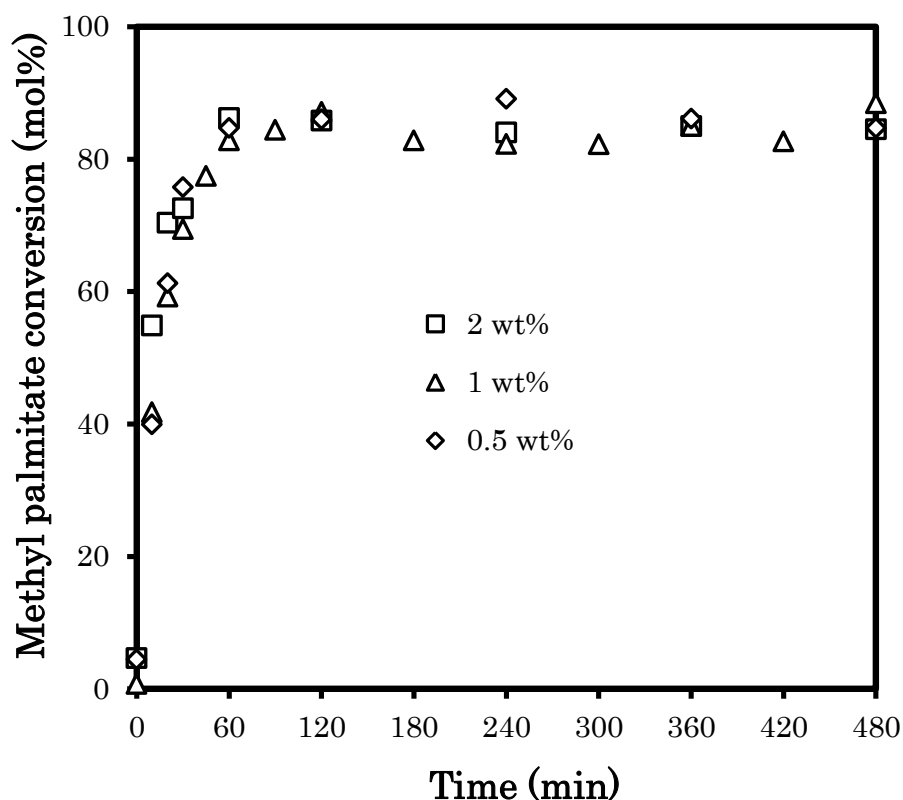
รูปที่ 4.36 แสดงความเข้มข้นของกลีเซอรอลของปฏิกิริยากลิเซโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตจากการแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.37 แสดงค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลโดยโมลในปฏิกิริยากลิเซโรไลซิสเมทิลพาล์มมิเตต จากการแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวลของเมทิลพาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลพาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.38 แสดงความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมิเตตของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

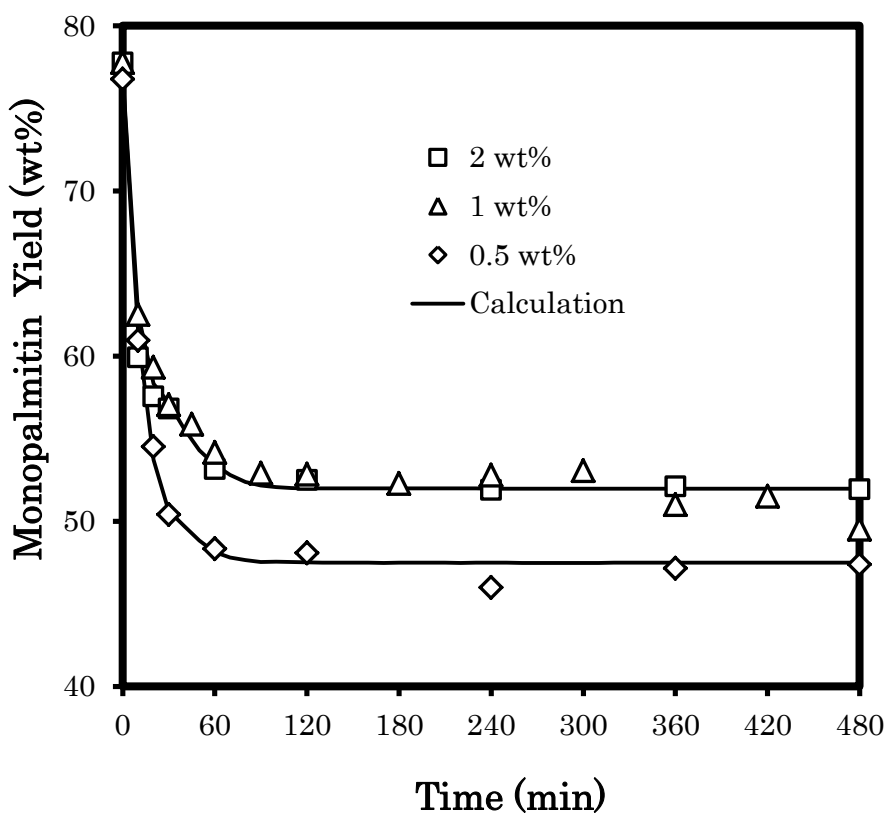


รูปที่ 4.39 แสดงค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตตโดยโมลในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

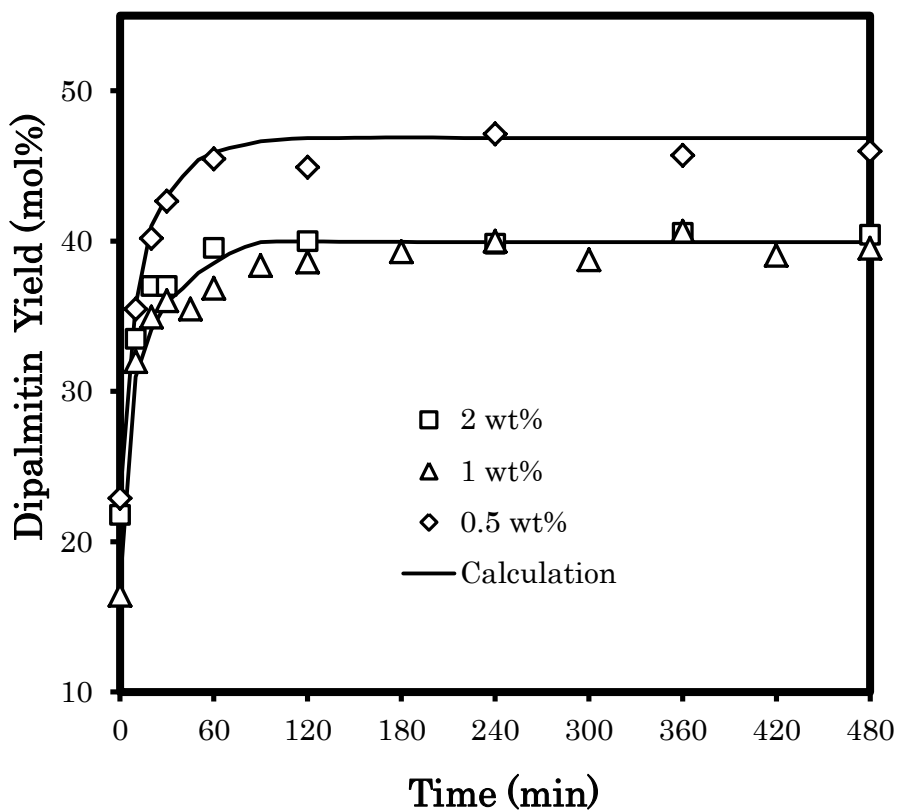
จากการทดลองการแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที พบว่าความเข้มข้นของกลีเซอรอลลดลงต่อเวลา ในช่วงที่ระบบยังไม่เข้าสู่ภาวะสมดุล เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.36 (ความชันของความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่พบต่อเวลามีค่าสูงขึ้น) สอดคล้องกับค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลมีค่าสูงขึ้น ดัง

รูปที่ 4.37 แต่เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมิเตตและค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตต พบว่าเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมิเตตและค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตตไม่เปลี่ยนแปลงแบบนัยสำคัญ (มีค่าความแตกต่างนัยสำคัญของความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมิเตต ประมาณร้อยละ 7) ดังรูปที่ 4.38 และ รูปที่ 4.39 แสดงว่าตัวเร่ง

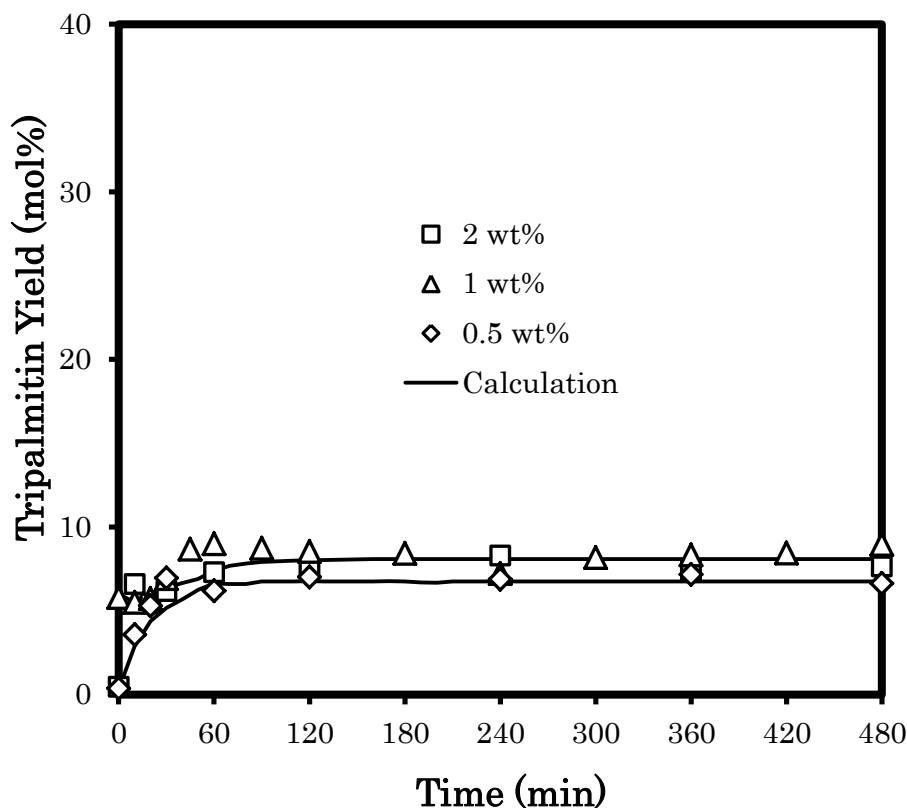
ปฏิกิริยาไฮเดียมฟอสเฟตมีค่าเลือกเกิดต่อการเกิดโมนอปาล์มมิติน เนื่องจากกลไกในการเกิดปฏิกิริยาในหัวข้อ 2.4.1 กลีเซอรอลจะถูกใช้ในการเกิดโมนอปาล์มมิตินขั้นตอนเดียวเท่านั้น



รูปที่ 4.40 แสดงค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิตินของปฏิกิริยากลิเซอรอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตดจากการแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.41 แสดงค่าผลได้ของไดปาล์มิตินของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตด จากการแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตด ที่ อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตด 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบ ใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.42 แสดงค่าผลได้ของไตรปาล์มมิตินของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตจากการแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในสภาวะสมดุล แต่ในการทดลองที่สภาวะต่างๆ พบว่าปริมาณของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้น ทำให้เกิดเมทานอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตปริมาณมากขึ้น ระบบถูกรบกวนสมดุลด้วยเมทานอลถูกแยกออกจากวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตตตลอดเวลา ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมฟอสเฟตมีความเลือกเกิดต่อโมโนปาล์มมิเตต ทำให้ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิเตตเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.40

เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณไม่มากพอ ในปริมาณพื้นที่ผิวที่มีปริมาณจำกัด เมื่อสารตั้งต้นในระบบถูกดูดซับลงบนพื้นที่ผิวที่ว่างในการเกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ ทำให้ความว่างในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง โมโนกลีเซอไรด์ที่เกิดขึ้นจะคายตัวในอัตราที่ช้าลง ทำให้

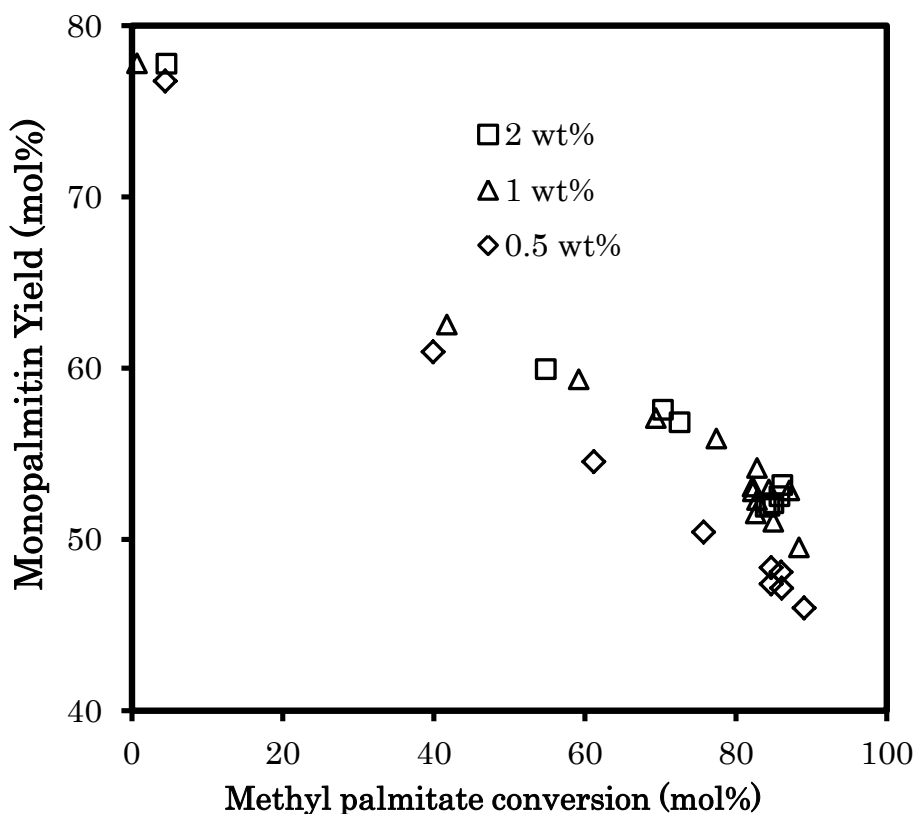
เมทิลปาล์มมิเตตดูดซับลงบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโมโนปาล์มมิเตตถูกดูดซับอยู่เกิดเป็นไดปาล์มมิเตต ทำให้ปริมาณไดปาล์มมิเตตที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ค่าผลได้ของไดปาล์มมิเตตจึงมีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 4.38

เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณมากพอ ทำให้มีพื้นที่ผิวที่ว่างไว้ในกาเกิดปฏิกิริยามากพอที่ทำให้อัตราการคายตัวของผลิตภัณฑ์ไม่ลดลงมากนัก ทำให้เมื่อสารตั้งต้นถูกดูดซับเกิดเป็นโมโนกลีเซอไรด์ พื้นที่ผิวที่ว่างไว้ในกาเกิดปฏิกิริยาที่มีมากพอ ที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 ถึง 2 โดยมวล ทำให้โอกาสที่โมโนกลีเซอไรด์ที่ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยากับเมทิลปาล์มมิเตตเกิดขึ้นได้น้อยลง ทำให้มีค่าผลได้โมโนปาล์มมิเตตสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.37

เมื่อพิจารณาค่าผลได้ของไตรกลีเซอไรด์ ดังรูปที่ 4.42 พบว่าค่าผลได้ของไตรกลีเซอไรด์ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ (มีค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5, 1 และ 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต อยู่ที่ร้อยละ 8.8, 12.4 และ 5.8 ซึ่งไม่แตกต่างจากเกณฑ์การยอมรับได้ที่ร้อยละ 10 มากนัก) เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตไม่มีความเลือกเกิดเป็นไตรกลีเซอไรด์ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งการเกิดไตรปาล์มมิเตตต้องเกิดจากการดูดซับของเมทิลปาล์มมิเตตถึงสามครั้งทำให้โอกาสในการเกิดน้อยมาก การเกิดปฏิกิริยาของไตรปาล์มมิเตตจากปริมาณพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงไปจึงไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตมีความเลือกเกิดต่อการเกิดโมโนปาล์มมิเตต ทำให้เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิเตตมีค่าสูงขึ้น ตรงข้ามกับค่าผลได้ของไดปาล์มมิเตตที่ลดต่ำลง ค่าผลได้ของไตรปาล์มมิเตตมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต เป็นค่าที่เพียงพอต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต

เมื่อพิจารณาค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิเตตและค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตต พบว่าที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต เส้นตรงของค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิเตตและค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตตไม่เป็นเส้นตรงเดียวกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 และ 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต โดยที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตตมีค่าผลได้ต่ำกว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 และ 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตตดังรูปที่ 4.43 ดังนั้นการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเพิ่มค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิเตตได้



รูปที่ 4.43 แสดงค่าผลได้ของโมนโนปาล์มมิทินและค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตต ของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต จากการแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.7 ศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต

การศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตจากกลไกการเกิดปฏิกิริยา ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.3 ในหัวข้อนี้จะศึกษาผลกระทบของค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต

4.7.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

ตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยการแปรผันอุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียม

พอสเฟต ร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที จากการคำนวณด้วยโปรแกรม excel

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา	190	210	230	245
	องศาเซลเซียส	องศาเซลเซียส	องศาเซลเซียส	องศาเซลเซียส
$k_{1f} \times 10^2$	2.35	3.71	7.82	9.58
$k_{1r} \times 10^2$	0.49	0.61	0.88	0.91
$k_{2f} \times 10^2$	0.58	1.03	1.68	1.86
$k_{2r} \times 10^2$	1.21	2.39	3.43	3.83
$k_{3f} \times 10^2$	0.97	0.86	1.45	0.93
$k_{3r} \times 10^2$	3.47	3.12	6.85	4.83
K_1	4.81	6.12	8.91	10.55
K_2	0.48	0.43	0.49	0.48
K_3	0.28	0.28	0.21	0.19

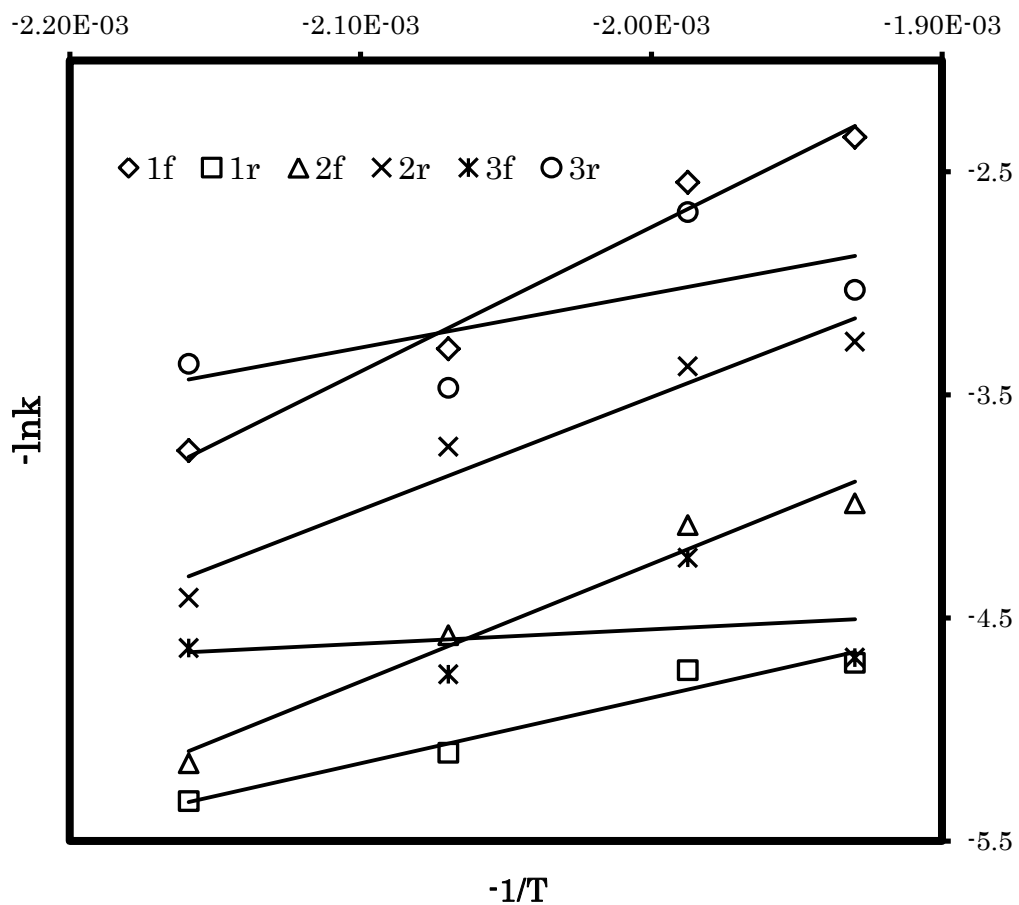
(ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยามีหน่วยคือลิตรกำลังสองต่อโมลต่อเวลาที่ต่อกรัมของตัวเร่งปฏิกิริยา)

$$K_1 = \frac{C_{MG}C_{MeOH}}{C_G C_{ME}} \quad (4.5)$$

$$K_2 = \frac{C_{DG}C_{MeOH}}{C_{MG}C_{ME}} \quad (4.6)$$

$$K_3 = \frac{C_{TG}C_{MeOH}}{C_{DG}C_{ME}} \quad (4.7)$$

จากค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอนพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้นตามทฤษฎีของอาร์เรเนียส ดังตารางที่ 4.2 ในแต่ละขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาพบว่าปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมพอสเฟตมีค่าเลือกเกิดต่อโมโนปาล์มมิตินมากที่สุด สังเกตจากค่า k_{1f} และค่า k_{2r} ที่มีค่ามาก เมื่อพิจารณาค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สมดุล โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนที่หนึ่งมีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สมดุลมากกว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนอื่น ดังนั้นความเข้มข้นของโมโนปาล์มมิตินเมื่อเข้าสู่สมดุลจึงมีปริมาณเหลืออยู่มากกว่าไดปาล์มมิตินและไตรปาล์มมิติน ดังสมการที่ 4.5 ถึง 4.7



รูปที่ 4.44 แสดงพลังงานการก่อกัมมันต์ (E_a) ของแต่ละขั้นตอนของอัตราการเกิดปฏิกิริยา กลีเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.3 แสดงพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส ที่ได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 4.44

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา	E_a/R (1/เคลวิน)	E_a (กิโลจูลต่อโมล)
k_{1f}	6475	53.83
k_{1r}	2936	24.41
k_{2f}	4866	40.46
k_{2r}	4498	37.40
k_{3f}	642	5.34
k_{3r}	2417	20.09

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยามีหน่วยคือลิตรยกกำลังสองต่อโมลต่อเวลาที่ต่อกรัมของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากตารางที่ 4.3 ค่าพลังงานการก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา k_{1f} , k_{2f} และ k_{2r} มีค่าสูง ประมาณ 44 กิโลจูลต่อโมล สามารถบอกได้ว่าผลกระทบของอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาขั้นที่ 1 ปฏิกิริยาการเกิดโมโนปาล์มมิติน อัตราการเกิดปฏิกิริยาขั้นที่ 2 ปฏิกิริยาการเกิดไดปาล์มมิติน และอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับขั้นที่ 2 ปฏิกิริยาการเกิดโมโนปาล์มมิตินจากไดปาล์มมิติน ในปริมาณมาก ปฏิกิริยาการเกิดไตรปาล์มมิติน เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ดี

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สมดุลสามารถบอกถึงปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาว่าเป็นปฏิกิริยาดูดหรือคายความร้อน จากสมการเทอร์โมไดนามิก

$$\ln \frac{K_{T_2}}{K_{T_1}} = -\frac{\Delta H_r}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (4.8)$$

จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเกิดโมโนปาล์มมิตินเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลมีค่าสูงขึ้น ค่าพลังงานในการเกิดปฏิกิริยามีค่าเป็นบวก ปฏิกิริยาในกลไกการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนแรกเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน กลไกการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนที่สองและสาม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเข้าสู่สมดุลมีค่าต่ำลง ค่าพลังงานในการเกิดปฏิกิริยามีค่าเป็นลบ ทำให้ปฏิกิริยาในกลไกการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนที่สองและสามเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังสมการที่ 4.8

4.7.2 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สมดุล โดยนิยามอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ดังสมการที่ 4.2) ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มิเตต อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มิเตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา	ร้อยละ 0.5 โดยมวล	ร้อยละ 1 โดยมวล	ร้อยละ 2 โดยมวล	ความแตกต่างอย่าง มีนัยสำคัญ
$k_{1f} \times 10^2$	10.11	9.58	8.65	0.08
$k_{1r} \times 10^2$	0.84	0.91	0.85	0.32
$k_{2f} \times 10^2$	2.29	1.86	1.26	0.24
$k_{2r} \times 10^2$	2.76	3.83	3.28	0.16
$k_{3f} \times 10^2$	0.69	0.93	0.63	0.40
$k_{3r} \times 10^2$	4.83	4.83	6.16	0.19
K_1	12.01	10.55	10.13	0.22
K_2	0.83	0.48	0.38	0.19
K_3	0.14	0.19	0.10	0.27

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยามีหน่วยคือลิตรยกกำลังสองต่อโมลต่อเวลาที่ต่อกรัมของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยนิยามอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา	ร้อยละ 0.5 โดย มวล	ร้อยละ 1 โดยมวล	ร้อยละ 2 โดย มวล
$k_{1f} \times 10^2$	3.41	4.88	7.56
$k_{1r} \times 10^2$	0.47	0.91	2.24
$k_{2f} \times 10^2$	0.55	1.18	2.45
$k_{2r} \times 10^2$	0.67	3.08	6.48
$k_{3f} \times 10^2$	0.20	0.67	1.44
$k_{3r} \times 10^2$	1.50	4.43	11.64

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยามีหน่วยคือลิตรต่อโมลต่อนาที

ตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่ในการลดพลังงานการก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา โดยจะเร่งแต่ละปฏิกิริยาไม่เท่ากันขึ้นกับความจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้น ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่ามากขึ้น ดังตารางที่ 4.5 แต่ถ้านิยามอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา(หารด้วยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาดังสมการที่ 4.2) ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของกลไกการเกิดปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนควรมีค่าเท่ากัน การทดลองในสภาวะที่ทำการทดลองโดยการแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 ถึง 2 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต พบว่าค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละกลไกการเกิดปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกัน สืบเนื่องจากค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่มีค่าไม่สูงมากนัก ดังตารางที่ 4.4

ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ทำให้สภาวะสมดุลของปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป ดังตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุล ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

4.7.3 ผลกระทบของอัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตตโดยโมลต่อค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สมดุล โดยนิยามอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 ถึง 3:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที

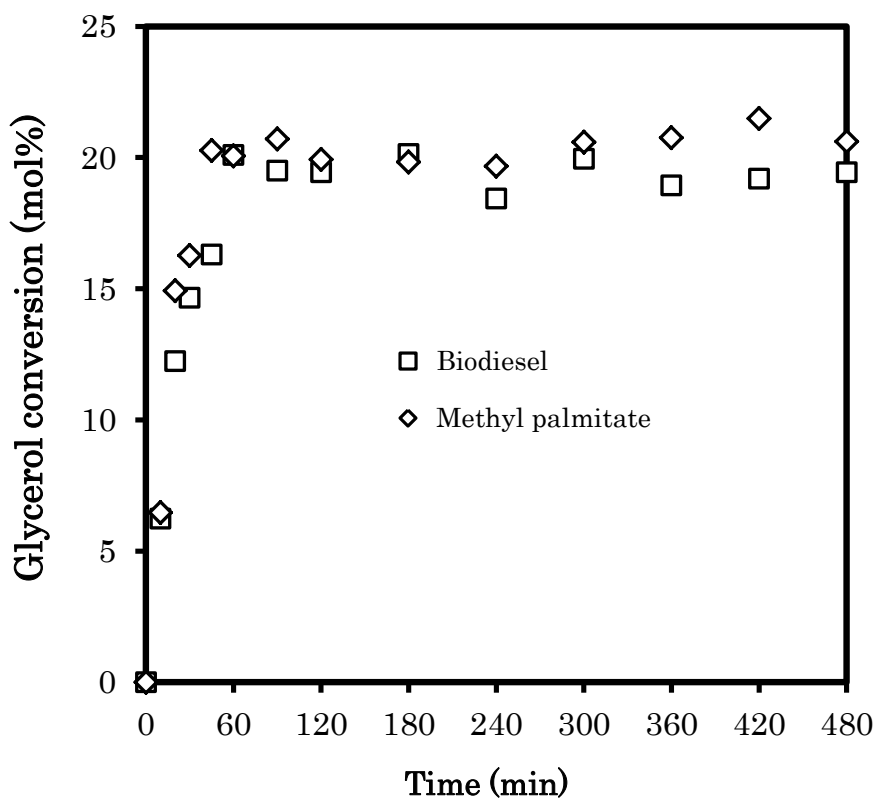
ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา	1:1	3:1	6:1	ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ
$k_{1f} \times 10^2$	9.58	11.19	12.94	0.04
$k_{1r} \times 10^2$	0.91	0.69	0.56	0.28
$k_{2f} \times 10^2$	1.86	1.46	1.64	0.09
$k_{2r} \times 10^2$	3.83	2.18	2.12	0.37
$k_{3f} \times 10^2$	0.93	1.20	1.26	0.12
$k_{3r} \times 10^2$	4.83	2.26	3.03	0.28
K1	10.55	16.12	23.07	0.24
K2	0.48	0.67	0.77	0.22
K3	0.19	0.53	0.42	0.12

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยามีหน่วยคือลิตรยกกำลังสองต่อโมลต่อนาทีต่อกรัมของตัวเร่งปฏิกิริยา

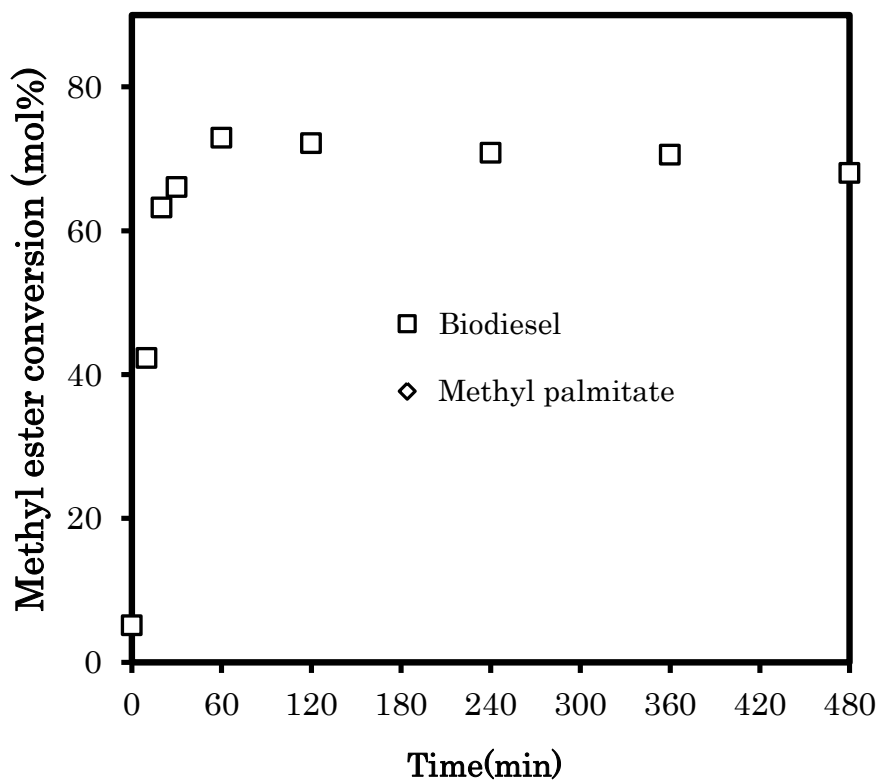
ความเข้มข้นของสารในระบบไม่ส่งผลกระทบต่อค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา เมื่ออัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตตเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อสภาวะสมดุลควรมีค่าเท่าเดิม ดังตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อสภาวะสมดุลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.8 ผลกระทบของชนิดสารตั้งต้นต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส

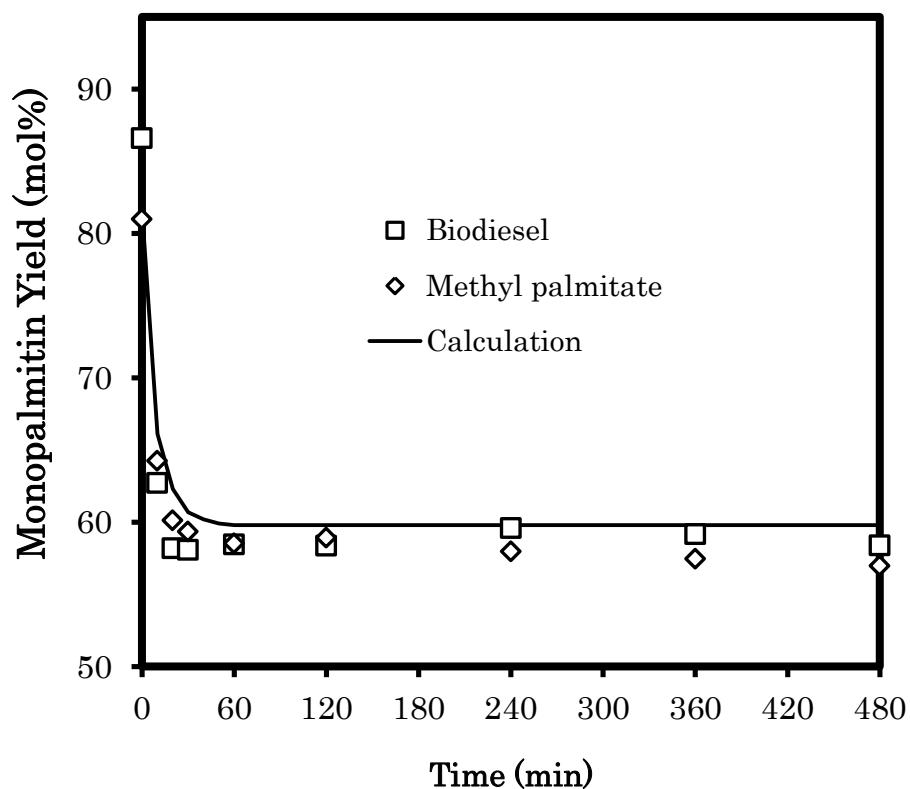
เมื่อทำการทดลองโดยใช้สารตั้งต้นไปโอติเซลที่มีวัตถุดิบคือน้ำมันปาล์มจากโรงงานน้ำมันพืชปทุม โดยมีปริมาณเมทิลปาล์มมีเตดร้อยละ 55 โดยมวล และปริมาณเมทิลโอเลอเตด ร้อยละ 40 โดยมวล สารที่เหลือคือเมทิลลิโนโอเลอเตดและเมทิลสเตียเรทซึ่งมีปริมาณไม่มากนัก การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดสารตั้งต้นต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส ทำการทดลองที่ อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมีเตด 3:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต ร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมีเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที มีผลการทดลองดังนี้



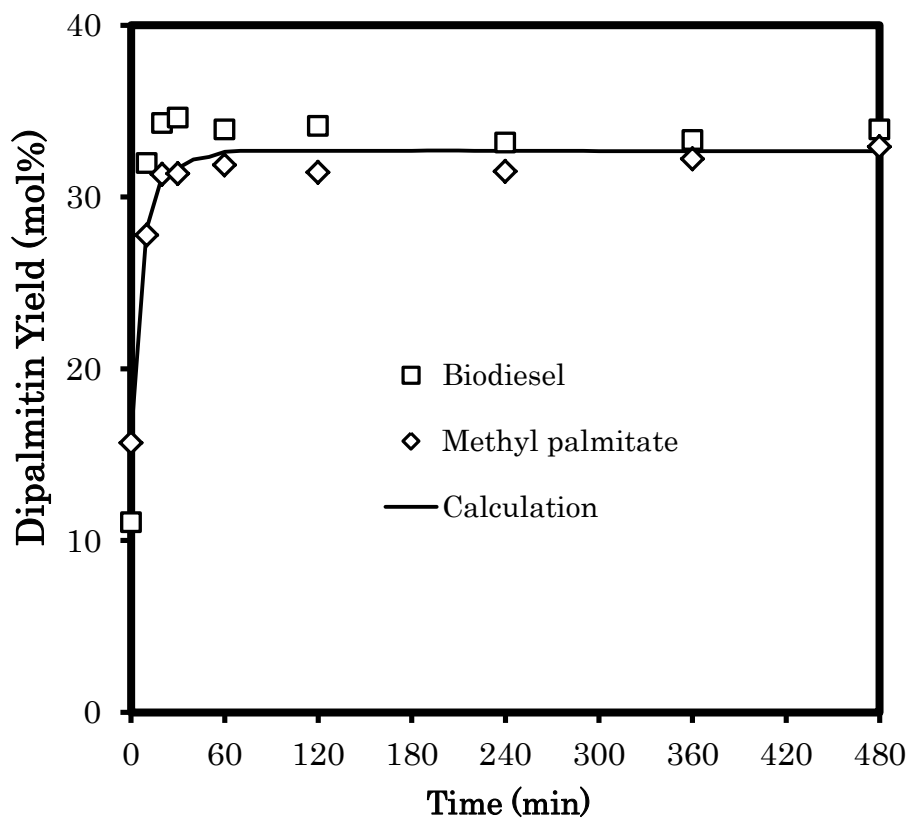
รูปที่ 4.45 แสดงผลกระทบของชนิดของสารตั้งต้นต่อค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมีเตด 3:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมีเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



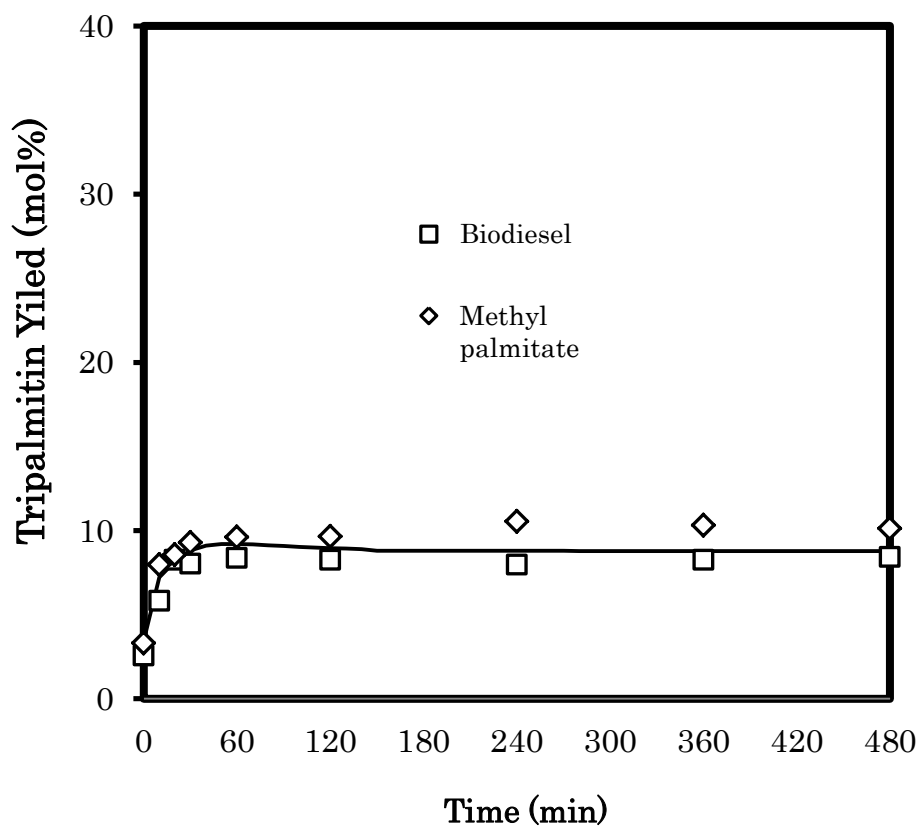
รูปที่ 4.46 แสดงผลกระทบบของชนิดของสารตั้งต้นต่อค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตตโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 3:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.47 แสดงผลกระทบของชนิดของสารตั้งต้นต่อค่าผลได้ของโมนอลปาล์มิตินโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มิเตต 3:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.48 แสดงผลกระทบบของชนิดของสารตั้งต้นต่อค่าผลได้ของไดปาล์มิตินโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มิเตต 3:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

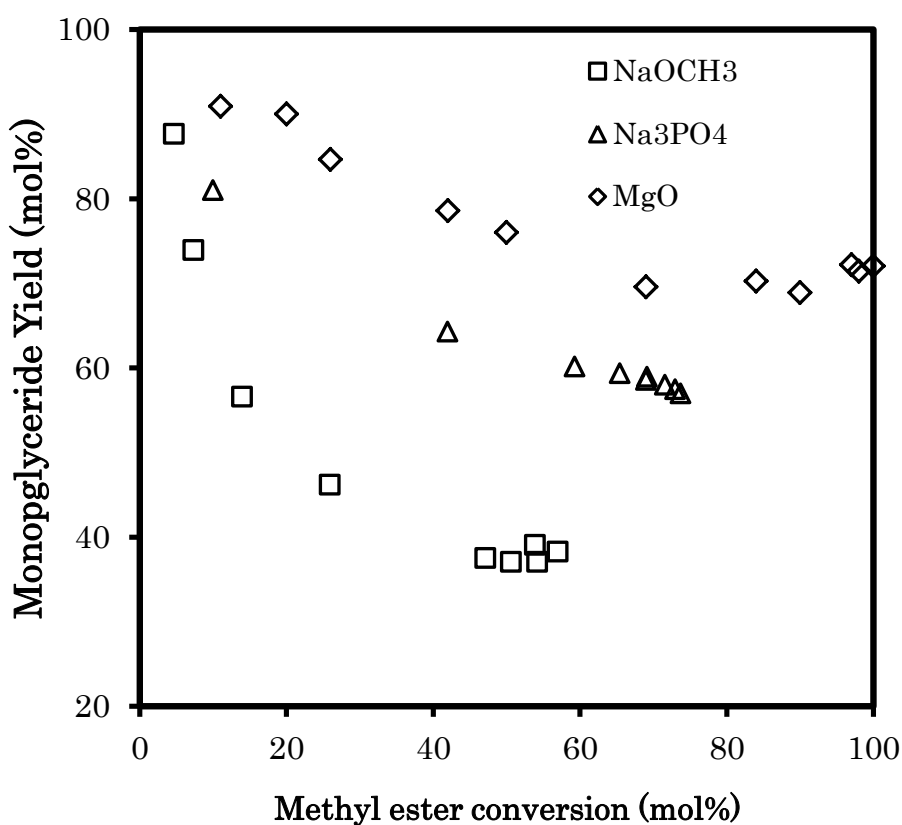


รูปที่ 4.49 แสดงผลกระทบของชนิดของสารตั้งต้นต่อค่าผลได้ของไตรปาล์มมิตินโดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 3:1 โดยโมล อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เมื่อเปรียบเทียบสารตั้งต้นไบโอดีเซลซึ่งเป็นสารผสมของเมทิลปาล์มมิเตตและเมทิลโอเลอเตตที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98.6 โดยมวล กับสารตั้งต้นเมทิลปาล์มมิเตตที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 โดยมวล ในสถานะที่ทำการทดลองที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตโมนอปาล์มมิติน พบว่าค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลและค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตตไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.45 และรูปที่ 4.42 อีกทั้งค่าผลได้ของโมนอปาล์มมิติน ไดปาล์มมิตินและไตรปาล์มมิติน ดังรูปที่ 4.47 ถึง รูปที่ 4.49 ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าแสดงผลกระทบของชนิดของสารตั้งต้นไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสมากนัก ดังนั้นในกระบวนการผลิตสามารถใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มซึ่งเป็นสารผสมในการผลิตโมนอกลิเซอไรด์ได้ โดยมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับสารบริสุทธิ์

4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อเปรียบเทียบค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิตินของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดภายใต้ค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตตเดียวกัน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวีธีพันธ์ มีค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิตินสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมเมทอกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ จึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตมีความเลือกเกิดต่อโมโนปาล์มมิตินมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมเมทอกไซด์ แต่เมื่อเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตกับตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวีธีพันธ์พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์มีความเลือกเกิดต่อโมโนปาล์มมิตินมากกว่าโซเดียมฟอสเฟต ดังรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.50 แสดงค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิตินต่อค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตต เมื่อเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตตสามารถเกิดได้ในสภาวะที่ทำการทดลอง การทดลองโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาสารตั้งต้นมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่ามากพอที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นในเวลาทำการทดลอง ผลกระทบของการนำเมทานอลออกจากวัฏภาคเมทิลปาล์มมีเตตเป็นตัวแปรสำคัญต่อการผลิตโมโนปาล์มมีตินในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต เนื่องจากการคำนวณด้วยโปรแกรม Aspen simulation ด้วยวิธี Minimization of Gibbs free energy ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับในปฏิกิริยาการเกิดโมโนปาล์มมีตินมีค่าสูงมาก การนำเมทานอลเป็นการทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น ถ้าไม่มีการนำเมทานอลออกจากระบบ จะไม่พบโมโนปาล์มมีตินในสภาวะสมดุล เมทานอลถูกแยกออกจากวัฏภาคเมทิลปาล์มมีเตตด้วยวัฏภาคกลีเซอรอลและผลกระทบของความดันในเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อสารตั้งต้นมีลักษณะเป็นอิมัลชันแบบกลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมีเตต การทดลองไม่นำเมทานอลออกจากระบบในเครื่องปฏิกรณ์มีความดันสูง เมทานอลอยู่ในวัฏภาคของเหลวทั้งหมด แต่เมทานอลถูกแยกออกจากวัฏภาคเมทิลปาล์มมีเตตด้วยวัฏภาคกลีเซอรอล การทดลองนำเมทานอลออกจากระบบส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมีเตตมีค่าสูงขึ้น ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น ทำให้ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมีตินของการทดลองไม่นำเมทานอลออกจากระบบมีค่าสูงที่สุด ค่าผลได้ของไดปาล์มมีตินของการทดลองนำเมทานอลออกจากเครื่องปฏิกรณ์สูงขึ้นเมื่อเมทานอลออกจากระบบมากขึ้น เมื่อปิดปั๊มสุญญากาศความดันในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าคงที่ ไอเมทานอลในวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลวอยู่ในสภาวะสมดุล โดยที่ยังมีปริมาณเมทานอลอยู่ในวัฏภาคเมทิลปาล์มมีเตตในทุกการทดลอง ทำให้พบปริมาณเมทิลปาล์มมีเตตที่สภาวะสมดุล เมื่อสารตั้งต้นมีลักษณะเป็นอิมัลชันแบบเมทิลปาล์มมีเตตในกลีเซอรอลเนื่องจากมีปริมาณกลีเซอรอลเหลืออยู่ในปริมาณมากทำให้ผลกระทบของการนำเมทานอลออกจากระบบไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต

เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ในสภาวะที่ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตตยังไม่เข้าสู่สภาวะสมดุล ค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลมีค่ามากขึ้น ค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมีเตตมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ กลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้นในการเกิดโมโนปาล์มมีตินตามกลไกการเกิดปฏิกิริยาเท่านั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตมีความเลือกเกิดต่อการเกิดโมโนปาล์มมีติน ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตตถูกรบกวนสภาวะสมดุลเนื่องจากเมทานอลถูกแยกออก

จากวัฏภาคเมทิลปาล์มมีเตต ทำให้เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นค่าผลได้ของโมโนปาล์มมีตินที่สถานะสมดุลมีค่าสูงขึ้น โดยที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมีเตต เป็นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพียงพอต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต

ความเร็วรอบที่ 800 รอบต่อนาที เป็นความเร็วรอบที่มากพอที่ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารระหว่างวัฏภาคของเหลวกับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตไม่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกลีเซอรอลและลายในวัฏภาคเมทิลปาล์มมีเตตได้มากขึ้น ค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลที่สถานะสมดุลจึงมีค่ามากขึ้น อุณหภูมิมีผลกระทบต่อค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สถานะสมดุลตามกลไกในการเกิดปฏิกิริยาจากการคำนวณพบว่าค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของโมโนปาล์มมีตินที่สถานะสมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของไดปาล์มมีตินที่สถานะสมดุลมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ และค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของไตรปาล์มมีตินที่สถานะสมดุลมีค่าลดลง ทำให้ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมีตินมีค่าสูงขึ้น ค่าผลได้ของไดปาล์มมีตินไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัย และค่าผลได้ของไตรปาล์มมีตินมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

การทดลองการแปรผันอัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมีเตต เมื่ออัตราส่วนสารตั้งต้นกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมีเตต 3:1 และ 6:1 โดยโมล ซึ่งมีลักษณะเป็นอิมัลชันแบบเมทิลปาล์มมีเตตในกลีเซอรอล เนื่องจากกลีเซอรอลไม่ได้เป็นวัฏภาคในการเกิดปฏิกิริยา กลีเซอรอลที่ล้อมรอบอิมัลชันเมทิลปาล์มมีเตตจะทำให้ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตตเกิดได้น้อยลง ค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมีเตตมีค่าลดลง เนื่องจากเมทิลปาล์มมีเตตเป็นสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง เมื่อค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมีเตตมีค่าลดลง ทำให้ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมีตินมีค่าสูงขึ้น

การศึกษาแบบจำลองทำให้การเลือกใช้กลไกการเกิดปฏิกิริยาเหมาะสมต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนและค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาในสถานะสมดุล ทำให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ไบโอดีเซลที่มีกระบวนการผลิตจากน้ำมันปาล์มสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ด้วยปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสแทนที่เมทิลปาล์มมีเตตซึ่งเปนสารบริสุทธิ์ได้ ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ในระดับอุตสาหกรรมได้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต

ก.1 คุณสมบัติของสารในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต

มวลโมเลกุลของเมทิลปาล์มมีเตต = 270.45 กรัมต่อโมล

ความหนาแน่นของเมทิลปาล์มมีเตตที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส = 0.8752 กรัมต่อ
ลูกบาศก์เซนติเมตร

มวลโมเลกุลของกลีเซอรอล = 92.09 กรัมต่อโมล

ความหนาแน่นของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส = 1.2161 กรัมต่อลูกบาศก์
เซนติเมตร

มวลโมเลกุลของโมนอปาล์มมีติน = 330.51 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของไดปาล์มมีติน = 568.90 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของไตรปาล์มมีติน = 807.34 กรัมต่อโมล

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าความหนาแน่นและความหนืดของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (เซลเซียส)	ความหนืด (มิลลิ ปาสคาล; เซนติพอยซ์)	อุณหภูมิ (เซลเซียส)	ความหนาแน่น (กรัมต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร)
80	32.18	99.5	1.2097
90	21.20	120	1.1945
100	14.60	140	1.1795
110	10.48	160	1.1644
120	7.80	180	1.1486
130	5.99	200	1.1318
140	4.73	240	1.0986
150	3.82	260	1.0827
158	3.28	280	1.0673
167	2.81	290	1.0597

ก.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ใช้ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มไมเตต

ปริมาณของสารตั้งต้นทั้งสองชนิดมีค่าคงที่ 800 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ ก.2 แสดงปริมาณสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มไมเตต

กลีเซอรอล ต่อเมทิล ปาล์มไมเตต โดยโมล	เมทิล ปาล์มไม เตต (กรัม)	กลีเซ อรอล (กรัม)	เมทิลปาล์ม ไมเตต (ลบ. ชม.)	กลีเซ อรอล (ลบ.ชม.)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมโซเดียมฟอสเฟต (กรัมต่อกรัมของเมทิล ปาล์มไมเตต)		
					0.5%	1%	2%
1:1	566.32	192.83	647.07	152.92	2.83	5.66	11.32
3:1	409.69	418.51	468.11	331.88	2.05	4.10	8.20
6:1	289.56	591.59	330.85	469.14	1.45	2.90	5.80

ภาคผนวก ข.

ผลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ผลกระทบของความเร็วยุโรปปั๊มต่อปริมาณกลีเซอรอลโดยมวลในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	ปริมาณกลีเซอรอลโดยมวล ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส				ปริมาณกลีเซอรอลโดยมวล ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส		
	200	400	600	800	400	600	800
0	69.73	20.95	19.82	20.59	21.19	21.09	20.95
10	60.75	16.92	13.10	13.40	20.21	17.73	17.45
20	12.26	13.51	10.41	10.36	18.41	16.69	16.21
30	4.92	8.87	8.64	8.36	17.30	14.50	14.78
45	4.96	7.18	6.48	6.33	15.83	13.82	12.99
60	4.60	4.99	4.76	5.23	15.69	12.85	12.53
90	4.75	4.73	4.99	4.97	14.32	12.58	12.02
120		4.43	3.86	4.46	13.38	12.22	11.82
180		4.80	5.15	4.84	13.67	12.26	11.91
240		4.57	4.57	4.06	13.39	11.98	11.90
300		4.21	3.86	4.87	13.26	12.13	12.08
360		4.61	4.61	4.92	13.50	12.00	12.04
420		4.38	4.38	4.87	13.30	12.10	11.63
480		4.21	4.21	4.96	13.60	11.80	11.63

ตารางที่ ข.2 ผลกระทบของความเร็วรอบใบพัดต่อค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลโดยโมลในปฏิกิริยา กลีเซอรอลไฮดรอกซิเมทิลปาล์มมิเตต อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	ปริมาณกลีเซอรอลโดยมวล ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส				ปริมาณกลีเซอรอลโดยมวล ที่ อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส		
	200	400	600	800	400	600	800
	0	0	0	0	0	0	0
10	10.32	19.22	33.89	34.93	4.67	15.95	16.59
20	81.91	35.53	47.49	49.67	13.17	20.88	22.44
30	92.74	57.67	56.39	59.42	18.47	31.26	29.21
45	92.68	65.75	67.30	69.26	25.43	34.49	37.72
60	93.22	76.19	75.99	74.59	26.07	39.08	39.90
90		77.43	74.81	75.88	32.61	40.34	42.32
120		78.88	80.51	78.33	37.05	42.06	43.26
180		77.09	74.02	76.48	35.66	41.87	42.81
240		78.18	76.94	80.27	36.98	43.23	42.86
300		79.91	80.51	76.34	37.61	42.49	42.04
360		78.01	76.76	76.09	36.47	43.11	42.22
420		79.11	77.92	76.35	37.42	42.64	44.17
480		79.91	78.77	75.91	36.00	44.06	44.16

ตารางที่ ข.3 ผลกระทบของความเร็รรอบใบพัดต่อค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	ค่าผลได้ของโมโนปาล์ม มิเตนโดยโมล		ค่าผลได้ของไดปาล์มมิเตน โดยโมล		ค่าผลได้ของไตรปาล์มมิเตน โดยโมล	
	600	800	600	800	600	800
0	77.29	76.96	17.96	17.03	4.75	6.00
10	66.24	62.53	26.32	31.96	7.44	5.51
20	60.28	60.31	32.50	34.28	7.23	5.41
30	55.10	59.82	35.80	34.70	9.10	5.48
45		57.55		36.62		5.83
60	51.82	55.88	38.33	37.58	9.84	6.54
90		51.33		40.19		8.48
120	51.73	52.55	37.91	39.00	10.37	8.45
180		53.12		38.49		8.38
240	51.71	52.16	37.39	39.37	10.90	8.47
300		50.53		40.20		9.27
360	51.01	50.98	37.63	39.77	11.36	9.24
420		49.95		40.50		9.55
480	51.44	51.15	37.64	39.52	10.92	9.33

ตารางที่ ข.4 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้น ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกลีเซอรอล (โมลต่อลิตร)				ความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมิเตต (โมลต่อลิตร)			
	190	210	230	245	190	210	230	245
0	2.28	2.19	2.12	2.14	2.08	2.05	2.07	2.08
10	2.03	1.71	1.56	1.42	1.94	1.83	1.45	1.22
20	1.80	1.39	1.31	1.07	1.74	1.42	1.01	0.85
30	1.60	1.30	1.09	0.89	1.46	1.03	0.78	0.64
45	1.50	1.18	0.99	0.66	1.22	0.93	0.60	0.37
60	1.39	1.10	0.91	0.54	1.10	0.85	0.53	0.28
90	1.29	1.04	0.89	0.54	1.00	0.81	0.47	0.30
120	1.29	1.05	0.86	0.48	0.95	0.74	0.49	0.27
180	1.26	1.12	0.93	0.49	0.81	0.77	0.53	0.36
240	1.29	1.06	0.96	0.42	0.84	0.79	0.57	0.37
300	1.34	1.08	0.90	0.50	1.00	0.76	0.55	0.37
360	1.33	1.10	0.86	0.53	0.92	0.66	0.56	0.31
420	1.23	1.07	0.88	0.52	1.03	0.74	0.62	0.36
480	1.26	1.14	0.89	0.53	0.93	0.77	0.62	0.24

ตารางที่ ข.5 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าการเปลี่ยนของสารตั้งต้น ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	ความการเปลี่ยนของกลีเซอรอล (ร้อยละโมล)				ความการเปลี่ยนของกลีเซอรอลเมทิล ปาล์มมิเตต (ร้อยละโมล)			
	190	210	230	245	190	210	230	245
	0	0	0	0	0	0.75	1.87	1.00
10	9.66	19.31	25.74	34.93	7.29	12.46	30.88	41.75
20	17.03	32.43	39.51	49.67	16.69	28.93	51.88	59.21
30	27.32	40.16	48.82	59.42	30.16	48.73	62.56	69.44
45	32.04	43.06	55.40	69.26	41.69	54.51	71.16	77.46
60	38.64	49.26	57.05	74.59	47.24	59.40	74.80	82.83
90	39.68	50.56	59.68	75.88	52.05	61.31	77.62	84.41
120	42.54	51.25	59.61	78.33	54.78	64.50	76.37	87.11
180	39.17	49.02	58.59	76.48	61.14	63.11	74.62	82.83
240	40.22	50.90	56.25	80.27	60.12	62.21	72.97	82.28
300	37.26	51.20	57.63	76.34	52.34	63.68	73.75	82.25
360	40.24	48.12	60.31	76.09	56.01	68.64	73.24	84.99
420	43.15	50.67	59.91	76.35	51.05	64.60	70.47	82.66
480	41.86	45.39	56.78	75.91	55.69	63.05	70.29	88.40

ตารางที่ ข.6 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส เมทิลปาล์มมิเตต ที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิเตน(ร้อยละ โดยโมล)				ค่าผลได้ของไดปาล์มมิเตน (ร้อยละโดยโมล)				ค่าผลได้ของไตรปาล์มมิเตน (ร้อยละโดยโมล)			
	190	210	230	245	190	210	230	245	190	210	230	245
0	91.91	69.62	82.45	76.96	6.67	26.96	10.08	17.03	1.41	3.42	7.46	6.00
10	70.44	61.89	56.58	62.53	28.22	30.64	36.36	31.96	1.34	7.47	7.06	5.51
20	57.26	54.17	53.97	59.33	36.09	34.71	36.16	34.94	6.65	11.12	9.87	5.73
30	51.73	49.86	54.03	57.07	40.00	35.21	35.40	36.01	8.27	14.93	10.58	6.92
45	50.15	47.03	51.86	55.87	38.27	37.46	36.49	35.46	11.58	15.51	11.66	8.67
60	48.91	46.27	50.99	54.17	39.07	39.10	37.42	36.85	12.02	14.62	11.59	8.99
90	47.26	47.85	51.13	52.91	36.64	37.33	37.08	38.36	16.10	14.82	11.79	8.74
120	45.00	46.98	50.73	52.85	39.57	38.01	38.64	38.61	15.43	15.01	10.63	8.54
180	42.82	47.95	48.52	52.30	43.58	37.11	39.94	39.28	13.60	14.94	11.54	8.42
240	47.32	49.16	48.83	52.80	37.45	36.40	40.44	39.99	15.23	14.44	10.74	7.21
300	44.92	48.93	48.49	53.07	38.73	36.63	41.78	38.75	16.35	14.44	9.74	8.18
360	47.37	47.55	47.88	51.02	34.45	37.36	41.47	40.65	18.18	15.09	10.64	8.33
420	47.89	48.42	46.02	51.51	36.45	37.21	43.58	39.05	15.66	14.37	10.40	9.44
480	42.47	46.42	42.78	49.53	38.78	40.42	43.91	39.50	18.76	13.16	13.31	10.96

ตารางที่ ข.7 ผลกระทบของอัตราส่วนการป้อนของสารตั้งต้นต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ถูกใช้ ไปในการเกิดปฏิกิริยา (โมลต่อลิตร)			ความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมิเตตที่ ถูกใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยา (โมลต่อลิตร)		
	1:1	3:1	6:1	1:1	3:1	6:1
	0	0	0	0	0.01	0.16
10	0.59	0.27	0.27	0.87	0.64	0.49
20	0.84	0.61	0.44	1.24	0.90	0.61
30	1.01	0.67	0.53	1.45	0.99	0.73
45	1.18	0.83	0.57	1.62		
60	1.27	0.83	0.62	1.73	1.05	0.77
90	1.29	0.85	0.63	1.77		
120	1.33	0.82	0.68	1.82	1.05	0.80
180	1.30	0.82	0.67	1.73		
240	1.36	0.81	0.66	1.72	1.08	0.79
300	1.30	0.85	0.67	1.72		
360	1.29	0.85	0.63	1.78	1.11	0.79
420	1.30	0.88	0.64	1.73		
480	1.29	0.85	0.60	1.85	1.12	0.78

ตารางที่ ข.8 ผลกระทบของอัตราส่วนการป้อนของสารตั้งต้นต่อค่าการเปลี่ยนของสารตั้งต้น ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	ค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอล (ร้อยละโดยมวล)			ค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตต (ร้อยละโดยมวล)		
	1:1	3:1	6:1	1:1	3:1	6:1
	0	0	0	0	0.71	10.70
10	34.93	4.56	6.46	41.75	41.96	45.46
20	49.67	7.27	14.92	59.21	59.27	57.41
30	59.42	8.83	16.26	69.44	65.41	68.29
45	69.26	9.53	20.26	77.46		
60	74.59	10.23	20.07	82.83	68.99	71.82
90	75.88	10.44	20.70	84.41		
120	78.33	11.34	19.93	87.11	69.13	74.70
180	76.48	11.18	19.83	82.83		
240	80.27	11.00	19.68	82.28	71.57	74.19
300	76.34	11.22	20.59	82.25		
360	76.09	10.49	20.76	84.99	72.97	73.41
420	76.35	10.68	21.48	82.66		
480	75.91	9.90	20.61	88.40	73.72	72.48

ตารางที่ ข.9 ผลกระทบอัตราส่วนการป้อนของสารตั้งต้นต่อค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยโมล ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมีเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	ค่าผลได้ของโมโนปาล์ม			ค่าผลได้ของไดปาล์มมีติน			ค่าผลได้ของไตรปาล์ม		
	มีตินโดยโมล			โดยโมล			มีตินโดยโมล		
	1:1	3:1	6:1	1:1	3:1	6:1	1:1	3:1	6:1
0	76.96	75.39	71.55	17.03	19.47	24.94	6.00	5.14	4.22
10	62.53	64.25	64.12	31.96	27.78	30.15	5.51	7.97	6.87
20	59.33	60.13	61.64	34.94	31.31	31.30	5.73	8.56	8.47
30	57.07	59.36	60.38	36.01	31.36	32.30	6.92	9.29	8.78
45	55.87			35.46			8.67		
60	54.17	58.53	59.19	36.85	31.86	32.76	8.99	9.61	9.66
90	52.91			38.36			8.74		
120	52.85	58.93	59.78	38.61	31.43	32.59	8.54	9.64	9.15
180	52.30			39.28			8.42		
240	52.80	57.98	59.43	39.99	31.49	33.20	7.21	10.53	8.84
300	53.07			38.75			8.18		
360	51.02	57.46	59.51	40.65	32.22	33.06	8.33	10.32	8.92
420	51.51			39.05			9.44		
480	49.53	56.96	59.23	39.50	32.92	33.79	10.96	10.12	8.38

ตารางที่ ข.10 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้น ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกลีเซอรอล (โมลต่อ ลิตร)			ความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมิเตต (โมลต่อลิตร)		
	0.5%	1%	2%	0.5%	1%	2%
0	2.20	2.14	2.00	2.50	2.60	2.50
10	1.60	1.42	1.32	1.58	1.52	1.18
20	1.19	1.07	0.86	1.03	1.07	0.77
30	0.98	0.89	0.55	0.66	0.80	0.72
45	0.80	0.66	0.46		0.46	
60	0.75	0.54	0.49	0.43	0.46	0.36
90	0.60	0.54	0.43		0.46	
120	0.62	0.48	0.46	0.40	0.45	0.37
180	0.60	0.49	0.45		0.45	
240	0.60	0.42	0.48	0.38	0.46	0.43
300	0.59	0.50	0.45		0.46	
360	0.65	0.53	0.48	0.40	0.39	0.51
420	0.65	0.52	0.48		0.45	
480	0.70	0.53	0.52	0.43	0.30	0.50

ตารางที่ ข.11 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าการเปลี่ยนของสารตั้งต้น ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที่)	ค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอล (ร้อยละโดยโมล)			ค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตต (ร้อยละโดยโมล)		
	1:1	3:1	6:1	1:1	3:1	6:1
	0	0	0	0	0.71	10.70
10	25.02	34.93	37.05	41.75	41.96	45.46
20	46.39	49.67	60.64	59.21	59.27	57.41
30	55.25	59.42	74.61	69.44	65.41	68.29
45	63.89	69.26	78.44	77.46		
60	67.10	74.59	77.10	82.83	68.99	71.82
90	72.65	75.88	79.50	84.41		
120	72.38	78.33	78.97	87.11	69.13	74.70
180	73.40	76.48	79.24	82.83		
240	72.64	80.27	78.82	82.28	71.57	74.19
300	73.56	76.34	79.30	82.25		
360	71.89	76.09	78.28	84.99	72.97	73.41
420	72.75	76.35	78.95	82.66		
480	71.48	75.91	77.96	88.40	73.72	72.48

ตารางที่ ข.12 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมีเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมีเตต 1:1 โดยโมล ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	ค่าผลได้ของเมโนปาล์ม มีเตต(ร้อยละโดยโมล)			ค่าผลได้ของไดปาล์มมีเตน (ร้อยละโดยโมล)			ค่าผลได้ของไตรปาล์มมีเตน (ร้อยละโดยโมล)		
	0.5%	1%	2%	0.5%	1%	2%	0.5%	1%	2%
	0	76.77	76.96	77.77	22.87	17.03	21.77	0.36	6.00
10	60.95	62.53	59.93	35.48	31.96	33.48	3.57	5.51	6.59
20	54.53	59.33	57.57	40.18	34.94	37.01	5.29	5.73	5.42
30	50.41	57.07	56.84	42.64	36.01	37.00	6.95	6.92	6.16
45		55.87			35.46			8.67	
60	48.34	54.17	53.16	45.46	36.85	39.54	6.19	8.99	7.30
90		52.91			38.36			8.74	
120	48.09	52.85	52.51	44.90	38.61	39.98	7.01	8.54	7.51
180		52.30			39.28			8.42	
240	46.00	52.80	51.90	47.12	39.99	39.81	6.88	7.21	8.29
300		53.07			38.75			8.18	
360	47.15	51.02	52.11	45.69	40.65	40.53	7.15	8.33	7.36
420		51.51			39.05			9.44	
480	47.39	49.53	51.95	45.98	39.50	40.41	6.63	10.96	7.64

ตารางที่ ข.13 ผลกระทบของการไม่นำเมทานอลออกจากระบบและการนำเมทานอลออกจากระบบ ต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้น ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกลีเซอรอล (โมลต่อ ลิตร)			ความเข้มข้นของเมทิลปาล์มมิเตต (โมล ต่อลิตร)		
	ไม่นำเมทานอล ออกจากระบบ	นำเมทานอล ออกจาก ระบบ 1 ชั่วโมง	นำเมทานอล ออกจาก ระบบ 8 ชั่วโมง	ไม่นำเมทานอล ออกจาก ระบบ	นำเมทานอล ออกจาก ระบบ 1 ชั่วโมง	นำเมทานอล ออกจาก ระบบ 8 ชั่วโมง
0	2.29	2.14	2.04	2.30	2.60	2.55
10	1.66	1.42	1.51	1.47	1.52	1.59
20	1.36	1.07	1.20	1.17	1.07	1.17
30	1.29	0.89	1.04	1.06	0.90	0.96
45	1.14	0.66	0.85		0.65	
60	0.98	0.54	0.70	0.91	0.55	0.78
90	0.98	0.54	0.60		0.48	
120	0.99	0.48	0.57	0.97	0.44	0.58
180	1.06	0.49	0.44		0.45	
240	1.05	0.42	0.47	0.95	0.46	0.35
300	0.95	0.50	0.29		0.46	
360	1.05	0.53	0.25	1.00	0.39	0.11
420	1.00	0.52	0.21		0.45	
480	1.02	0.53	0.22	1.02	0.30	0.10

ตารางที่ ข.14 ผลกระทบของการไม่นำเมทานอลออกจากระบบและการนำเมทานอลออกจากระบบ ต่อค่าการเปลี่ยนของสารตั้งต้น ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอล (ร้อยละโดย โมล)			ค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มิเตต(ร้อยละ โดยโมล)		
	ไม่นำเมทานอล ออกจากระบบ	นำเมทานอล ออกจาก ระบบ 1 ชั่วโมง	นำเมทานอล ออกจาก ระบบ 8 ชั่วโมง	ไม่นำเมทานอล ออกจาก ระบบ	นำเมทานอล ออกจาก ระบบ 1 ชั่วโมง	นำเมทานอล ออกจาก ระบบ 8 ชั่วโมง
0	0	0	0	7.01	0.71	2.77
10	24.53	34.93	23.23	43.00	41.75	40.28
20	38.78	49.67	40.09	64.47	59.21	56.79
30	42.34	59.42	47.76	60.99	69.44	65.24
45	46.20	69.26	57.90		77.46	
60	53.16	74.59	64.58	67.44	82.83	68.04
90	54.66	75.88	69.33		84.41	
120	53.29	78.33	73.34	65.08	87.11	80.03
180	52.72	76.48	75.94		82.83	
240	53.12	80.27	79.77	65.78	82.28	89.00
300	53.48	76.34	85.77		82.25	
360	54.69	76.09	87.68	63.65	84.99	98.44
420	54.93	76.35	89.06		82.66	
480	55.13	75.91	89.72	62.56	88.40	98.79

ตารางที่ ข.15 ผลกระทบของการไม่นำเมทานอลออกจากระบบและการนำเมทานอลออกจากระบบ ต่อค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที

เวลา นาที	ค่าผลได้ของโมโนปาล์มมิเตนโดย โมล			ค่าผลได้ของไดปาล์มมิเตนโดย โมล			ค่าผลได้ของไตรปาล์มมิเตน โดยโมล		
	ไม่นำเม ทานอล ออกจาก จาก ระบบ	นำเมทา นอล ออกจาก จาก ระบบ 1 ชั่วโมง	นำเมทา นอลออกจาก จาก ระบบ 8 ชั่วโมง	ไม่นำเม ทานอล ออกจาก จาก ระบบ	นำเมทา นอล ออกจาก จาก ระบบ 1 ชั่วโมง	นำเมทา นอล ออกจาก จาก ระบบ 8 ชั่วโมง	ไม่นำ เมทา นอล ออกจาก ระบบ	นำเมทา นอล ออกจาก จาก ระบบ 1 ชั่วโมง	นำเม ทานอล ออกจาก จาก ระบบ 8 ชั่วโมง
0	79.56	76.96	76.40	18.49	39.50	22.19	1.95	6.00	1.41
10	64.02	62.53	59.17	31.42	31.96	34.02	4.56	5.51	6.82
20	59.54	59.33	59.00	34.51	34.94	33.03	5.94	5.73	7.98
30	59.91	57.07	56.89	34.65	36.01	35.08	5.44	6.92	8.03
45		55.87			35.46			8.67	
60	59.64	54.17	53.69	33.90	36.85	37.58	6.46	8.99	8.72
90		52.91			38.36			8.74	
120	58.56	52.85	50.43	34.33	38.61	38.78	7.10	8.54	10.79
180		52.30			39.28			8.42	
240	57.39	52.80	47.60	35.24	39.99	40.66	7.37	7.21	11.74
300		53.07			38.75			8.18	
360	56.88	51.02	45.61	34.83	40.65	41.81	8.29	8.33	12.58
420		76.96			39.05			8.44	
480	56.42	62.53	39.81	35.61	39.50	45.39	7.97	8.96	14.80

ตารางที่ ข.16 ผลกระทบของชนิดของสารตั้งต้นต่อค่าการเปลี่ยนของสารตั้งต้นในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา(นาที)	ค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอล (ร้อยละโดยโมล)		ค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตต (ร้อยละโดยโมล)	
	เมทิลปาล์มมิเตต	ไบโอดีเซล	เมทิลปาล์มมิเตต	ไบโอดีเซล
	0	0	0	10.70
10	6.46	6.23	41.96	42.29
20	14.92	12.24	59.27	63.22
30	16.26	14.66	65.41	66.05
45	20.26	16.30		
60	20.07	20.10	68.99	72.90
90	20.70	19.50		
120	19.93	19.44	69.13	72.17
180	19.83	20.14		
240	19.68	18.44	71.57	70.81
300	20.59	19.95		
360	20.76	18.94	72.97	70.54
420	21.48	19.19		
480	20.61	19.44	73.72	68.01

ตารางที่ ข.17 ผลกระทบของชนิดของสารตั้งต้นต่อค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมีเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยมวลของเมทิลปาล์มมีเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที นำเมทานอลออกจากระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	ค่าผลได้ของโมนوپาล์ม มีติน (ร้อยละโดยโมล)		ค่าผลได้ของไดปาล์ม มีติน (ร้อยละโดยโมล)		ค่าผลได้ของไตรปาล์ม มีติน (ร้อยละโดยโมล)	
	เมทิล ปาล์มมีเตต	ไบโอดีเซล	เมทิล ปาล์มมี เตต	ไบโอดีเซล	เมทิล ปาล์มมี เตต	ไบโอดีเซล
	0	75.39	86.59	19.47	11.07	5.14
10	64.25	62.73	27.78	31.98	7.97	5.83
20	60.13	58.18	31.31	34.31	8.56	8.26
30	59.36	58.09	31.36	34.61	9.29	8.03
60	58.53	58.45	31.86	33.93	9.61	8.38
120	58.93	58.37	31.43	34.13	9.64	8.25
240	57.98	59.58	31.49	33.16	10.53	7.98
360	57.46	59.18	32.22	33.32	10.32	8.26
480	56.96	58.40	32.92	33.93	10.12	8.44

ภาคผนวก ค.

การคำนวณปริมาณสาร

ค.1 การคำนวณปริมาณกลีเซอรอลตามมาตรฐานของ BS5711

จากมาตรฐานการคำนวณปริมาณกลีเซอรอล BS5711(วิธีการวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลแสดงในหัวข้อ 3.3) มีสูตรการคำนวณปริมาณกลีเซอรอลโดยมวลดังนี้

$$\text{Glycerol content(wt\%)} = 1.151 \frac{(V_s - V_b)}{g}$$

1.151 คือค่าคงที่ซึ่งมาจาก $\frac{\text{NaOH conc.}(\frac{\text{mol}}{\text{dm}^3}) * \text{MW}_G(\frac{\text{g}}{\text{mol}}) * 100}{1000(\frac{\text{dm}^3}{\text{cm}^3})}$ จากวิธีการวิเคราะห์ใน

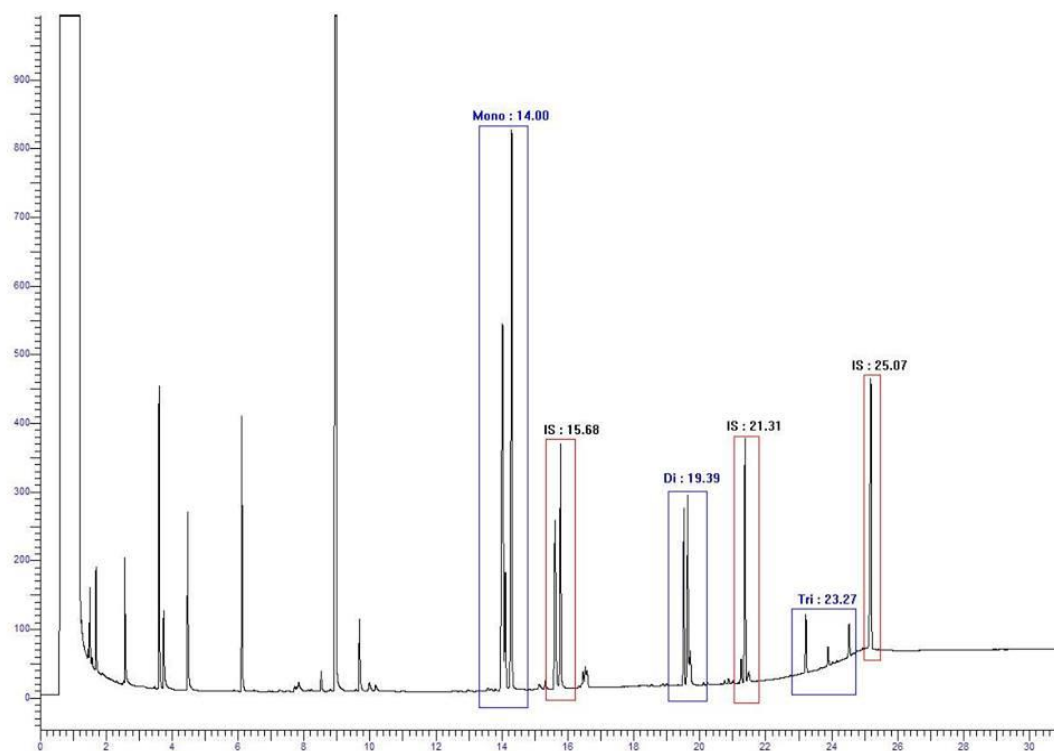
หัวข้อ 3.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้น 0.125 โมลต่อลิตร กลีเซอรอลมีมวลโมเลกุล 92.09 ค่าคงที่จึงมีค่าเท่ากับ 1.151

V_s , V_b คือปริมาตรจากการไทเทรตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในหัวข้อ 3.3 ของสารตัวอย่าง และของสารเปล่า ตามลำดับ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

g คือปริมาณสารตัวอย่าง (กรัม)

ค.2 การคำนวณปริมาณสารผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีอุณหภูมิสูง

การคำนวณโมนोปาล์มมิติน ไดปาล์มมิติน และไตรปาล์มมิตินมีสารมาตรฐานคือกลีเซอรอล โมนอนาโนเดคาโนเอต (mono C19) กลีเซอรอลไดนาโนเดคาโนเอต (di C38) กลีเซอรอลไตรนาโนเดคาโนเอต (tri C57) ดังวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.4



รูปที่ ค.1แสดงโครมาโทแกรมของการทดลองในสถานะไม่นำเมทานอลออกจากระบบที่เวลา 8 ชั่วโมง อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มไมเตด 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต 1 ร้อยละโดยมวลของเมทิลปาล์มไมเตด ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที

จากรูปที่ ค.1 พบว่ากราฟของโมปาล์มมิติดิน ไดปาล์มมิติดิน และไตรปาล์มมิติดินเกิดขึ้นที่เวลา 14.00, 19.39 และ 23.27 นาทีตามลำดับ และกราฟของสารมาตรฐาน กลีเซอรอลโมโนนาโนเดคาโนเอต (mono C19) กลีเซอรอลไดนาโนเดคาโนเอต (di C38) กลีเซอรอลไตรนาโนเดคาโนเอต (tri C57) เกิดขึ้นที่เวลา 15.68, 21.31 และ 25.07 นาทีตามลำดับ

สมการในการหา ร้อยละโดยมวลของ โมโนปาล์มมิติน , ไดปาล์มมิตินและไตรปาล์มมิติน คือ

$$\% \text{Mono} = \left(\frac{A_M}{A_{C19}} \right) \times \left(\frac{M_{C19}}{m} \right) \times 100 \quad (\text{จ.1})$$

$$\% \text{Di} = \left(\frac{A_D}{A_{C38}} \right) \times \left(\frac{M_{C38}}{m} \right) \times 100 \quad (\text{จ.2})$$

$$\% \text{Tri} = \left(\frac{A_T}{A_{C57}} \right) \times \left(\frac{M_{C57}}{m} \right) \times 100 \quad (\text{จ.3})$$

จากสมการ จ.1-3 เปลี่ยนรูปแบบสมการใหม่เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้นดังนี้

$$\% \text{Mono} = \left(\frac{A_M}{A_{C19}} \right) \times \left(\frac{C_{C19} \cdot V_{C19}}{C_S \cdot V_S} \right) \times 100 \quad (\text{จ.4})$$

$$\% \text{Di} = \left(\frac{A_D}{A_{C38}} \right) \times \left(\frac{C_{C38} \cdot V_{C38}}{C_S \cdot V_S} \right) \times 100 \quad (\text{จ.5})$$

$$\% \text{Tri} = \left(\frac{A_T}{A_{C57}} \right) \times \left(\frac{C_{C57} \cdot V_{C57}}{C_S \cdot V_S} \right) \times 100 \quad (\text{จ.6})$$

เมื่อ	A_M, A_D, A_T	คือ	พื้นที่พีคของกลุ่มโมปาล์มมิติน ไดปาล์มมิติน และไตรปาล์มมิตินตามลำดับ
	A_{C19}	คือ	พื้นที่กราฟของสารมาตรฐาน (Internal standard Mono C19)
	A_{C38}	คือ	พื้นที่กราฟของสารมาตรฐาน (Internal standard Di C38)
	A_{C57}	คือ	พื้นที่กราฟของสารมาตรฐาน (Internal standard Tri C57)
	M_{C19}	คือ	น้ำหนักของ สารมาตรฐาน (มิลลิกรัม) (Internal standard Mono C19)
	M_{C38}	คือ	น้ำหนักของ สารมาตรฐาน (มิลลิกรัม) (Internal standard Di C38)

M_{C57}	คือ	น้ำหนักของสารมาตรฐาน (มิลลิกรัม) (Internal standard Tri C57)
m	คือ	น้ำหนักของสารตัวอย่าง (mg)
$C_{C19}, C_{C38}, C_{C57}$	คือ	ความเข้มข้นของ Internal standard Mono C19, Di C38 และ Tri C37 (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
$V_{C19}, V_{C38}, V_{C57}$	คือ	ปริมาตรของ Internal standard Mono C19, Di C38 และ Tri C37 (มิลลิลิตร)
C_S, V_S	คือ	ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) และ ปริมาตรของสารตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

จากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรมในรูปที่ ง.1 พบว่าโมนิโนปาล์มมิติน ไดปาล์มมิติน และไตรปาล์มมิตินมีพื้นที่ใต้กราฟ 4458691, 1367082 และ 375367 ตามลำดับ พื้นที่ใต้กราฟของสารมาตรฐาน

ตารางที่ ค.1 แสดงปริมาณโมนิโนปาล์มมิติน ไดปาล์มมิติน และไตรปาล์มมิตินโดยมวล ในสถานะไม่นำเมทานอลออกจากระบบที่เวลา 8 ชั่วโมง อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต 1 ร้อยละโดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที

สารที่ ต้อง การวัด	พื้นที่ใต้ กราฟของ ปาล์มมิติน	พื้นที่ใต้ กราฟของ สาร มาตรฐาน	ความเข้มข้น ของสาร มาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อ มิลลิลิตร)	ปริมาตร ของสาร มาตรฐาน (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น ของสาร ตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อ มิลลิลิตร)	ปริมาตร ของสาร ตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ร้อยละ โดย มวล
โมนิโน	4458691	1533950	0.4	0.3	12.5	0.1	27.30
ได	1367082	862761	0.4	0.3	12.5	0.1	14.83
ไตร	375367	1124997	0.4	0.3	12.5	0.1	3.14

จากการคำนวณในสมการที่ ง.4-6 เมื่อแทนค่าพื้นที่ใต้กราฟของโมนอปาล์มมิดิน ไตปาล์ม มิดิน และไตรปาล์มมิดิน และสารมาตรฐาน รวมถึงความเข้มข้นของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะได้ ปริมาณไตปาล์มมิดิน และไตรปาล์มมิดินโดยมวล 27.30, 14.83 และ 3.14โดยมวลตามลำดับ

ค.3 การคำนวณปริมาณเมทิลปาล์มมิเตตที่เหลืออยู่ในเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต

ตารางที่ ค.2 แสดงปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในการทดลอง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมลปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต 1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ร้อยละโดย มวลที่ได้จากการคำนวณด้วยเครื่อง แก๊สโครมาโทกราฟี			ฐานการคำนวณ ในวัฏภาค เมทิลปาล์มมิเตต	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์(โมล) จาก ฐานการคำนวณใน วัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตต		
	โมนอ ปาล์ม มิดิน	ได ปาล์ม มิดิน	ไตร ปาล์ม มิดิน		โมนอ ปาล์ม มิดิน	ได ปาล์ม มิดิน	ไตร ปาล์ม มิดิน
0	0.63	0.12	0.04	602.83	0.01	0.00	0.00
10	27.48	12.09	1.97	657.43	0.55	0.14	0.02
20	35.73	18.11	2.81	680.47	0.74	0.22	0.02
30	39.42	21.41	3.89	695.71	0.83	0.26	0.03
45	42.12	27.01	5.32	711.10	0.91	0.34	0.04
60	43.16	28.27	5.83	719.43	0.94	0.36	0.05
90	42.84	27.73	5.76	721.44	0.94	0.35	0.05
120	43.93	27.62	5.78	725.28	0.96	0.35	0.05
180	41.50	26.83	5.44	722.39	0.91	0.34	0.05
240	41.28	26.91	4.59	728.31	0.91	0.34	0.04
300	41.83	26.29	5.25	722.16	0.91	0.33	0.05
360	41.58	28.51	5.53	721.77	0.91	0.36	0.05
420	40.80	26.62	6.09	722.19	0.89	0.34	0.05
480	42.00	28.83	7.57	721.49	0.91	0.37	0.06

ในการวัดปริมาณสารผลิตภัณฑ์ซึ่งอยู่ในวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตต วัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตตมี ปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากกลีเซอรอลละลายข้ามวัฏภาคมายังวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตต ดังนั้น

ฐาน (basis) ในการคำนวณผลิตภัณฑ์จึงคำนวณจากปริมาณที่เหลืออยู่จากการคำนวณปริมาณกลีเซอรอล ซึ่งจากหัวข้อ ง.1 จะได้ปริมาณกลีเซอรอลโดยมวลของสารตัวอย่าง สารที่เหลือคือฐานการคำนวณของวิภาคเมทิลปาล์มมิเตต โดยที่มีสมมติฐานว่าการเก็บสารตัวอย่างไม่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาไกลซิสมิทธิลปาล์มมิเตตมากนัก ปริมาณสารที่ใส่ในระบบไม่สูญหายไปไหนมีค่าคงที่จากตาราง ง.2 ปริมาณสารในระบบที่อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยมีมูลค่า 759.15 กรัม

การคำนวณเมทิลปาล์มมิเตตที่เหลืออยู่สามารถคำนวณได้จากปริมาณเมทิลปาล์มมิเตตที่ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ลบด้วยเมทิลปาล์มมิเตตที่ใช้ในการเกิดผลิตภัณฑ์ โดยที่ปริมาณเมทิลปาล์มมิเตตที่ใช้ในการเกิดผลิตภัณฑ์สามารถคำนวณได้ดังสมการ ง.7

$$\text{ME reacted} = n_{\text{MG}} + 2 \times n_{\text{DG}} + 3 \times n_{\text{TG}} \quad (\text{ง.7})$$

โดยที่ n_{MG} , n_{DG} และ n_{TG} คือโมลของโมโนปาล์มมิเตต ไดปาล์มมิเตต และไตรปาล์มมิเตตตามลำดับ

ในการเกิดโมโนปาล์มมิเตต 1 โมลใช้เมทิลปาล์มมิเตต 1 โมลในการเกิดปฏิกิริยา ในการเกิดไดปาล์มมิเตต 1 โมลใช้เมทิลปาล์มมิเตต 2 โมลในการเกิดปฏิกิริยา และในการเกิดไตรปาล์มมิเตต 1 โมลใช้เมทิลปาล์มมิเตต 3 โมลในการเกิดปฏิกิริยาตามลำดับ

ตารางที่ ค.3 แสดงความน่าเชื่อถือของค่าที่ได้จากการคำนวณกับการทดลองของปริมาณกลีเซอรอล และเมทิลปาล์มมิเตต ในการทดลอง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มมิเตต 1:1 โดยโมลปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต 1 เปอร์เซนต์โดยมวลของเมทิลปาล์มมิเตต ความเร็วรอบใบพัด 800 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	กลีเซอรอลที่ ถูกใช้ไป (โมล)	ผลิตภัณฑ์ที่ เกิดขึ้น ทั้งหมด (โมล)	ค่าร้อยละ ความ ผิดพลาด	เมทิลปาล์มมิเตตที่ ถูกใช้ไปจากการ คำนวณ (โมล)	เมทิลปาล์มมิเตตที่ถูก ใช้ไปจากการลบกลีเซ อรอลในเมทิลปาล์มมิ เตต(โมล)	ค่าร้อยละ ความ ผิดพลาด
0	0.01	0.01	0.5	0.01	0.01	0.5
10	0.59	0.70	15.7	0.87	0.94	7.71
20	0.84	0.98	14.3	1.24	1.28	3.23
30	1.01	1.13	10.6	1.45	1.46	0.69
45	1.18	1.29	8.53	1.72	1.70	1.17
60	1.27	1.35	5.93	1.81	1.77	2.21
90	1.29	1.34	3.73	1.79	1.74	3.04
120	1.33	1.37	2.92	1.82	1.77	2.75
180	1.30	1.30	0	1.73	1.68	3.41
240	1.36	1.30	4.62	1.72	1.64	4.65
300	1.30	1.29	0.78	1.72	1.66	3.34
360	1.29	1.32	2.27	1.78	1.73	2.81
420	1.30	1.28	1.56	1.73	1.67	3.60
480	1.29	1.31	1.83	1.83	1.77	3.28

ปริมาณกลีเซอรอลที่ถูกใช้ไปโดยโมลต้องเท่ากับปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากในผลิตภัณฑ์มีกลีเซอรอลอยู่หนึ่งโมลทุก ๆ จากตารางที่ ง.3 พบว่าปริมาณกลีเซอรอลที่ถูกใช้ไปและปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเฉลี่ยร้อยละ 5.20 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

เมื่อพิจารณาปริมาณเมทิลปาล์มมิเตตที่ถูกใช้ไปโดยโมลกับปริมาณเมทิลปาล์มมิเตตที่ใช้ไปโดยคิดจากปริมาณที่เหลืออยู่ในวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตตลบด้วยปริมาณกลีเซอรอลในวัฏภาคเมทิลปาล์มมิเตตพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเฉลี่ยร้อยละ 3.03 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

ตารางที่ ค.4 ทำให้การคำนวณปริมาณกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมิเตตที่เหลืออยู่มีความน่าเชื่อถือ

เวลา (นาท)	กลีเซ อรอลที่ ถูกใช้ไป (โมล)	ผลิตภัณฑ์ที่ เกิดขึ้น ทั้งหมด (โมล)	ค่าร้อยละ ของความ ผิดพลาด	เมทิลปาล์มมิเตตที่ ถูกใช้ไปจากการ คำนวณ (โมล)	เมทิลปาล์มมิเตตที่ถูก ใช้ไปจากการลบกลีเซ อรอลในเมทิลปาล์มมิ เตต(โมล)	ค่าร้อยละ ของความ ผิดพลาด
0	0.01	0.01	0.5	0.01	0.01	0.5
10	0.59	0.70	15.7	0.87	0.94	7.71
20	0.84	0.98	14.3	1.24	1.28	3.23
30	1.01	1.13	10.6	1.45	1.46	0.69
45	1.18	1.29	8.53	1.72	1.70	1.17
60	1.27	1.35	5.93	1.81	1.77	2.21
90	1.29	1.34	3.73	1.79	1.74	3.04
120	1.33	1.37	2.92	1.82	1.77	2.75
180	1.30	1.30	0	1.73	1.68	3.41
240	1.36	1.30	4.62	1.72	1.64	4.65
300	1.30	1.29	0.78	1.72	1.66	3.34
360	1.29	1.32	2.27	1.78	1.73	2.81
420	1.30	1.28	1.56	1.73	1.67	3.60
480	1.29	1.31	1.83	1.83	1.77	3.28

ภาคผนวก ง.

การคำนวณตัวแปรในการอธิบายปฏิกิริยาเคมี

ง.1 การคำนวณค่าการเปลี่ยนของสารตั้งต้น

การคำนวณค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอลโดยโมลสามารถคำนวณตามสมการดังนี้

$$X_G = \frac{\text{mol Glycerol reacted}}{\text{mol Glycerol feed}} \quad (\text{ง.1})$$

โดยที่ X_G คือค่าการเปลี่ยนของกลีเซอรอล ซึ่งเท่ากับปริมาณกลีเซอรอลที่ถูกใช้ไปหารด้วยปริมาณกลีเซอรอลที่ป้อนในเครื่องปฏิกรณ์โดยโมล

การคำนวณค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตตโดยโมลสามารถคำนวณตามสมการดังนี้

$$X_{FAME} = \frac{n_{ME \text{ react}}(n_{MG} + 2n_{DG} + 3n_{TG})}{n_{ME \text{ Feed}}} \quad (\text{ง.2})$$

โดยที่ X_{FAME} คือค่าการเปลี่ยนของเมทิลปาล์มมิเตต ซึ่งเท่ากับปริมาณเมทิลปาล์มมิเตตที่ถูกใช้ไป(ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งโมลของเมทิลปาล์มมิเตต)หารด้วยปริมาณเมทิลปาล์มมิเตตที่ป้อนในเครื่องปฏิกรณ์โดยโมล

ง.2 การคำนวณค่าผลได้ และค่าการเลือกของผลิตภัณฑ์

จากการคำนวณค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาที่มีความซับซ้อน (multiple reaction; complex reaction) จากการคำนวณค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากหนังสือของ Fogler 3rd edition ค่าผลได้คำนวณจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหารด้วยสารตั้งต้นที่เป็นตัวควบคุมปฏิกิริยาดังสมการ ง.3-5

$$Y_{MG} = \frac{n_{MG}}{n_{MG} + 2n_{DG} + 3n_{TG}} = \frac{\text{mol MG}}{\text{mol ME reacted}} \quad (\text{ง.3})$$

$$Y_{DG} = \frac{2n_{DG}}{n_{MG} + 2n_{DG} + 3n_{TG}} = \frac{\text{mol DG}}{\text{mol ME reacted}} \quad (\text{ง.4})$$

$$Y_{TG} = \frac{3n_{TG}}{n_{MG} + 2n_{DG} + 3n_{TG}} = \frac{\text{mol TG}}{\text{mol ME reacted}} \quad (\text{ง.5})$$

การคำนวณค่าการเลือกของผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาที่มีความซับซ้อน (multiple reaction; complex reaction) จากการคำนวณค่าการเลือกของผลิตภัณฑ์จากหนังสือของ Fogler 3rd edition ค่าการเลือกของผลิตภัณฑ์คำนวณจากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการหารด้วยผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการดังสมการ ๖.6

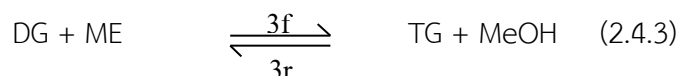
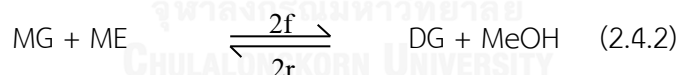
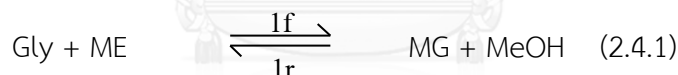
$$S_{MG/DG} = \frac{n_{MG}}{n_{DG}} \quad (๖.6)$$

ในการทดลองปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคือโมโนปาล์มมิติน และผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการคือ ไดปาล์มมิตินและไตรปาล์มมิติน โดยในการทดลองจะเลือกใช้เฉพาะไดปาล์มมิตินเนื่องจากไตรปาล์มมิตินมีปริมาณน้อย

ภาคผนวก จ.

การคำนวณด้วยโปรแกรม Aspen simulation

จ.1 การคำนวณปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาได้หรือไม่
กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ 1 ในหัวข้อ 2.4.1



กลไกในการเกิดปฏิกิริยาโดยอ้างอิงจากขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของ H. Nouredдини และคณะ [15]

จากการคำนวณค่าคงที่ในสภาวะสมดุลของกลไกในการเกิดปฏิกิริยาในหัวข้อ 2.4.1 ทั้ง 3 สมการพบว่าค่าคงที่ในสภาวะสมดุลที่อุณหภูมิสูงสุดในการทดลองคือ 245 องศาเซลเซียส โดยป้อนกลีเซอรอลและเมทิลปาล์มมิเตต 1 โมล มีค่าดังนี้

K_1 ค่าคงที่ในการเกิดโมโนปาล์มมิติน 4.27×10^{-11} , K_2 ค่าคงที่ของการเกิดไดปาล์มมิติน 2.23×10^8 และ K_3 ค่าคงที่ของการเกิดไตรปาล์มมิติน 0.17 มีปริมาณโมโนปาล์มมิติน ไดปาล์มมิติน และไตรปาล์มมิติน ในสภาวะสมดุล 1.02×10^{-12} , 0.49 และ 9.67×10^{-12} โมลตามลำดับ

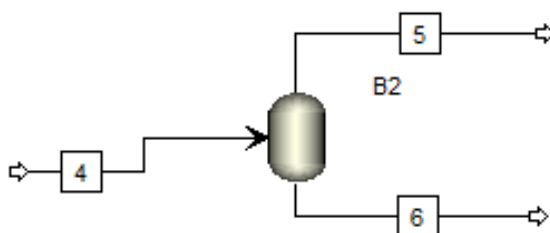
เมื่อทำการใส่สมการที่ 2.4.1 ในสถานะที่ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส สมการเดียวเพื่อคำนวณการเกิดโมโนปาล์มมิตินพบว่าปริมาณโมโนปาล์มมิติน 1.04×10^{-5} โมล

แต่เมื่อทำการใส่สมการที่ 2.4.1 ในสถานะที่ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส และเพิ่มสมการการใช้เมทานอล (ในที่นี้คือการเผาไหม้) เพื่อเป็นการเลื่อนสถานะสมดุลให้ปฏิกิริยาเกิดได้มากขึ้น พบว่ามีปริมาณโมโนปาล์มมิติน 0.66 โมล

จากการคำนวณกลไกการเกิดปฏิกิริยาในสถานะสมดุลทั้ง 3 ปฏิกิริยาพบว่า ค่าคงที่ในสถานะสมดุลของไดปาล์มมิตินมีค่ามากที่สุด แต่ตามกลไกการเกิดปฏิกิริยาต้องเกิดโมโนปาล์มมิตินก่อน นั่นคือปฏิกิริยาไกลซิโรรโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตตสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิในสถานะทำการทดลอง

จ.2 การคำนวณปริมาณเมทานอล

เมทานอลคำนวณจากโปรแกรม Aspen โดยใช้แบบจำลอง SRK (Soave-Redlich-Kwong) ซึ่งเหมาะสำหรับการคำนวณวัฏภาคไอและวัฏภาคของเหลวในช่วงความดันที่มากกว่า 10 บาร์



รูปที่ จ.1 แสดงการคำนวณปริมาณเมทานอลด้วยถังแยกวัฏภาคโดยจำลองเหมือนในสถานะของเครื่องปฏิกรณ์ สายป้อนที่ 4 เป็นสายป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ถังแยกวัฏภาค B2 จำลองสถานะของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีวัฏภาคไอและวัฏภาคของเหลว สายป้อนที่ 5 และ 6 แสดงวัฏภาคไอและวัฏภาคของเหลวตามลำดับ

การคำนวณปริมาณเมทานอลในวัฏภาคของเหลวและวัฏภาคไอสามารถทำได้โดยการใส่ข้อมูลปริมาณสารที่เกิดขึ้นในระบบทั้งสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ในสายป้อนที่ 4 รวมถึงการป้อนเมทานอลที่เกิดขึ้นเป็นไปตามปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น) และปริมาณแก๊สไนโตรเจนซึ่งมีปริมาณขึ้นกับความดันในระบบ จำลองสถานะในเครื่องปฏิกรณ์ทั้งความดันและอุณหภูมิในถังแยกวัฏภาค B2 ปริมาณเมทานอลในวัฏภาคของเหลวสังเกตได้จากสายผลิตภัณฑ์ที่ 6 ปริมาณเมทานอลในวัฏภาคไอสังเกตได้จากสายผลิตภัณฑ์ที่ 5

ตารางที่ จ.1 แสดงปริมาณเมทานอลที่อยู่ในวัฏภาคของเหลว ร้อยละโดยมวลของเมทานอลที่เกิดขึ้นทั้งหมด ในการนำเมทานอลออกจากระบบ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 190 ถึง 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มไมเตดโดยโมล 1:1

เวลา (นาที)	ความดันเกจ (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	190 องศา เซลเซียส	210 องศา เซลเซียส	230 องศา เซลเซียส	245 องศา เซลเซียส
0	380	94.90	44.67	53.76	100
10	340	98.21	82.04	96.76	70.51
20	290	99.89	95.88	99.64	64.15
30	220	99.91	98.99	99.99	54.48
45	160	99.99	99.91	64.96	39.89
60	100	90.98	62.95	41.31	25.61

ตารางที่ จ. 2 แสดงปริมาณเมทานอลที่อยู่ในวัฏภาคของเหลว ร้อยละโดยมวลของเมทานอลที่เกิดขึ้นทั้งหมด ในการศึกษาการนำเมทานอลออกจากระบบ ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อเมทิลปาล์มไมเตดโดยโมล 1:1

เวลา (นาที)	ความดันเกจ (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ไม่มีการนำเม ทานอลออก จากระบบ	ความดันเกจ (ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว)	นำเมทานอ ออกจาก ระบบ 1 ชั่วโมง	นำเมทานอ ออกจาก ระบบ 8 ชั่วโมง
0	380	100	380	100	100.00
10	380	100	340	70.51	98.77
20	380	100	290	64.15	67.67
30	380	100	220	54.48	49.68
60	380	100	100	25.61	17.99
120	380	100	50		10.12
240	380	100	25		8.85
360	380	100	10		4.29
480	380	100	5		3.08

ตารางที่ จ.3 แสดงปริมาณเมทานอลที่อยู่ในวัฏภาคของเหลว ร้อยละโดยมวลของเมทานอลที่เกิดขึ้นทั้งหมด ในการนำเมทานอลออกจากระบบ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส

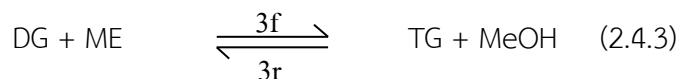
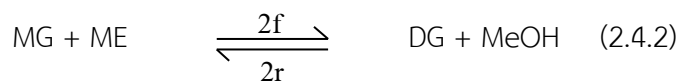
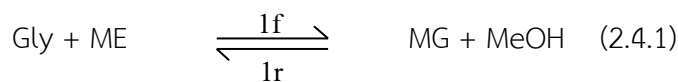
เวลา (นาทีก)	ความดันแก๊ส (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	อัตราส่วนกลีเซ	อัตราส่วนกลีเซ
		ออรอลต่อเมทิลปาล์ม มิเตตโดยโมล 3:1	ออรอลต่อเมทิลปาล์ม มิเตตโดยโมล 6:1
0	380	100	100
10	340	100	100
20	290	100	100
30	220	100	100
60	100	100	100

เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีค่าความจุความร้อนมากกว่าสารตั้งต้น เมื่อการทดลองอยู่ในช่วงเริ่มต้น (0 ถึง 10 นาที) มีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นน้อย ทำให้การคำนวณด้วยโปรแกรม Aspen simulation เมทานอลระเหยเป็นไอบางส่วน เมื่อความดันลดต่ำลงในอุณหภูมิที่มากพอ ทำให้เมทานอลระเหยเป็นไปมากขึ้น

ภาคผนวก ฉ.

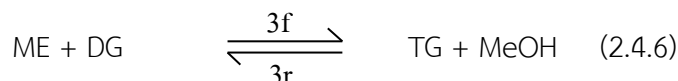
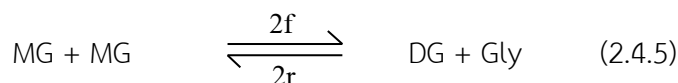
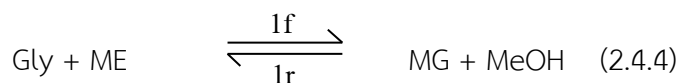
การคำนวณแบบจำลองทางจลน์ศาสตร์

กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ 2.4.1



กลไกในการเกิดปฏิกิริยาโดยอ้างอิงจากขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของ H. Nouredдини และคณะ [15]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ 2.4.2



กลไกในการเกิดปฏิกิริยาโดยอ้างอิงจากขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของ Negi Devender และคณะ [2]

โดย Gly แทน กลีเซอรอล ME แทนเมทิลปาล์มไมเตต MG แทนโมโนปาล์มมิติน
 DG แทนไดปาล์มมิติน TG แทนไตรปาล์มมิติน MeOH แทนเมทานอล
 f แทนปฏิกิริยาไปข้างหน้า r แทนปฏิกิริยาเกิดย้อนกลับ
 (1), (2), และ (3) แทนลำดับในการเกิดปฏิกิริยา

การออกแบบแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มไมเตต

จากกลไกในการเกิดปฏิกิริยาในหัวข้อ 2.4 พบว่ามีกลไกในการเกิดปฏิกิริยา 2 แบบด้วยกัน
 สมการสมดุลมวล (Mass balance) ของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะของกลไกการเกิดปฏิกิริยาในหัวข้อ
 2.4.1 โดยนิยามอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเขียนดังสมการได้ดังนี้

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{\text{ME}}}{dt} = -k_{1f}C_{\text{G}}C_{\text{ME}} + k_{1r}C_{\text{MG}}C_{\text{MeOH}} - k_{3f}C_{\text{DG}}C_{\text{ME}} + k_{3r}C_{\text{TG}}C_{\text{MeOH}} \quad (2.5.1)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{\text{MG}}}{dt} = k_{1f}C_{\text{G}}C_{\text{ME}} - k_{1r}C_{\text{MG}}C_{\text{MeOH}} - k_{2f}C_{\text{MG}}C_{\text{ME}} + k_{2r}C_{\text{DG}}C_{\text{MeOH}} \quad (2.5.2)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{\text{DG}}}{dt} = k_{2f}C_{\text{MG}}C_{\text{ME}} - k_{2r}C_{\text{DG}}C_{\text{MeOH}} - k_{3f}C_{\text{DG}}C_{\text{ME}} + k_{3r}C_{\text{TG}}C_{\text{MeOH}} \quad (2.5.3)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{\text{TG}}}{dt} = k_{3f}C_{\text{DG}}C_{\text{ME}} - k_{3r}C_{\text{TG}}C_{\text{MeOH}} \quad (2.5.4)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{\text{G}}}{dt} = -k_{1f}C_{\text{G}}C_{\text{ME}} - k_{1r}C_{\text{MG}}C_{\text{MeOH}} \quad (2.5.5)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{\text{MeOH}}}{dt} = k_{1f}C_{\text{G}}C_{\text{ME}} - k_{1r}C_{\text{MG}}C_{\text{MeOH}} + k_{2f}C_{\text{MG}}C_{\text{ME}} - k_{2r}C_{\text{DG}}C_{\text{MeOH}} + k_{3f}C_{\text{DG}}C_{\text{ME}} - k_{3r}C_{\text{TG}}C_{\text{MeOH}} \quad (2.5.6)$$

โดยค่า k_1 , k_2 และ k_3 แทนค่าคงที่ของปฏิกิริยาในสมการที่ 2.4.1-2.4.3 เลขห้อย (subscript) f และ r แทนปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับตามลำดับ

สมการสมดุลมวล (Mass balance) ของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะของกลไกการเกิดปฏิกิริยาในหัวข้อ 2.4.2 โดยนิยามอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเขียนดังสมการได้ดังนี้

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{ME}}{dt} = -k_{1f}C_G C_{ME} + k_{1r}C_{MG} C_{MeOH} - k_{3f}C_{DG} C_{ME} + k_{3r}C_{TG} C_{MeOH} \quad (2.5.7)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{MG}}{dt} = k_{1f}C_G C_{ME} - k_{1r}C_{MG} C_{MeOH} - 2k_{2f}C_{MG}^2 + k_{2r}C_{DG} C_G \quad (2.5.8)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{DG}}{dt} = k_{2f}C_{MG}^2 - k_{2r}C_{DG} C_G - k_{3f}C_{DG} C_{ME} + k_{3r}C_{TG} C_{MeOH} \quad (2.5.9)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{TG}}{dt} = k_{3f}C_{DG} C_{ME} - k_{3r}C_{TG} C_{MeOH} \quad (2.5.10)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_G}{dt} = -k_{1f}C_G C_{ME} + k_{1r}C_{MG} C_{MeOH} + 2k_{2f}C_{MG}^2 - k_{2r}C_{DG} C_G \quad (2.5.11)$$

$$\frac{1}{W} \frac{dN_{MeOH}}{dt} = k_{1f}C_G C_{ME} - k_{1r}C_{MG} C_{MeOH} + k_{3f}C_{DG} C_{ME} - k_{3r}C_{TG} C_{MeOH} \quad (2.5.12)$$

โดยค่า k_1 , k_2 และ k_3 แทนค่าคงที่ของปฏิกิริยาในสมการที่ 2.4.4-2.4.6 เลขห้อย (subscript) f และ r แทนปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับตามลำดับ

ฉ.1. การคำนวณหาค่าคงที่ของการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในแต่ละขั้นตอน ของกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบที่ 1 (H. Nouredini [15])

- 1.1 ผลการทดลองของสารในระบบ (ความเข้มข้นต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา) ดังรูปที่ จ.1 ฝั่งซ้าย
- 1.2 ค่าเริ่มต้นของการคำนวณแบบจำลองในโปรแกรม excel คือข้อมูลความเข้มข้นที่เวลา 10 นาที
- 1.3 สร้างค่า k ขึ้นมา 6 ค่าตามกลไกการเกิดปฏิกิริยา แทนค่าคงที่ของการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเริ่มต้นซึ่งจะเป็นค่าที่ใช้ได้ในกรคำนวณ
- 1.4 ใส่สูตรการคำนวณจากสมการสมดุลมวล (Mass balance) ของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะของ เมทิลปาล์มมิเตต โมโนปาล์มมิติน ไดปาล์มมิติน ไตรปาล์มมิติน (โมลต่อกรัมของตัวเร่งปฏิกิริยา) การคำนวณจะใช้วิธี differential method แบบ graphical method ดังสูตรการคำนวณใน Microsoft excel sheet รูปที่ จ.1
- 1.5 สร้างค่าผิดพลาด (error) ซึ่งเป็นผลต่างของข้อมูลจากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณหารด้วยค่าที่ได้จากการทดลอง
- 1.6 สร้างค่าผลรวมความผิดพลาดทั้งหมด จากรูป จ.1 คือ sum error
- 1.7 คำนวณโดยใช้โปรแกรม solver ดังรูปที่ จ.2

Set Target Cell ตั้งค่า sum error ให้มีค่าเท่ากับศูนย์

By Changing Cells ทำการเปลี่ยนค่า k ทั้งหมดค่าที่ตั้งไว้

Subject to the Constraints ทำการรวมค่า error ทั้งหมดที่ได้ ตั้งสมการเท่ากับศูนย์

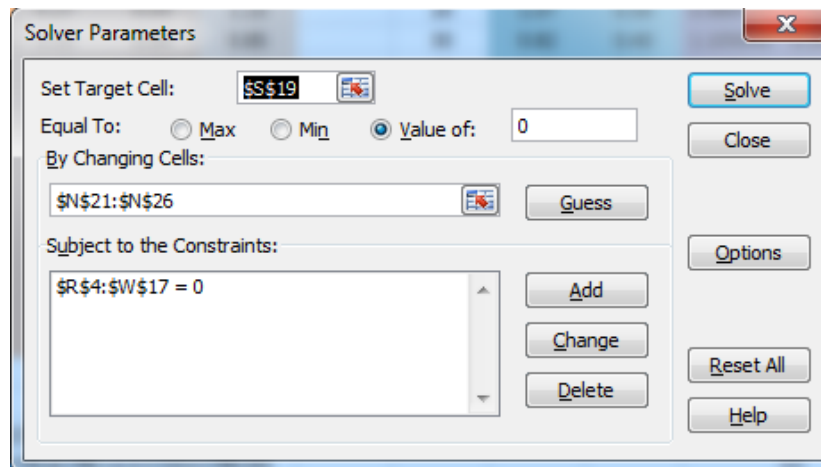
หมายเหตุ 1. การคำนวณความเข้มข้นของกลีเซอรอลในวัฏภาคของเมทิลปาล์มมิเตด

จากงานวิจัย Negi Devender และคณะ [2] ทำให้เราทราบช่วงของความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ละลายอยู่ในวัฏภาคของเมทิลปาล์มมิเตด โดยมีความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ละลายอยู่ในวัฏภาคของเมทิลปาล์มมิเตด 0-0.4 โมลกลีเซอรอลต่อโมลของเมทิลปาล์มมิเตด จากการทดลองสู่้มโดยการแทนที่ความเข้มข้นกลีเซอรอลพบว่า ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นกลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมิเตด 0.2 โมลกลีเซอรอลต่อโมลของเมทิลปาล์มมิเตด ที่อุณหภูมิต่ำกลีเซอรอลละลายในเมทิลปาล์มมิเตดลดลง ที่อุณหภูมิ 230, 210 และ 190 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นกลีเซอรอลในเมทิลปาล์มมิเตด 0.18, 0.15 และ 0.12 โมลกลีเซอรอลต่อโมลของเมทิลปาล์มมิเตด ตามลำดับ

2. ความเข้มข้นของเมทานอลในวัฏภาคของเหลวเปลี่ยนแปลงไปจากความดันในระบบที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งความเข้มข้นของเมทานอลในวัฏภาคของเหลวคำนวณจากภาคผนวก จ.

The image shows a screenshot of an Excel spreadsheet. At the top, the formula bar contains the equation: $f_6 = J6 + (I7 - I6) * 5.66 / 0.8 * (-SK\$26 * J6 * K6 + SK\$27 * O6 * L6 - SK\$28 * L6 * J6 + SK\$29 * M6 * O6 - SK\$30 * M6 * J6 + SK\$31 * O6 * N6)$. The spreadsheet has columns labeled A through W. Row 4 is the header for the simulation data. The table contains multiple rows of data for different time intervals (0 to 480). A red circle highlights the formula bar. Another red circle highlights a cell in the 'ME' column at row 7, column J, containing the value 0.1402. A third red circle highlights a cell in the 'Error' column at row 27, column Q, containing the value 10.7238. Below the simulation data, there are rows for 'Gly in ME Factor' (0.2000) and a list of parameters: k1 (0.09582), k1r (0.00539), k2 (0.01656), k2r (0.03283), k3 (0.00929), and k3r (0.04834).

รูปที่ ๑.1 แสดงการคำนวณค่าคงที่ของการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในแต่ละขั้นตอน ของกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบที่ 1 H. Nouredini [15] ในโปรแกรม Microsoft excel



รูปที่ ฉ.2 แสดงการคำนวณค่าคงที่ของการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในแต่ละขั้นตอน ด้วยโปรแกรม Solver ของ Microsoft excel

ฉ.2. การคำนวณหาค่าคงที่ของการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในแต่ละขั้นตอน ของกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบที่ 2 (Negi Devender [2])

การคำนวณค่าคงที่ของการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเหมือนกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบที่ 1 จากการคำนวณพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองอยู่มาก เพราะจากกลไกในการเกิดปฏิกิริยาแบบที่ 2 จากสมการสมดุลมวล 2.5.7 ถึง 2.5.12 ในหัวข้อ 2.5 ความเข้มข้นของโมโนกลีเซอไรด์จะถูกใช้อย่างมากเนื่องจากลดลงแบบยกกำลังสอง ซึ่งจากผลการทดลองพบปริมาณโมโนกลีเซอไรด์มากที่สุด ทำให้แบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมกับปฏิกิริยาไกลีเซอโรไลซิสเมทิลปาล์มมิเตต

รายการอ้างอิง

- [1] Zheng, Y., Chen, X., and Shen, Y. Commodity chemicals derived from glycerol, an important biorefinery feedstock. Chemical reviews (2008).
- [2] Negi, D. Base Catalyzed Glycerolysis of Fatty Acid Methyl Esters: Investigations Towards the Development of a Continuous Process. Universitätsbibliothek, 2006.
- [3] Jeromin, L., Wozny, G., and Li, P. Process for the production of monoglyceride based on the glycerolysis of methyl ester. 2000, Google Patents.
- [4] Corma, A., Hamid, S.B.A., Iborra, S., and Velty, A. Lewis and Brønsted basic active sites on solid catalysts and their role in the synthesis of monoglycerides. Journal of Catalysis 234(2) (2005): 340-347.
- [5] Pouilloux, Y., Métayer, S., and Barrault, J. Synthesis of glycerol mono-octadecanoate from octadecanoic acid and glycerol. Influence of solvent on the catalytic properties of basic oxides. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIC-Chemistry 3(7) (2000): 589-594.
- [6] Sonntag, N.O. Glycerolysis of fats and methyl esters—status, review and critique. Journal of the American Oil Chemists Society 59(10) (1982): 795A-802A.
- [7] Thinnakorn, K. and Tscheikuna, J. Biodiesel production via transesterification of palm olein using sodium phosphate as a heterogeneous catalyst. Applied Catalysis A: General 476 (2014): 26-33.
- [8] Fischer, W. and Magdeburg, D.-S.i. Production of high concentrated monoglyceride. in DGF-Symposium in Magdeburg. Germany: UIC, GmbH, pp. 2-14, 1998.
- [9] Machado, M.d.S., Perez-Pariente, J., Sastre, E., Cardoso, D., and De Guerenú, A. Selective synthesis of glycerol monolaurate with zeolitic molecular sieves. Applied Catalysis A: General 203(2) (2000): 321-328.

- [10] Gros, A.T. and Feuge, R. Preparation of partial glycerides by direct esterification1. Journal of the American Oil Chemists' Society 41(11) (1964): 727-731.
- [11] Alenezi, R., Leeke, G., Santos, R., and Khan, A. Hydrolysis kinetics of sunflower oil under subcritical water conditions. Chemical Engineering Research and Design 87(6) (2009): 867-873.
- [12] Satyarthi, J., Srinivas, D., and Ratnasamy, P. Hydrolysis of vegetable oils and fats to fatty acids over solid acid catalysts. Applied Catalysis A: General 391(1) (2011): 427-435.
- [13] Echeverri, D.A., Cardeno, F., and Rios, L.A. Glycerolysis of soybean oil with crude glycerol containing residual alkaline catalysts from biodiesel production. Journal of the American Oil Chemists' Society 88(4) (2011): 551-557.
- [14] Esmelindro, Â.F., et al. Lipase-catalyzed production of monoglycerides in compressed propane and AOT surfactant. The Journal of Supercritical Fluids 47(1) (2008): 64-69.
- [15] Nouredini, H. and Medikonduru, V. Glycerolysis of fats and methyl esters. Journal of the American Oil Chemists' Society 74(4) (1997): 419-425.
- [16] Negi, D.S., Sobotka, F., Kimmel, T., Wozny, G., and Schomäcker, R. Glycerolysis of fatty acid methyl esters: 1. Investigations in a batch reactor. Journal of the American Oil Chemists' Society 84(1) (2007): 83-90.
- [17] Bancquart, S., Vanhove, C., Pouilloux, Y., and Barrault, J. Glycerol transesterification with methyl stearate over solid basic catalysts: I. Relationship between activity and basicity. Applied Catalysis A: General 218(1) (2001): 1-11.
- [18] Ferretti, C.A., Soldano, A., Apesteguía, C.R., and Di Cosimo, J.I. Monoglyceride synthesis by glycerolysis of methyl oleate on solid acid–base catalysts. Chemical Engineering Journal 161(3) (2010): 346-354.
- [19] Kimmel, T. Kinetic investigation of the base-catalyzed glycerolysis of fatty acid methyl esters. Universitätsbibliothek, 2004.

- [20] Barrault, J., Bancquart, S., and Pouilloux, Y. Selective glycerol transesterification over mesoporous basic catalysts. Comptes Rendus Chimie 7(6) (2004): 593-599.
- [21] López, D.E., Goodwin Jr, J.G., Bruce, D.A., and Lotero, E. Transesterification of triacetin with methanol on solid acid and base catalysts. Applied Catalysis A: General 295(2) (2005): 97-105.
- [22] Cheirsilp, B., Kaewthong, W., and H-Kittikun, A. Kinetic study of glycerolysis of palm olein for monoacylglycerol production by immobilized lipase. Biochemical Engineering Journal 35(1) (2007): 71-80.
- [23] Lee, D.-W., Park, Y.-M., and Lee, K.-Y. Heterogeneous Base Catalysts for Transesterification in Biodiesel Synthesis. Catalysis Surveys from Asia 13(2) (2009): 63-77.
- [24] S. T. Jiang*, F.J.Z.a.L.J.P. <SODIUM PHOSPHATE AS A SOLID CATALYST.pdf>.
- [25] Junjie, Y., Tingjie, W., Jianping, P., Chengyou, K., and Yong, J. Slow-release Urea Preparation by Film Coating with Polymer Latex. Chemical Industry and Engineering Progress 24(6) (2005): 666.
- [26] Guan, G., Kusakabe, K., and Yamasaki, S. Tri-potassium phosphate as a solid catalyst for biodiesel production from waste cooking oil. Fuel Processing Technology 90(4) (2009): 520-524.
- [27] Liu, Y., Lotero, E., and Goodwin Jr, J.G. Effect of carbon chain length on esterification of carboxylic acids with methanol using acid catalysis. Journal of Catalysis 243(2) (2006): 221-228.
- [28] Sharma, Y., Singh, B., and Korstad, J. Application of an efficient nonconventional heterogeneous catalyst for biodiesel synthesis from Pongamia pinnata oil. Energy & Fuels 24(5) (2010): 3223-3231.
- [29] Donida, M.W. and Rocha, S.C. Coating of urea with an aqueous polymeric suspension in a two-dimensional spouted bed. Drying technology 20(3) (2002): 685-704.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภาณุพล ว่องกิตติพงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 9 พฤษภาคม พ.ศ. 2533 กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย จบการศึกษาในระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2554 งานประชุมทางวิชาการที่เข้าร่วมคือ International Symposium on chemical reaction engineering (ISCRE23) เมื่อวันที่ 7 ถึง 10 กันยายน พ.ศ. 2557 และ Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology (JCREN 2014) เมื่อวันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ. 2557



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY