

ปฏิบัติการไฮโดรต็อกซิเจนชั้นของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม
และตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

นายสุทธิชัย สุรสุมภาพ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDRODEOXYGENATION OF GLYCEROL USING NICKEL MOLYBDENUM
AND COBALT MOLYBDENUM CATALYSTS

Mr. Sutthichai Surasompob



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

ปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่ง
ปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์
โมลิบดีนัม

โดย

นายสุทธิชัย สุรสุมภาพ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์วรรณ โชติพิภพ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)

สุทธิชัย สุรสสมภพ : ปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม (HYDRODEOXYGENATION OF GLYCEROL USING NICKEL MOLYBDENUM AND COBALT MOLYBDENUM CATALYSTS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา, 109 หน้า.

กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล การผลิตไบโอดีเซลมีแนวโน้มสูงขึ้น ส่งผลให้กลีเซอรอลถูกผลิตมากขึ้นด้วยในขณะที่ตลาดที่รองรับการใช้งานกลับมีเท่าเดิม กลีเซอรอลจึงล้นตลาดและมีราคาถูกลง งานวิจัยนี้ศึกษาการทำปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของกลีเซอรอลเพื่อผลิต 1,2-Propanediol (1,2-PDO) ซึ่งมีราคาสูง ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ผลของตัวเร่งปฏิกริยา (ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม) อุณหภูมิ (200, 220, 240, 260, และ 280 องศาเซลเซียส) และความดันแก๊สไฮโดรเจน (30, 50 และ 70 บาร์) การทดลองทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลต่อเนื่อง กำหนดความเร็วเชิงสเปซของเหลวเท่ากับ 1 ต่อชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของกลีเซอรอลประกอบด้วย 2 ปฏิกริยาย่อย คือ ปฏิกริยาดีไฮเดรชัน และปฏิกริยาไฮโดรจีเนชัน ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้น คือ 1,2-PDO นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเกิดขึ้น เช่น Hydroxyacetone (HA), 1-Propanol, 2-Propanol, Ethanol และอื่นๆ ผลของตัวเร่งปฏิกริยาพบว่าตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมให้ค่าร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO สูงกว่าตัวเร่งปฏิกริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม เนื่องจากตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีความว่องไวในการเกิดปฏิกริยาไฮโดรจีเนชันได้ดีกว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ลดลงเนื่องจาก 1,2-PDO เกิดปฏิกริยาต่อกลายเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง สำหรับผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนพบว่าเมื่อเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจน ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO จะสูงขึ้นเนื่องจาก HA เกิดปฏิกริยาไฮโดรจีเนชันกลายเป็น 1,2-PDO ได้มากขึ้น จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกริยาและภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของกลีเซอรอล คือ ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส และความดันแก๊สไฮโดรเจน 50 บาร์ ได้ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO เท่ากับ 47.00%

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5570567921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: GLYCEROL, HYDRODEOXYGENATION, HYDROTREATING

SUTTHICHAJ SURASOMPOB: HYDRODEOXYGENATION OF GLYCEROL USING NICKEL MOLYBDENUM AND COBALT MOLYBDENUM CATALYSTS. ADVISOR: JIRDSAK TSCHEIKUNA, Ph.D., 109 pp.

Glycerol is a by-product from biodiesel production. As biodiesel production increases, so does the glycerol. The market demand of glycerol cannot keep up its supply resulting in abundant supply and price decline. In this study, thus, the hydrodeoxygenation of glycerol was investigated to produce 1,2-Propanediol (1,2-PDO) which is more valuable. The following parameters were investigated: catalyst (NiMo and CoMo catalysts), temperature (200, 220, 240, 260 and 280 °C) and H₂ pressure (30, 50 and 70 bar). The experiments were carried out in a trickle-bed reactor at constant LHSV of 1 h⁻¹. Experimental results showed that the hydrodeoxygenation of glycerol is composed of 2 consecutive reactions, i.e., dehydration and hydrogenation reactions. The main product occurred was 1,2-PDO. Other by-products such as hydroxyacetone (HA), 1-propanol, 2-propanol, ethanol, etc were observed. The effect of catalyst showed that NiMo gave higher selectivity to 1,2-PDO than CoMo catalyst because the NiMo catalyst is more active for hydrogenation reaction. It was found that glycerol conversion increased with temperature. However, the 1,2-PDO selectivity decreased because 1,2-PDO continued reacting to by-products. On the other hand, the selectivity of 1,2-PDO increased when hydrogen pressure increased due to the hydrogenation reaction of HA to 1,2-PDO. According to this work, the selectivity of 1,2-PDO from hydrodeoxygenation of glycerol is 47.00%. The suggested catalyst and conditions were NiMo catalyst at 220 °C and 50 bar H₂ pressure.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. เจ็ดศักดิ์ ไชยคุนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา ประสพการณ์ และความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ระหว่างการทำวิจัย และเพิ่มเติมเนื้อหาและรายละเอียดของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์ ประธานกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิวรรณ โชติพิฤกษ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. อัญชลีพร วาริตส์สวัสดิ์ หล่อทองคำ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและเพิ่มเติมรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ครูและคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และผู้มีพระคุณที่ไม่ได้กล่าวนาม ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้องทุกคนที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดมา หากวิทยานิพนธ์นี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยมา ณ ที่นี้



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สมบัติและความสำคัญของกลีเซอรอล.....	4
2.2 ปฏิกริยาไฮโดรจีโนไลซิส.....	6
2.2.1 ปฏิกริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล.....	6
2.2.2 เส้นทางการเกิดปฏิกริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล.....	6
2.3 ปฏิกริยาไฮโดรทรีตติง.....	9
2.3.1 ตัวเร่งปฏิกริยาในกระบวนการไฮโดรทรีตติง.....	11
2.3.2 การประยุกต์ปฏิกริยาไฮโดรทรีตติงกับน้ำมันพืช.....	12
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล.....	14
2.4.1 ปฏิกริยาไฮโดรจีโนไลซิส.....	14
2.4.2 ปฏิกริยาไฮโดรตีออกซิจีเนชัน.....	18

2.5 การกำหนดขอบเขตงานวิจัย	25
บทที่ 3 การทดลองและการวิเคราะห์	26
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	26
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์	27
3.2.1 เครื่องปฏิกรณ์	27
3.2.2 เครื่อง X-ray fluorescence	28
3.2.3 เครื่อง BET	28
3.2.4 เครื่อง NH ₃ -TPD	28
3.3 วิธีการทดลอง.....	29
3.3.1 การซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยา	29
3.3.2 การทำการทดลอง	29
3.3.3 การเก็บตัวอย่าง.....	30
3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง	30
3.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอล	31
3.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี	31
3.5 การคำนวณที่เกี่ยวข้อง.....	31
3.5.1 การคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Respond Factor)	31
3.5.2 การคำนวณปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์จากโครมาโทแกรม	32
3.5.3 การคำนวณปริมาณร้อยละกลีเซอรอลในตัวอย่าง	33
3.5.4 การคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	33
3.5.5 การคำนวณปริมาณกลีเซอรอลที่ทำปฏิกิริยา	34
3.5.6 การคำนวณค่าร้อยละการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์.....	34
3.5.7 การคำนวณค่าความเร็วเชิงสเปซของเหลว	35

3.5.8 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน (Error Bar).....	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย	37
4.1 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา	37
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา	37
4.1.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวเร่งปฏิกิริยา... ..	38
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ความแรงของกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา	39
4.2 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันของกลีเซอรอล	39
4.3 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล.....	56
4.3.1 ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ กลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	56
4.3.2 ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ กลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม.....	57
4.3.3 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม	58
4.4 ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์.....	59
4.4.1 ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ 1,2-Propanediol	60
4.4.2 ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ Acetone	64
4.4.3 ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ 1-PO, 2-PO และ EtOH.....	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	72
รายการอ้างอิง	73
ภาคผนวก.....	78

ภาคผนวก ก ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ	79
ภาคผนวก ข ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ความดันแก๊สไฮโดรเจน 50 บาร์ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ	84
ภาคผนวก ค ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ความดันแก๊สไฮโดรเจน 70 บาร์ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ	89
ภาคผนวก ง ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ	94
ภาคผนวก จ ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม ความดันแก๊สไฮโดรเจน 50 บาร์ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ	99
ภาคผนวก ฉ ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม ความดันแก๊สไฮโดรเจน 70 บาร์ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ	104
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	109

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (วรารัตน์ เลิศสนเมธากุล. 2553)	4
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.2 ภาวะการทดลอง.....	30
4.1 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา	38
4.2 ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	38
4.3 ชื่อสารและสูตรโครงสร้างจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดแมสสเปกโตรมิเตอร์ของตัวอย่างจากการทำการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	44
4.4 ชื่อสารและสูตรโครงสร้างจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดแมสสเปกโตรมิเตอร์ของตัวอย่างวัฏภาคบนจากการทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของ เหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	54
ก-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	79
ก-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	80
ก-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	81
ก-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	82
ก-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	83

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	สูตรโครงสร้างของกลีเซอรอล (Perosa, A. et al. 2005)..... 4
2.2	ปฏิกิริยาต่างๆ ที่เปลี่ยนกลีเซอรอลให้เป็นสารเคมีที่มีราคาสูง (Brandner, A. et. al. 2009)..... 6
2.3	ปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสโดยตรงของกลีเซอรอลเป็น (ก) 1,3-PDO และ (ข) 1,2-PDO (Amada, Y. et al. 2011)..... 8
2.4	เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของไตรกลีเซอไรด์ (Veriansyah, B. et al. 2012)..... 13
3.1	แผนผังระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลต่อเนื่อง..... 27
3.2	ภาวะคอλλัมน์ของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี..... 31
4.1	การคายซับแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม..... 39
4.2	โครมาโทแกรมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออนเซชันของตัวอย่างจากการทำการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม..... 40
4.3	เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดย Kusunnoki และคณะ (2005)..... 41
4.4	เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดย Miyazawa และคณะ (2006)..... 43
4.5	โครมาโทแกรมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดแมสสเปกโตรมิเตอร์ของตัวอย่างจากการทำการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม..... 44

4.6	เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสและปฏิกิริยาการย่อยสลายของกลีเซอรอล โดย Miyazawa และคณะ (2007).....	48
4.7	เส้นทางการเกิดและปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของ 1,2-PDO และ 1,3-PDO โดย Huang และคณะ (2009).....	49
4.8	เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันและปฏิกิริยาการย่อยสลายของ กลีเซอรอลโดย I. Gandarian และคณะ (2010).....	51
4.9	เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาคีโตไนเซชันของกรดอัลคานอยิกและปฏิกิริยาอื่นๆ โดย E. Karimi และคณะ (2012).....	52
4.10	โครมาโทแกรมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิด แมสสเปกโตรมิเตอร์ของตัวอย่างวิภูภาคกลางจากการทำการทดลองที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของเหลว 1 ต่อ ชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม.....	53
4.11	โครมาโทแกรมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิด แมสสเปกโตรมิเตอร์ของตัวอย่างวิภูภาคบนจากการทำการทดลองที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของเหลว 1 ต่อ ชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม.....	53
4.12	เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของกลีเซอรอลและปฏิกิริยาข้างเคียง.....	55
4.13	ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดัน แก๊สไฮโดรเจน 30 ถึง 70 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลโมลิบดีนัม.....	57
4.14	ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดัน แก๊สไฮโดรเจน 30 ถึง 70 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยา โคบอลต์โมลิบดีนัม.....	58
4.15	ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดัน แก๊สไฮโดรเจน 30 ถึง 70 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม.....	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง มีความหนืดสูง ละลายในน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดี สามารถดูดความชื้น มีจุดเดือดสูง ไม่มีพิษ กลีเซอรอลนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ เช่น ใช้เป็นส่วนผสมในกระบวนการผลิตเครื่องสำอางและอุตสาหกรรมสบู่ เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารช่วยหล่อลื่น เพิ่มความชุ่มชื้นให้ผิวหนัง ดูดซับความชื้นเมื่อสัมผัสกับอากาศ นอกจากนี้ยังใช้กลีเซอรอลในทางเภสัชกรรมเป็นส่วนประกอบในยาน้ำสำหรับเด็กเนื่องจากมีรสหวาน และเป็นส่วนประกอบในยาใช้เฉพาะที่สำหรับโรคผิวหนังหลายชนิด สามารถสังเคราะห์กลีเซอรอลได้จากโพรพิลีน และยังเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจาก 3 กระบวนการ คือ กระบวนการผลิตสบู่ กระบวนการผลิตกรดไขมัน และกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ปริมาณกลีเซอรอลที่เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจากการผลิตไบโอดีเซลคิดเป็น 10% โดยน้ำหนัก นั่นคือไบโอดีเซลที่ผลิตได้ 90 ตัน จะได้กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง 10 ตัน (Miranda, B.C. et al. 2014) คาดว่าภายในปี พ.ศ.2559 ปริมาณการผลิตไบโอดีเซลทั่วโลกจะสูงถึง 180 ล้านตัน ด้วยอัตราการเติบโตรายปีเท่ากับ 42% (Meher, L.C. et al. 2009) อัตราการผลิตไบโอดีเซลที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้กลีเซอรอลถูกผลิตมากขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ตลาดที่รองรับการใช้งานของกลีเซอรอลมีเท่าเดิม ส่งผลให้ปริมาณกลีเซอรอลมีมากเกินไปเกินความต้องการของตลาดและราคาลดลงอย่างต่อเนื่อง การนำกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลไปใช้ประโยชน์โดยตรง หรือการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ นับว่าเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กลีเซอรอล ทำให้กลีเซอรอลเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสำหรับการนำไปใช้งานต่อไป

ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาเกี่ยวกับการใช้กลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีหลายชนิด จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสารเคมีที่น่าสนใจ คือ 1,2-PDO (1,2-Propanediol) และ 1,3-PDO (1,3-Propanediol) เนื่องจากสารเคมีทั้งสองชนิดมีราคาสูงและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย 1,2-PDO สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลาสติกโพลีเอทิลีนและโพลีเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว หรือใช้ในอุตสาหกรรมยาและอาหาร 1,3-PDO สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (Guo, L. et al. 2009) ปัจจุบัน 1,2-PDO และ 1,3-PDO ผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของโพรพิลีนออกไซด์และอะโครเลอินตามลำดับ ดังนั้นการผลิต 1,2-PDO และ 1,3-PDO จากกลีเซอรอลจึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกลีเซอรอล และเป็นการพัฒนา

กระบวนการผลิตใหม่ที่ใช้สารชีวมวลเป็นสารตั้งต้นเพื่อทดแทนกระบวนการผลิตเดิมที่ใช้สารเคมีจากปิโตรเลียม

การผลิต 1,2-PDO และ 1,3-PDO จากกลีเซอรอลทำโดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิส (Hydrogenolysis) กลีเซอรอลจะถูกกำจัดอะตอมของออกซิเจนออก ตำแหน่งอะตอมของออกซิเจนที่ถูกกำจัดออกส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ถ้ากำจัดอะตอมของออกซิเจนตำแหน่งที่ 1 หรือ 3 จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น 1,2-PDO ถ้ากำจัดอะตอมของออกซิเจนตำแหน่งที่ 2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็น 1,3-PDO ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ โลหะมีตระกูล เช่น Rh Ru Pt หรือ Pd ส่วนอีกประเภท คือ โลหะทรานสิชัน ได้แก่ Ni Cu (Li, Y. et al. 2014) ส่วนใหญ่แล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ขึ้นเอง ตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิดมีราคาแพง อีกทั้งค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล และค่าการเลือกของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการยังมีค่าน้อย

นอกจากการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสแล้ว ยังมีอีกปฏิกิริยาหนึ่งที่มีความสามารถในการกำจัดอะตอมของออกซิเจนได้เช่นเดียวกัน คือ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชัน (Hydrodeoxygenation) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทั้งสแตนบนตัวรองรับอะลูมินา ปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิสูง ภายใต้ความดันแก๊สไฮโดรเจน (Grilc, M. et al. 2014) ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันเป็นปฏิกิริยาย่อยของปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติง (Hydrotreating) ซึ่งถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน ทั้งนี้เพื่อกำจัดสารประกอบที่ไม่ต้องการออกจากน้ำมัน เช่น สารประกอบซัลเฟอร์ สารประกอบไนโตรเจน สารประกอบออกซิเจน เป็นต้น ภายหลังมีงานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับการนำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันมาประยุกต์ใช้กับสารตั้งต้นที่เป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio oil) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบออกซิเจน การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการใช้ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันทั้งในการกำจัดสารประกอบออกซิเจนจากน้ำมันชีวภาพโดยตรง และจากสารประกอบจำลอง (Model compound) ได้แก่ สารประกอบจำพวกเอสเทอร์ แอลดีไฮด์ คีโตน และแอลกอฮอล์ ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชัน คือ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม และตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม โดยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม (Senol, O.I. et al. 2005a) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทั้งสแตนไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้เนื่องจากความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทั้งสแตน ช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาแทรกกึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็ก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันของกลีเซอรอลซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ ข้อดีของการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันเมื่อเทียบกับการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสคือตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงและใช้งานอย่างแพร่หลายทางการค้า มีราคาถูก และเป็นปฏิกิริยาที่ไม่ซับซ้อน

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้นของกลีเซอรอล ได้แก่ ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงสองชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมในรูปซัลไฟด์ อุณหภูมิ และความดันแก๊สไฮโดรเจน และศึกษาเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้นของกลีเซอรอล

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เปรียบเทียบผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้นของกลีเซอรอล
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้นของกลีเซอรอล

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินาในรูปซัลไฟด์ต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้น
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้น
3. ศึกษาผลของความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 ถึง 70 บาร์ ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้น
4. ศึกษาเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้นของกลีเซอรอล

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

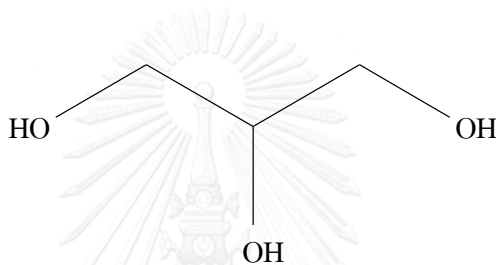
1. สามารถหาตัวเร่งปฏิกิริยาและภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้นของกลีเซอรอล
2. สามารถนำข้อมูลจากการทำวิจัยไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหรืองานวิจัยอื่นๆ ต่อไป
3. ช่วยให้กระบวนการผลิตไปโอดีเซลมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมบัติและความสำคัญของกลีเซอรอล

กลีเซอรอลหรือกลีเซอริน มีชื่อทางเคมี (IUPAC) ว่า 1,2,3-Propanetriol มีสูตรโมเลกุล คือ $C_3H_8O_3$ เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทแอลกอฮอล์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม ต่อกับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) สูตรโครงสร้างโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 2.1 กลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นของเหลว หนืดใส ไม่มีกลิ่น มีรสหวาน มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือด เท่ากับ 18 และ 290 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ละลายในน้ำ และแอลกอฮอล์ได้ดี



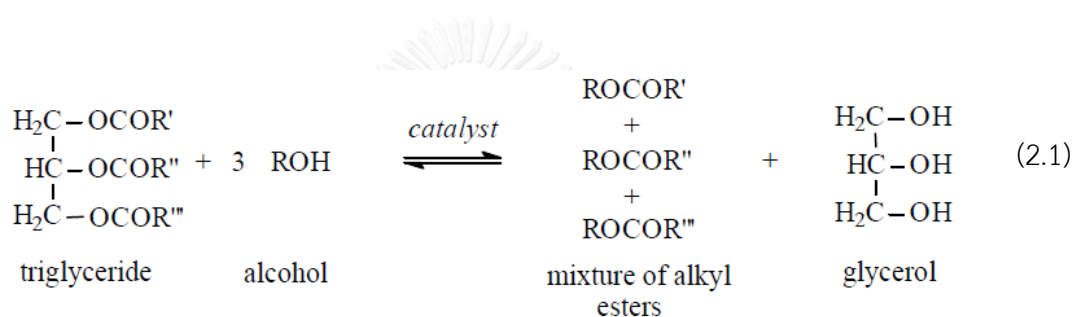
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของกลีเซอรอล (Perosa, A. et al. 2005)

ตารางที่ 2.1 สมบัติของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (วารรัตน์ เลิศสนเมธากุล. 2553)

มวลโมเลกุล	92.0938 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่น	1.261 กรัมต่อมิลลิลิตร
จุดหลอมเหลว	18 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	290 องศาเซลเซียส
ความหนืด	1.5 ปาสคาล·วินาที
จุดวาบไฟ	160 องศาเซลเซียส (ระบบปิด) 176 องศาเซลเซียส (ระบบเปิด)
ความเป็นกรด-เบส (pH)	5 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

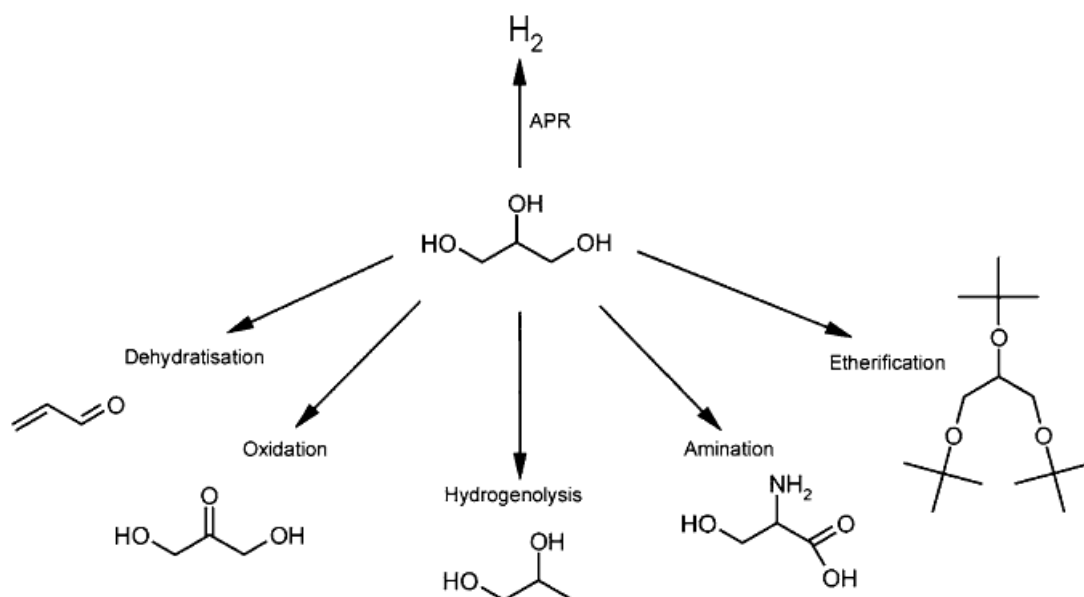
ก. แหล่งของกลีเซอรอล

กลีเซอรอลสามารถสังเคราะห์ได้จากโพพพิลีนและการหมักน้ำตาลด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และยังเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจากปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) ของน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ในการผลิตสบู่ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เพื่อผลิตกรดไขมัน และจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยารานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Tranesterification) โดยใช้ น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล หรือเมทานอล และใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยารานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน แสดงดังสมการที่ 2.1 (Schuchardt, U. et al. 1998) ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะมีกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงประมาณ 10% โดยน้ำหนัก



ข. การใช้ประโยชน์

กลีเซอรอลเป็นสารที่มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ใช้เป็นส่วนผสมในกระบวนการผลิตเครื่องสำอาง ใช้ในอุตสาหกรรมสบู่ เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารช่วยเพิ่มความชุ่มชื้น ดูดซับความชื้นเมื่อสัมผัสกับอากาศ ช่วยเพิ่มความชุ่มชื้นให้ผิวหนัง นอกจากนี้ยังมีการใช้กลีเซอรอลในทางเภสัชกรรม โดยใช้เป็นส่วนประกอบในยาน้ำสำหรับเด็กเนื่องจากมีรสหวาน และเป็นส่วนประกอบในยาใช้เฉพาะที่สำหรับโรคผิวหนังหลายชนิด ใช้เป็นสารหล่อลื่น สารป้องกันการแข็งตัว ใช้เป็นส่วนผสมในขนมและอาหารเนื่องจากมีรสหวาน นอกจากนี้โครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอลยังมีความเหมาะสมสำหรับใช้สังเคราะห์สารเคมีอื่นๆ ที่มีราคาสูง เช่น กรดกลีเซอริกและไดไฮดรอกซีแอซิโตนจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน อะโครเลอินจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน แก๊สไฮโดรเจนจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงในเฟสของของเหลว โพรเพนไดออลจากปฏิกิริยาไฮโดรดิออกซิเจเนชัน และสารตัวอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาต่างๆ ที่เปลี่ยนกลีเซอรอลให้เป็นสารเคมีที่มีราคาสูง (Brandner, A. et. al. 2009)

2.2 ปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิส

ปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่ใช้ไฮโดรเจนในการแตกพันธะของคาร์บอนกับคาร์บอน (C-C) หรือคาร์บอนกับอะตอมต่างชนิด (C-X) เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน หรือซัลเฟอร์ เป็นปฏิกิริยาที่ต้องการตัวเร่งปฏิกิริยา ภาวะในการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดที่อุณหภูมิสูง ภายใต้ความดันแก๊สไฮโดรเจน

2.2.1 ปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล

วัตถุประสงค์หลักของการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลคือ การผลิต 1,2-PDO และ 1,3-PDO ทำได้โดยการทำลายพันธะ C-O ในโมเลกุลของกลีเซอรอล 1 พันธะ แล้วแทนที่พันธะคู่ที่เกิดขึ้นด้วยอะตอมของไฮโดรเจน แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อได้หากถูกทำลายพันธะ C-O และ/หรือ พันธะ C-C ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์อื่น เช่น 1-PO (1-Propanol), 2-PO (2-Propanol), Ethylene glycol และ Methane (Miranda, B.C. et al. 2014)

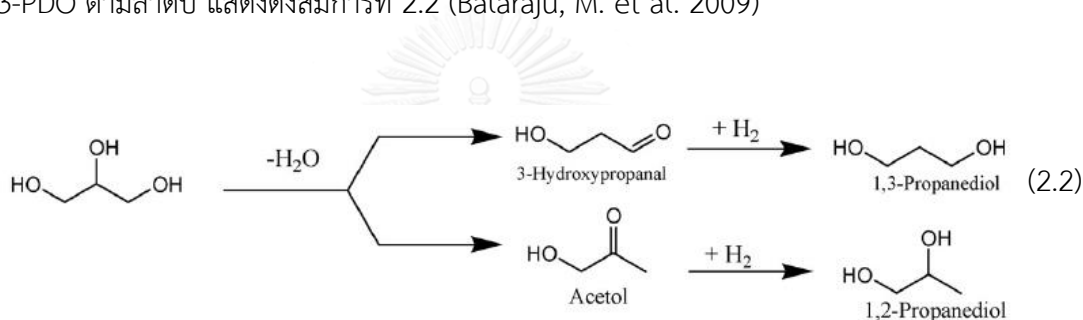
2.2.2 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล

กลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสเป็น 1,2-PDO และ 1,3-PDO ได้ 3 เส้นทาง คือ ผ่านปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน-ไฮโดรจีเนชัน (Dehydration-Hydrogenation) ถูกเสนอโดย Dasari และคณะ ผ่านปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน-ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน-ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation-Dehydration-Hydrogenation) หรือทางกลีเซอรอลดีไฮด์ (Glyceraldehyde

route) ซึ่งเสนอโดย Montassier และคณะ สำหรับเส้นทางสุดท้ายถูกเสนอโดย Amada Y. และคณะ ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสโดยตรง (Direct glycerol hydrogenolysis)

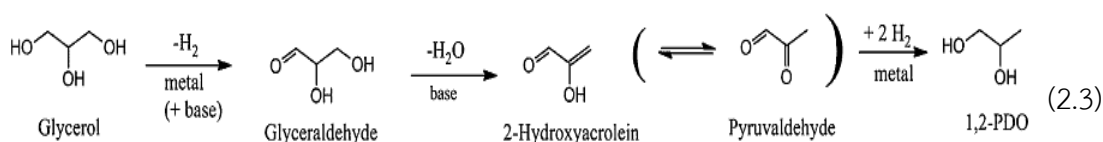
ก. ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน-ไฮโดรจีเนชัน

การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลผ่านปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน-ไฮโดรจีเนชันขั้นแรกกลีเซอรอลจะถูกทำลายพันธะ C-O อะตอมออกซิเจนจะถูกกำจัดออกในรูปของโมเลกุลน้ำ ได้ Acetol หรือ 3-Hydroxypropanal เป็นผลิตภัณฑ์ เรียกขั้นตอนนี้ว่าปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน Acetol หรือ 3-Hydroxypropanal ที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันต่อ ขั้นตอนนี้พันธะคู่ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันจะถูกทำให้อิ่มตัวด้วยอะตอมของไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ 1,2-PDO และ 1,3-PDO ตามลำดับ แสดงดังสมการที่ 2.2 (Balaraju, M. et al. 2009)



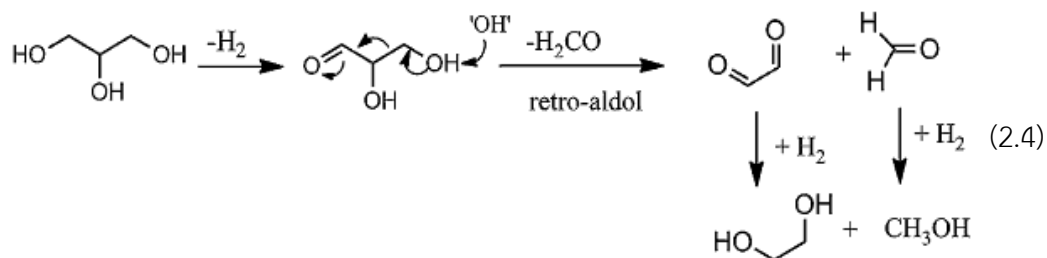
ข. ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน-ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน-ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน

เส้นทางนี้กลีเซอรอลจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสโดยผ่าน 3 ปฏิกิริยาย่อยต่อเนื่อง ขั้นแรกกลีเซอรอลจะเปลี่ยนเป็น Glyceroldehyde ด้วยปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน เป็นการกำจัดอะตอมของไฮโดรเจน 2 อะตอมออกจากโมเลกุลของกลีเซอรอล จากนั้น Glyceroldehyde จะถูกเปลี่ยนไปเป็น 2-Hydroxyacrolein โดยการกำจัดอะตอมออกซิเจนด้วยปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน และขั้นสุดท้าย 2-Hydroxyacrolein จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันซึ่งเป็นการเติมอะตอมไฮโดรเจน ณ ตำแหน่งพันธะคู่ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ 1,2-PDO แสดงดังสมการที่ 2.3 (Martin, A. et al. 2013)



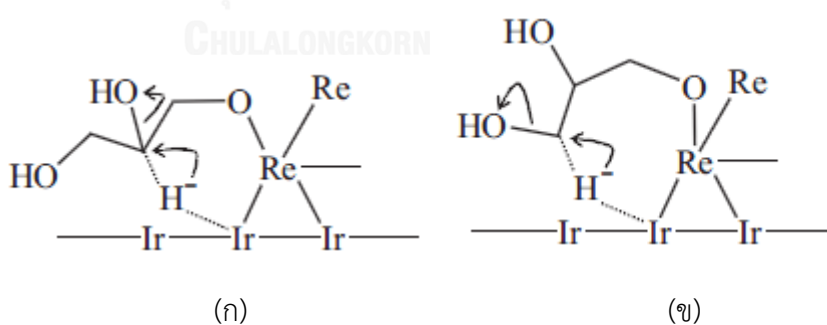
เมื่อปฏิกิริยาเกิดภายใต้ภาวะเบสพบว่านอกจากผลิตภัณฑ์หลัก คือ 1,2-PDO เกิดขึ้นแล้ว ยังมีผลิตภัณฑ์ข้างเคียงอื่นๆ เช่น Ethylene glycol, Methanol และ Methane ซึ่งเกิดจากการ

ถูกทำลายพันธะ C-C มีผู้ศึกษาพบว่าผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเหล่านี้เกิดจาก Glyceroldehyde บางส่วน เกิดปฏิกิริยาเรโทร-อัลดอลไลเซชัน (Retro-aldolisation) แสดงดังสมการที่ 2.4



ค. การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิสโดยตรง

เส้นทางนี้เสนอโดย Amada Y. และคณะ ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ir-ReO_x/SiO₂ ภายใต้ภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และความดันแก๊สไฮโดรเจน 80 บาร์ พบว่ากลีเซอรอลสามารถเปลี่ยนเป็น 1,2-PDO และ 1,3-PDO ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองสามารถกระตุ้นไฮโดรเจนให้เปลี่ยนเป็นรูปไฮไดรด์ (Hydride) ได้ง่าย ระหว่างเกิดปฏิกิริยากลิเซอรอลจะถูกดูดซับบนกลุ่มก้อนของ ReO_x แล้วเปลี่ยนเป็นอัลคอกไซด์ (Alkoxide) คือ 2,3-Dihydroxypropoxide จากนั้นไฮไดรด์จะเข้าทำปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งที่ 2 ของ 2,3-Dihydroxypropoxide เกิดเป็น 1,3-PDO หรือไฮไดรด์เข้าทำปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งที่ 3 ของ 2,3-Dihydroxypropoxide ได้ผลิตภัณฑ์เป็น 1,2-PDO แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิสโดยตรงของกลีเซอรอลเป็น (ก) 1,3-PDO และ (ข) 1,2-PDO (Amada, Y. et al. 2011)

2.3 ปฏิกริยาไฮโดรทรีตติง

ปฏิกริยาไฮโดรทรีตติงเป็นปฏิกริยาที่ใช้ในโรงกลั่นน้ำมันดิบ ใช้ตัวเร่งปฏิกริยาร่วมกับแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิและความดันสูง ตัวเร่งปฏิกริยาที่นิยมใช้ คือ โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินาโดยมีนิกเกิลหรือโคบอลต์เป็นโปรโมเตอร์ (NiMo/Al₂O₃ หรือ CoMo/Al₂O₃) หรือตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลทั้งสแตนบนตัวรองรับอะลูมินา (NiW/Al₂O₃) วัตถุประสงค์ของการทำปฏิกริยาไฮโดรทรีตติงมี 2 อย่างคือ เพื่อปรับเสถียรภาพของน้ำมันปิโตรเลียม โดยเปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวให้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่าปฏิกริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation, HYD) และเพื่อกำจัดสารประกอบที่ไม่ต้องการออกจากสายโซ่ของไฮโดรคาร์บอนโดยการทำลายพันธะระหว่างคาร์บอนกับสารประกอบที่ไม่ต้องการ ถือเป็นปฏิกริยาไฮโดรจีโนไลซิสหรือไฮโดรเพียวริฟิเคชัน (Hydropurification) สารประกอบปนเปื้อนในน้ำมันปิโตรเลียมมีหลายชนิด เช่น ซัลเฟอร์ ไนโตรเจน ออกซิเจน หรือโลหะหนัก สาเหตุที่ต้องกำจัดสารปนเปื้อนเพื่อ (Grange, P. et al. 1997)

1. ป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกริยาในกระบวนการกลั่นน้ำมันในขั้นถัดไป
2. ลดการปล่อยสารประกอบซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) และสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) จากการเผาไหม้สารประกอบไฮโดรคาร์บอน
3. เพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (สี กลิ่น ความเสถียร) ก่อนนำไปใช้

ชื่อเรียกของปฏิกริยาไฮโดรจีโนไลซิสจะแตกต่างกันตามสารประกอบที่ถูกกำจัดออก เช่น ปฏิกริยาไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชัน (Hydrodesulfurization, HDS) สำหรับการกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์ ปฏิกริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน (Hydrodenitrogenation, HDN) สำหรับการกำจัดสารประกอบไนโตรเจน ปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (Hydrodeoxygenation, HDO) สำหรับการกำจัดสารประกอบออกซิเจน หรือปฏิกริยาไฮโดรดีเมทัลไรเซชัน (Hydrodemetalization, HDM) สำหรับการกำจัดสารประกอบโลหะหนัก รายละเอียดของแต่ละปฏิกริยาแสดงดังต่อไปนี้

ก. ปฏิกริยาไฮโดรจีเนชัน

ปฏิกริยาไฮโดรจีเนชันเป็นปฏิกริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ ต้องการตัวเร่งปฏิกริยาและแก๊สไฮโดรเจนในการเกิดปฏิกริยา ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีใช้ปฏิกริยาปฏิกริยาไฮโดรจีเนชันเพื่อกำจัดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกโอเลฟินส์ (Olefins) หรือไดโอเลฟินส์ (Diolfins) ในการป้องกันการเกิดพอลิเมอร์ในผลิตภัณฑ์ สำหรับอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันใช้ปฏิกริยาไฮโดรจีเนชันเพื่อกำจัดสารโพลีอะโรมาติกส์ในช่วงการกลั่นน้ำมันแก๊สโซลีนหรือดีเซล ซึ่งเป็นสารที่สลายตัว

เป็นคาร์บอนได้ง่ายและไปเกาะบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ ตัวอย่างปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของบิวทีน (Butene) แสดงดังสมการที่ 2.5



ข. ปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอร์ไฮเซชัน

ปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอร์ไฮเซชันใช้สำหรับกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบและน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล น้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบิน และน้ำมันก๊าด เพื่อลดการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจากโรงไฟฟ้า เตาเผาในอุตสาหกรรม หรือไอเสียจากยานพาหนะชนิดต่างๆ เช่น เครื่องยนต์ เครื่องบิน เรือยนต์ เพื่อลดหรือหลีกเลี่ยงปัญหามลพิษที่ปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ ปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอร์ไฮเซชันเป็นปฏิกิริยาที่ต้องการตัวเร่งปฏิกิริยาและแก๊สไฮโดรเจน อะตอมของซัลเฟอร์จะถูกกำจัดออกจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในรูปของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ตัวอย่างปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอร์ไฮเซชันในการกำจัดไทโอฟิน (Thiophene) แสดงดังสมการที่ 2.6



ค. ปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน

ปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชันใช้สำหรับกำจัดสารประกอบอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไพริดีน (Pyridine) หรือ ไพโรล (Pyrrole) ออกจากผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊สแอมโมเนีย เพื่อลดการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เป็นปฏิกิริยาที่ต้องการตัวเร่งปฏิกิริยาและแก๊สไฮโดรเจน ปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชันเป็นปฏิกิริยาที่ใช้ในอุตสาหกรรมแก๊สและน้ำมัน ตัวอย่างปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชันในการกำจัดไพโรล แสดงดังสมการที่ 2.7



ง. ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันใช้สำหรับกำจัดสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเจือปน เช่น ฟีนอล (Phenol) ออกจากผลิตภัณฑ์ในรูปของน้ำ เป็นปฏิกิริยาที่ต้องการตัวเร่งปฏิกิริยาและแก๊สไฮโดรเจน สำหรับน้ำมันปิโตรเลียมมีส่วนประกอบของออกซิเจนต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก) จึงทำให้ปฏิกิริยานี้ไม่ใช่วัตถุประสงค์หลักของกระบวนการไฮโดรทรีตติง แต่ปฏิกิริยานี้สามารถประยุกต์ใช้กำจัดออกซิเจนในน้ำมันพืชเพื่อสังเคราะห์น้ำมันดีเซลได้

น้ำมันดีเซลที่สังเคราะห์จากน้ำมันพืชโดยปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชั้นจะมีโครงสร้างที่เหมือนกับปิโตรเลียมดีเซล ตัวอย่างปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชั้นของฟิวแรน (Furan) แสดงดังสมการที่ 2.8



จ. ปฏิกิริยาไฮโดรดีเมทัลไรเซชัน

ปฏิกิริยาไฮโดรดีเมทัลไรเซชันใช้สำหรับกำจัดสารประกอบโลหะหนักที่เจือปนอยู่ในน้ำมันดิบ เช่น พรอท วานาเดียม หรือสารหนู เพื่อป้องกันไม่ให้อัตว์เร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการแตกสลายโมเลกุลเสื่อมสภาพเป็นปฏิกิริยาที่ต้องการตัวเร่งปฏิกิริยาและแก๊สไฮโดรเจน ปฏิกิริยาไฮโดรดีเมทัลไรเซชันทั่วไป แสดงดังสมการที่ 2.9



2.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรทรีตติง

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในกระบวนการไฮโดรทรีตติง คือ NiMo, CoMo และ NiW ปริมาณโลหะที่โหลดทั่วไป คือ Co และ Ni 1-4% โดยน้ำหนัก Mo 8-16% โดยน้ำหนัก และ W 12-25% โดยน้ำหนัก ตัวรองรับที่นิยมใช้ ได้แก่ Alumina, Silica-alumina, Silica, Zeolite และ Magnesia เกณฑ์การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับการใช้งาน ความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาและค่าการเลือกเกิด ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชันและปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo ใช้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo มักถูกใช้ในการบำบัดสารตั้งต้นที่ไม่อิ่มตัว ตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo มีความว่องไวสูงในการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน แต่ไม่เหมาะสำหรับการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชันและปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะโรมาติกส์ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo ใช้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนน้อย และตัวเร่งปฏิกิริยา NiW มีความว่องไวสูงสุดในการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะโรมาติกส์ และไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking)

ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo, CoMo และ NiW ต้องทำการซัลไฟด์ (Sulfidation) ก่อนใช้งาน เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา (Active state) การซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำระหว่าง Start-up วิธีดั้งเดิมทำโดยการป้อนสารที่มีซัลเฟอร์เจือปนหรือใช้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ป้อนร่วมกับแก๊สไฮโดรเจน การซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนที่สำคัญเนื่องจากส่งผลต่อความว่องไวในการทำปฏิกิริยาและเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ในยุคถัดมาขั้นตอนการซัลไฟด์ถูกพัฒนาโดยใช้สารตัวอื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการซัลไฟด์ เช่น คาร์บอน

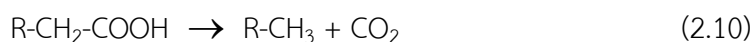
ไดซัลไฟด์ (CS₂) ไดมเมทิล-ซัลไฟด์ (DMS) หรือไดเมทิล-ไดซัลไฟด์ (DMDS) (Topsoe, H. et al. 1996)

2.3.2 การประยุกต์ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงกับน้ำมันพืช

ปัจจุบันปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงถูกประยุกต์ใช้ผลิตน้ำมันดีเซลจากน้ำมันพืชเนื่องจากโครงสร้างไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันพืชมีความใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ขั้นตอนการเปลี่ยนโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นน้ำมันดีเซลประกอบด้วย 3 ปฏิกิริยาหลักคือ ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน ขั้นตอนนี้พันธะที่ไม่อิ่มตัวของไตรกลีเซอไรด์จะถูกทำให้อิ่มตัวด้วยอะตอมของไฮโดรเจน จากนั้นโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์จะถูกทำลาย ได้กรดไขมันอิสระและแก๊สโพรเพน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) และขั้นตอนสุดท้ายคือการกำจัดอะตอมของออกซิเจน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจิเนชัน นอกจากปฏิกิริยาหลักแล้วยังมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น ได้แก่ ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน (Decarbonylation) ปฏิกิริยาไฮโซเมอไรเซชัน (Isomerization) และปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงของผลิตภัณฑ์ รายละเอียดของแต่ละปฏิกิริยาแสดงดังต่อไปนี้

ก. ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเป็นปฏิกิริยาข้างเคียงซึ่งเป็นการกำจัดอะตอมของออกซิเจนโดยไม่ใช้ไฮโดรเจนร่วมทำปฏิกิริยา อะตอมของออกซิเจนจะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้เสียคาร์บอน 1 อะตอมจากสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน ด้วยเหตุนี้จึงเป็นปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการให้เกิด ตัวอย่างปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันแสดงดังสมการที่ 2.10



ข. ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน

ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันเป็นปฏิกิริยาข้างเคียงซึ่งเป็นการกำจัดอะตอมของออกซิเจนโดยใช้ไฮโดรเจน 1 โมเลกุลร่วมทำปฏิกิริยา อะตอมของออกซิเจนจะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และน้ำ ทำให้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเสียคาร์บอน 1 อะตอม ด้วยเหตุนี้จึงเป็นปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการให้เกิด ตัวอย่างของปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน แสดงดังสมการที่ 2.11



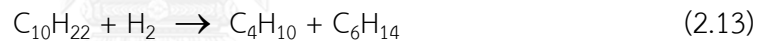
ค. ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน

ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้โครงสร้างของสารเปลี่ยนแปลงจากเดิม แต่ยังคงมีสูตรโมเลกุลเหมือนเดิม (Isomer) การจัดเรียงโครงสร้างที่ต่างกันทำให้สมบัติของสารทั้งทางกายภาพและทางเคมีต่างกัน เช่น จุดเดือด จุดหลอมเหลว ตัวอย่างของปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันแสดงดังสมการที่ (2.12)

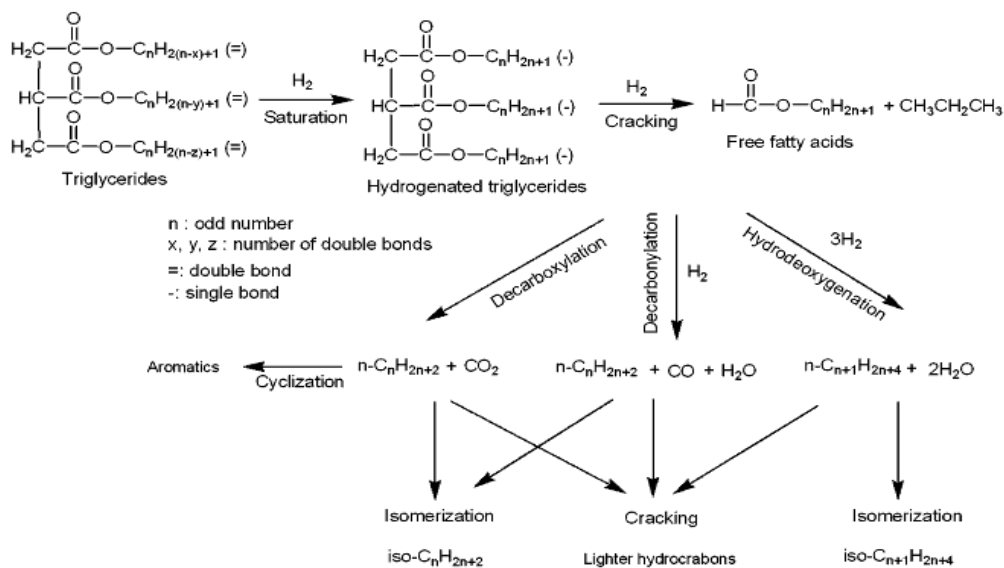


ง. ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง

ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงเป็นปฏิกิริยาที่ใช้แตกโมเลกุลขนาดใหญ่เป็นโมเลกุลขนาดเล็กลง โดยทั่วไปปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงเกิดภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง วัตถุประสงค์ของการทำปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงของน้ำมันปิโตรเลียมคือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันใหม่ ทำให้โมเลกุลมีความสมบูรณ์ แข็งแรง และอึดตัวมากขึ้น ช่วยให้น้ำมันมีความต้านทานการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดีหรือที่เรียกว่าความทนต่อการออกซิเดชัน (Oxidation Resistance) ทนทานต่อความร้อนสูงขึ้น ตัวอย่างของปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง แสดงดังสมการที่ 2.13



เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของไตรกลีเซอไรด์ แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของไตรกลีเซอไรด์ (Veriansyah, B. et al. 2012)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล

2.4.1 ปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิส

Dasaria, M.A. et al. (2005) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล พาลาเดียม เงิน คอปเปอร์ และคอปเปอร์-โครโมต์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน อุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการทดลอง คือ 150, 180, 200, 230, 260 องศาเซลเซียส และ 50, 100, 150, 200, 300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ ความดันแก๊สไฮโดรเจน ความเข้มข้นเริ่มต้นของกลีเซอรอล และตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์-โครโมต์มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลได้สูงที่สุด ค่าผลได้ของ 1,2-PDO เท่ากับ 73% ภาวะที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 200 องศาเซลเซียสและ 200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 4 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนสูงเกิน 200 องศาเซลเซียส และ 200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ส่งผลให้ 1,2-PDO เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสต่อเป็นผลิตภัณฑ์อื่น นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของกลีเซอรอลในช่วง 10-20% โดยน้ำหนัก สามารถลดการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงทำให้ค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น

Kusunoki, Y. et al. (2005) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ruthenium เงิน พาลาเดียม และโรเดียมบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งที่มีความเป็นกรดที่ คือ แอมเบอร์ลิสต์และซีโอไลต์ (MFI: $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 22$, BEA: $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 25$, USY: $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 6.3$) และแบบที่เป็นสารละลาย คือ ทังสแตนออกไซด์ (H_2WO_4) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 120, 140 และ 180 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 4 และ 8 เมกะปาสคาล เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 10 ชั่วโมง ปัจจัยที่ศึกษา คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม และอุณหภูมิ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมที่มีความเป็นกรดสามารถเพิ่มความว่องไวในการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล เมื่อเปรียบเทียบผลของตัวเร่งปฏิกิริยา Ruthenium บนถ่านกัมมันต์โดยไม่มีและ มีตัวเร่งปฏิกิริยาแอมเบอร์ลิสต์ที่ภาวะการทำปฏิกิริยาเดียวกันพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลเท่ากับ 6.3% และ 15% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ruthenium บนถ่านกัมมันต์ที่มีแอมเบอร์ลิสต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลสูงสุดที่อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส และ 4 เมกะปาสคาล เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ลดลง ส่วนความดันแก๊ส

ไฮโดรเจนมากกว่า 4 เมกะปาสคาล จะไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาอย่างมีนัยสำคัญ ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลและค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO เท่ากับ 40.7% และ 43.1% ตามลำดับ

Huang, L. et al. (2008) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Co/SiO₂, Cu/SiO₂, Ni/SiO₂, Pd/SiO₂, Ru/SiO₂, Cu/ZnO/Al₂O₃, Cu/Cr₂O₃, Ni/Al₂O₃ และ Pd/C ทำการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนเพื่อทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ และ Cu/ZnO/Al₂O₃ ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลสูงสุดเท่ากับ 32.3% และ 20.4% ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO เท่ากับ 55.1% และ 80.1% ตามลำดับ จากนั้นศึกษาผลของภาวะการทำปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 170, 180, 190, 200, 210 องศาเซลเซียส และ 0.1, 0.23, 0.36, 0.52, 0.64 เมกะปาสคาล ตามลำดับ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/ZnO/Al₂O₃ มีความว่องไวสูงสุดในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 190 องศาเซลเซียส และ 0.64 เมกะปาสคาล เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 190 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้มากขึ้น แต่ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์หลักมีค่าลดลง และปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดมากขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลและค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงสุดเท่ากับ 96.2% และ 92.2% ตามลำดับ

Marinoiu, M. et al. (2009) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SiO₂, Ni/SiO₂-Al₂O₃ และ Ni/C ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนปัจจัยที่ศึกษา คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ (170, 180, 190, 200, 210, 220, 230, 240 และ 250 องศาเซลเซียส) และความดันแก๊สไฮโดรเจน (8, 15, 20 และ 25 บาร์) เวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SiO₂-Al₂O₃ มีความว่องไวสูงสุดในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิส เนื่องจากความเป็นกรดของตัวรองรับช่วยทำให้ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันซึ่งเป็นขั้นตอนแรกเกิดได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลและค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO สูงขึ้น ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีขึ้น แต่ปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดมากขึ้นตามไปด้วย และพบว่าเมื่อความดันแก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสและความดันแก๊สไฮโดรเจน 25 บาร์ ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลและค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO สูงสุดเท่ากับ 76% และ 98% ตามลำดับ

Balaraju, M. et al. (2009) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ru/C ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด คือ Nb₂O₅, TPA/ZrO₂, CsTPA, CsTPA/ZrO₂ และ IER ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ผลของความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม อุณหภูมิ

ความดันแก๊สไฮโดรเจน ความเข้มข้นเริ่มต้นของกลีเซอรอล และเวลาในการทำปฏิกิริยา ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ในการทดลอง คือ 120, 150, 180, 210 องศาเซลเซียส และ 20, 40, 60, 80 บาร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกลีเซอรอลและเวลาในการทำปฏิกิริยา คือ 20, 40, 60, 80% โดยน้ำหนัก และ 4, 8, 12, 16 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าความเป็นกรดระดับปานกลางของตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม TPA/ZrO₂ ช่วยเพิ่มความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา Ru/C ผลของภาวะการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล ค่าการเลือกเกิด 1,2-PDO และ Ethylene glycol มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึงค่าหนึ่ง ค่าการเลือกเกิด 1,2-PDO จะลดลงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนพบว่าเมื่อเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนจาก 20 บาร์ เป็น 80 บาร์ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลเพิ่มจาก 22.5% เป็น 60.5% ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อความดันแก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้น ส่งผลให้สารมัธยันตร์เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนสูงพบว่าค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ลดลง และ Ethylene glycol เกิดมากขึ้น ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของกลีเซอรอลและเวลาการทำปฏิกิริยาพบว่าปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกลีเซอรอลและเวลาการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 20% โดยน้ำหนักและ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ

Rode, C.V. et al. (2010) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-Cr ที่ถูกโปรโมทด้วยโปรโมเตอร์ 3 ชนิด (Al, Ba และ Zn) ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนเพื่อศึกษาผลของโปรโมเตอร์พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-Cr (Ba) ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลและค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO สูงสุดเท่ากับ 34% และ 84% ตามลำดับ จากนั้นทำการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่องเพื่อศึกษาผลของภาวะการทำปฏิกิริยาปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ (180, 220 และ 240 องศาเซลเซียส) ความดันแก๊สไฮโดรเจน (20, 40 และ 60 บาร์) ความเข้มข้นเริ่มต้นของกลีเซอรอล (20, 40 และ 60% โดยน้ำหนัก) ความเร็วเชิงสเปซของแก๊สไฮโดรเจน (10, 20 และ 30 นอมอลลิตรต่อชั่วโมง) และความเร็วเชิงสเปซของเหลว (0.78, 1.32 และ 2.34 ต่อชั่วโมง) พบว่าอุณหภูมิมิผลมากต่อปฏิกิริยา คือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 180 เป็น 240 องศาเซลเซียส ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลเพิ่มจาก 13% เป็น 87% และค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ลดลงจาก 95% เป็น 86% ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนพบว่าเมื่อเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนจาก 20 บาร์เป็น 80 บาร์ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลเพิ่มจาก 64% เป็น 74% และค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO เพิ่มขึ้นจาก 82% เป็น 90% ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของกลีเซอรอลพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลลดลง ผลของความเร็วเชิงสเปซของแก๊สพบว่า ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ

ต่อปฏิกิริยา และผลของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วเชิงสเปซของของเหลว ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลลดลงเนื่องจากเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาลดลง

Hao, S.L. et al. (2010) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ทำการเคลือบฝัง $\text{H}_4\text{SiW}_{12}\text{O}_{40}$ (STA) ปริมาณต่างกัน (0, 3, 5, 15 และ 30% โดยน้ำหนัก) ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของกลีเซอรอลเท่ากับ 10% โดยน้ำหนัก ความดันไฮโดรเจนเท่ากับ 6 เมกะปาสคาล ปัจจัยที่ศึกษา คือ ผลของปริมาณโปรโมเตอร์ที่ต่างกัน อุณหภูมิ (180, 210, 240 และ 270 องศาเซลเซียส) และความเร็วเชิงสเปซของเหลว (0.45, 0.9 และ 1.8 ต่อชั่วโมง) พบว่าปริมาณ STA ส่งผลต่อความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เมื่อปริมาณ STA เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเป็นกรดมีค่ามากขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Cu}-\text{STA}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เคลือบฝัง STA เท่ากับ 5% โดยน้ำหนัก ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลและค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO สูงสุดเท่ากับ 90.1% และ 89.7% ตามลำดับ ผลของอุณหภูมิพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 180 เป็น 270 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลเพิ่มจาก 2.5% เป็น 97.4% แต่ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ลดลงจาก 97.3% เป็น 37.7% อุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 240 องศาเซลเซียส ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลและค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO เท่ากับ 90.1% และ 89.7% ตามลำดับ ผลของความเร็วเชิงสเปซของเหลวพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วเชิงสเปซของเหลวจาก 0.45 เป็น 1.8 ต่อชั่วโมง ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลลดจาก 95.7% เป็น 81.2% แต่ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO เพิ่มจาก 70.5% เป็น 95.1% โดยความเร็วเชิงสเปซของเหลวที่เหมาะสม คือ 0.9 ต่อชั่วโมง ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลและค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO สูงสุดเท่ากับ 90.1% และ 89.7% ตามลำดับ

Feng, J. et al. (2014) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ru บนตัวรองรับเบสออกไซด์ (Ru/CeO_2 , $\text{Ru}/\text{La}_2\text{O}_3$ และ Ru/MgO) เตรียมโดยวิธีการเคลือบฝัง ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของกลีเซอรอลเท่ากับ 20% โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 5 เมกะปาสคาล เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 ชั่วโมง ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ผลของตัวรองรับเบสออกไซด์ต่อปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสและเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ru/CeO_2 มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงสุด ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลและค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO เท่ากับ 85.2% และ 62.7% ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ru บนตัวรองรับ CeO_2 มีขนาดของอนุภาคเล็กที่สุดและให้ค่าความเป็นเบสระดับปานกลางสูงสุด เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา Ru บนตัวรองรับชนิดอื่น ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสเกิดได้ดี นอกจากนี้

ยังพบว่าการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในภาวะเบสเกิดผ่านปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน-ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน-ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันต่อเนื่องกัน

Delgado, S.N. et al. (2014) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลและ 1,2-PDO โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/TiO₂ และ Pt/SIRAL20 (Al₂O₃-20 wt.% SiO₂) ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนกับ 210 องศาเซลเซียส และ 60 บาร์ ตามลำดับ ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ผลของตัวรองรับต่อปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิส พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/TiO₂ กลีเซอรอลจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันเปลี่ยนเป็น 1,2-PDO และเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน แต่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/SIRAL20 ซึ่งมีความเป็นกรดสูง ส่งผลให้ปฏิกิริยาแทรกกึ่งในการแตกพันธะ C-C เกิดขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มี Ethylene glycol ร่วมด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้ 1,2-PDO เป็นสารตั้งต้น ไม่พบ 1-PO และ 2-PO ในผลิตภัณฑ์ แต่พบ EtOH และ MeOH แสดงให้เห็นว่า 1,2-PDO ไม่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสที่พันธะ C-O

Li, Y. et al. (2014) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ru บนตัวรองรับ HZSM5(X) (เมื่อ X คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ SiO₂/Al₂O₃ = 25, 50, 80, 360 และ 500) ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ความเข้มข้นเริ่มต้นของกลีเซอรอลเท่ากับ 40% โดยน้ำหนัก อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส และ 8 เมกะปาสคาล ตามลำดับ เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 8 ชั่วโมง ปัจจัยที่ศึกษาคือผลของความเป็นกรดของตัวรองรับต่อปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิส พบว่าเมื่ออัตราส่วน SiO₂/Al₂O₃ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้น กลีเซอรอลเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น แต่ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO และ Ethylene glycol ลดลง พบผลิตภัณฑ์ข้างเคียง เช่น Methane มากขึ้นเนื่องจากความเป็นกรดของตัวรองรับช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรแทรกกึ่งในการแตกพันธะ C-C จากงานวิจัยพบว่าอัตราส่วน SiO₂/Al₂O₃ ที่เหมาะสมคือ 25 ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลและค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO เท่ากับ 34.5% และ 29.2% ตามลำดับ

2.4.2 ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

Furimsky et al. (2009) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของฟูราน (Furan) เพื่อกำจัดอะตอมออกซิเจน ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo/Al₂O₃ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส และ 1 บรรยากาศ ตามลำดับ ปัจจัยที่ศึกษา คือ ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปรีดิวซ์และรูปซัลไฟด์ต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปซัลไฟด์สามารถกำจัดอะตอมออกซิเจนได้

ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปปริวิตซ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาประกอบด้วย Ethylene, Propane, Propene, n-Butane, 1-Butene และ cis- และ trans-Butenes

Wang, X. et al. (2004) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของ Hexanal โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ และ NiMo/Al₂O₃ ในรูปซัลไฟด์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 140, 160 และ 180 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้เท่ากับ 69 บาร์ ปัจจัยที่ศึกษา คือ ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน และผลของอุณหภูมิ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ ในทุกช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา และพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ดีขึ้น โดยที่อุณหภูมิเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส ค่าการเปลี่ยนแปลงของ Hexanal และค่าการเลือกเกิดของ Hexanol มีค่าสูงสุดเท่ากับ 99.2% และ 87.6% ตามลำดับ โดย Hexanol ที่เกิดขึ้นจะไม่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันต่อเนื่องจากอุณหภูมิที่ทำให้ปฏิกิริยาไม่สูงมากพอ

Senol, O.I. et al. (2005a) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของสารละลาย Methyl heptanoate 3% โดยน้ำหนัก ใน m-Xylene ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ และ CoMo/Al₂O₃ ในรูปซัลไฟด์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 250 องศาเซลเซียส และ 1.5 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ปัจจัยที่ศึกษา คือ ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดในการกำจัดอะตอมของออกซิเจน และผลกระทบของน้ำต่อตัวเร่งปฏิกิริยา ทำโดยการป้อนไอน้ำ (750, 1,800, 5,000 และ 16,000 ส่วนในล้านส่วน) เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ขณะเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการป้อนไอน้ำร่วมกับแก๊ส H₂S (830, และ 18,600 ส่วนในล้านส่วน) และผลของการป้อน H₂S (1,000 ส่วนในล้านส่วน) อย่างเดียว พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ สามารถเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของ Methyl heptanoate ได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo/Al₂O₃ ค่าการเปลี่ยนแปลงของ Methyl heptanoate โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองเท่ากับ 82% และ 48% ตามลำดับ เมื่อป้อนไอน้ำร่วมขณะเกิดปฏิกิริยาพบว่าน้ำช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของ Methyl heptanoate ลดลงเหลือเท่ากับ 69% และ 41% ตามลำดับ (ปริมาณน้ำไอน้ำที่ป้อนเท่ากับ 18,600 ส่วนในล้านส่วน) ผลของการป้อนแก๊ส H₂S ร่วมกับไอน้ำ พบว่าสามารถช่วยเพิ่มความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา และทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของ Methyl heptanoate บนตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้นเป็น 87% และ 65% ตามลำดับ

Senol, O.I. et al. (2005b) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันของสารประกอบเอสเทอร์ 2 ชนิด คือ Methyl heptanoate และ Methyl hexanoate ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ และ CoMo/Al₂O₃ ในรูปซัลไฟด์ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้เท่ากับ 1.5 เมกะปาสคาล ปัจจัยที่ศึกษา คือ ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด ผลของสภาวะของตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปออกไซด์และรูปซัลไฟด์ และผลของอุณหภูมิ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันได้ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ Methyl heptanoate เป็นสารตั้งต้น คือ Heptane, Hexane, Heptene และ Hexene เมื่อใช้ Methyl hexanoate เป็นสารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ Hexane, Pentane, Hexene และ Pentene ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo/Al₂O₃ ในทุกช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง ทั้งในรูปออกไซด์และรูปซัลไฟด์ ผลของสภาวะของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดเมื่อใช้งานในรูปซัลไฟด์จะมีความว่องไวกว่าเมื่ออยู่ในรูปออกไซด์ในทุกภาวะการทดลอง ผลของอุณหภูมิพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลง และค่าผลได้ของไฮโดรคาร์บอนสูงขึ้น

Senol, O.I. et al. (2007) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันของสารละลาย Heptanol ใน m-Xylene ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ และ CoMo/Al₂O₃ ในรูปซัลไฟด์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 250 องศาเซลเซียส และ 1.5 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ปัจจัยที่ศึกษาคือ ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ Heptane เท่านั้น เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo/Al₂O₃ ผลิตภัณฑ์ที่พบมีทั้ง Heptane และ Heptene แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันไม่เท่ากัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo/Al₂O₃

Romero, Y. et al. (2010) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันของ 2-Ethylphenol ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/Al₂O₃, NiMo/Al₂O₃ และ CoMo/Al₂O₃ ในรูปซัลไฟด์ อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้เท่ากับ 340 องศาเซลเซียส และ 5.75 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ปัจจัยที่ศึกษา คือ เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาของ 2-Ethylphenol ผลของโปรโมเตอร์ต่อความว่องไวและต่อเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชัน พบว่า 2-Ethylphenol สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันได้ 3 เส้นทาง เส้นทางแรกผ่านปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชัน ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน และปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันต่อเนื่องกัน ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น

Ethylcyclohexane เส้นทางที่สองเป็นการเกิดปฏิกิริยาไดออกซิเจนชั้นโดยตรง ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ Ethylbenzene และเส้นทางสุดท้ายผ่านเส้นทางดิสโพรพอร์ชันเนชันและไอโซเมอไรเซชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ Cyclohexane และ Ethylcyclohexane ผลของโปรโมเตอร์พบว่า Ni และ Co ช่วยส่งเสริมให้ตัวเร่งปฏิกิริยา Mo มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นสูงขึ้น โดย Ni จะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาผ่านเส้นทางไฮโดรไดออกซิเจนชั้น ส่วน Co จะช่วยเพิ่มความว่องไวการเกิดปฏิกิริยาผ่านเส้นทางเกิดไฮโดรไดออกซิเจนชั้นโดยตรง

ภทร จิรเศรษฐกุล. (2553) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นของพาล์มโอเลอิน ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ และ CoMo/Al₂O₃ ในรูปซัลไฟด์ ปัจจัยที่ศึกษา คือ ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด อุณหภูมิ (200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส) และความเร็วเชิงสเปซของเหลว (0.5, 1.0 และ 1.5 ต่อชั่วโมง) ทำปฏิกิริยาที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตรพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ มีปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมสูงกว่ากรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo/Al₂O₃ ในทุกภาวะการทดลอง

ภานุวิชญ์ เจริญวงศ์. (2554) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นของพาล์มโอเลอิน พาล์มสเตียรีน และกรดไขมันพาล์ม ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ ในรูปซัลไฟด์ ปัจจัยที่ศึกษา คือ ผลของการไม่ใช้และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ (200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส) และความเร็วเชิงสเปซของเหลว (0.5, 1.0 และ 1.5 ต่อชั่วโมง) ทำปฏิกิริยาที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 50 บาร์ อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันเท่ากับ 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร พบว่ากรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเป็นกรดสูงและไม่พบสารประกอบอัลเคน แสดงว่าปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นของน้ำมันพาล์มเป็นปฏิกิริยาที่ต้องการตัวเร่งปฏิกิริยา กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆ มีดังต่อไปนี้ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบกรดไขมันอิสระปริมาณเล็กน้อย อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส พบกรดไขมันอิสระเป็นส่วนใหญ่และสารประกอบอัลเคนปริมาณเล็กน้อย อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส พบสารประกอบอัลเคนปริมาณมากขึ้นและพบมากที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นเริ่มเกิดที่อุณหภูมิเท่ากับ 250 องศาเซลเซียส และเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิทำปฏิกิริยาสูงขึ้น พบว่าเมื่อความเร็วเชิงสเปซของเหลวมีค่าลดลง สารตั้งต้นจะมีเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณสารประกอบอัลเคนเพิ่มมากขึ้นและปริมาณกรดลดลง นอกจากนี้จากผลการทดลองยังพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันทั้ง 3 ชนิด ให้ปริมาณสารประกอบอัลเคนใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส

ณรงค์วุฒิ เจ้าแก่นแก้ว. (2554) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชั้นของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในรูปซัลไฟด์ ปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ (300, 320, 340, 360 และ 380 องศาเซลเซียส) และความดันแก๊สไฮโดรเจน (450, 750 และ 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) กำหนดความเร็วเชิงสเปซของเหลวเท่ากับ 1.0 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันเท่ากับ 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร พบว่าอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชั้นคือการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ไตรกลีเซอไรด์สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงและแตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระ แต่กรดไขมันอิสระสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชั้นได้เพียงเล็กน้อย ทำให้พบปริมาณกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์สูงและพบสารประกอบอัลเคนปริมาณต่ำ การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 320 ถึง 380 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชั้นสามารถเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนพบว่าเมื่อความดันแก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้นปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชั้นสามารถเกิดได้ดีขึ้นเนื่องจากความสามารถในการละลายของแก๊สไฮโดรเจนในน้ำมันมีค่ามากขึ้น เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยากับน้ำมัน

Toba, M. et al. (2011) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชั้นของน้ำมันพืชใช้แล้ว ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CoMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{NiW}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในรูปซัลไฟด์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ (250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส) ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจน 7 เมกะปาสคาล ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่องเพื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้เท่ากับ 300, 350 องศาเซลเซียส และ 5 เมกะปาสคาล ตามลำดับ การศึกษาผลของอุณหภูมิพบว่าไตรกลีเซอไรด์เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์และไม่พบไดกลีเซอไรด์และโมนอกลิเซอไรด์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสารประกอบที่มีอะตอมออกซิเจนปนอยู่ด้วย เช่น กรดไขมันอิสระ แอลกอฮอล์ และเอสเทอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระและแอลกอฮอล์ กล่าวได้ว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ไตรกลีเซอไรด์สามารถแตกตัวได้สมบูรณ์ให้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันอิสระ แต่ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชั้นและปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเกิดแค่เพียงเล็กน้อย การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชั้นเกิดได้อย่างสมบูรณ์และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคืออนอมอลพาราฟิน การศึกษาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง พบว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีปริมาณไอโซพาราฟินมากกว่าเมื่อเทียบกับการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันเกิดได้ดีขึ้น นอกจากนี้พบว่าไม่พบสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกโอเลฟินส์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{NiW}/\text{Al}_2\text{O}_3$ แต่พบเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

CoMo/Al₂O₃ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo/Al₂O₃ มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันน้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ และ NiW/Al₂O₃ เหมาะสมสำหรับใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

Veriansyah, B. et al. (2012) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับชนิดต่างๆ ปัจจัยที่ศึกษาคือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ และปริมาณกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนที่อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 400 องศาเซลเซียสและ 9.2 เมกะปาสกาล ตามลำดับ พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ sulfided NiMo/Al₂O₃ (92.9%) > 4.29 wt.% Pd/Al₂O₃ (91.9%) > sulfided CoMo/Al₂O₃ (78.9%) > 57.6 wt.% Ni/SiO₂-Al₂O₃ (60.8%) > 4.95 wt.% Pt/Al₂O₃ (50.8%) > 3.06 wt.% Ru/Al₂O₃ (39.7%) ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันเท่ากับ 0.044 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni หรือ Pd ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่คือ n-C₁₇ และ n-C₁₅ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo/Al₂O₃ จะพบ i-Alkane ในผลิตภัณฑ์มากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ และ CoMo/Al₂O₃ พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระมีค่าน้อยกว่า 0.6 % แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดมีความว่องไวสูงสำหรับการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

Hancsók, J. et al. (2012) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันถั่วเหลือง ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา (CoMo/Al₂O₃, NiMo/Al₂O₃ และ NiW/Al₂O₃ ในรูปปริศน์) อุณหภูมิ (280 ถึง 380 องศาเซลเซียส) ความดันแก๊สไฮโดรเจน (20 ถึง 100 บาร์) ความเร็วเชิงสเปซของเหลว (0.75 ถึง 3.0 ต่อชั่วโมง) การทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันเท่ากับ 450 นอมอลลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของไตรกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นและความเร็วเชิงสเปซของเหลวลดลง สำหรับผลของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละตัวเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ CoMo/Al₂O₃ > NiMo/Al₂O₃ > NiW/Al₂O₃ ภาวะดำเนินการที่ดีที่สุดคือที่อุณหภูมิเท่ากับ 360 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 60 ถึง 80 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของเหลว 1.0 ถึง 1.2 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันเท่ากับ 450 นอมอลลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร

Santikunaporn, M. et al. (2012) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันปาล์ม ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ ในรูปซัลไฟด์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ (325, 355 และ 385 องศาเซลเซียส) ความดันแก๊สไฮโดรเจน (2.7 และ 3.4

เมกะปาสคาล) ความเร็วรอบใบพัด (500 และ 600 รอบต่อนาที) ผลผลิตที่เกิดขึ้นพบว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเท่ากับ 355 องศาเซลเซียส ได้ค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ (C_{15} ถึง C_{18}) มากที่สุด การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาแครกกิง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลง ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนพบว่าเมื่อความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลง และผลของความเร็วใบพัดพบว่าเมื่อใช้ความเร็วใบพัดสูงจะช่วยลดผลของการถ่ายเทมวลสาร ส่งผลให้ค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสูงขึ้น

จากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งมีความสามารถในการกำจัดอะตอมออกซิเจนได้เช่นเดียวกับตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นที่ใช้ทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม จึงทำให้มีความน่าสนใจในการประยุกต์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้กับสารตั้งต้นชนิดอื่น เนื่องจากไม่เคยมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งมาทำปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันของกลีเซอรอล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม เพื่อศึกษาเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาและภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

ข้อสรุปจากงานวิจัยเกี่ยวกับการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล และการประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันกับสารตั้งต้นที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ

- 1) เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสสูงขึ้น ส่งผลให้กลีเซอรอลเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น แต่ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO และ 1,3-PDO มีค่าลดลง เนื่องจากผลิตภัณฑ์เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงต่อเป็นสารอื่นที่มีขนาดเล็กลง
- 2) เมื่อความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสสูงขึ้น ส่งผลให้กลีเซอรอลเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น และค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO และ 1,3-PDO เพิ่มขึ้น เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนสามารถละลายในสารตั้งต้นได้มากขึ้น
- 3) เมื่อความเร็วเชิงสเปซของเหลวสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลลดลง เนื่องจากสารมีเวลาในการทำปฏิกิริยาลดลง
- 4) ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ มีความว่องไวในการกำจัดอะตอมของออกซิเจนในน้ำมันพืชสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo/Al₂O₃
- 5) ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งในรูปซัลไฟด์มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปรีดิวซ์ และในรูปออกไซด์

2.5 การกำหนดขอบเขตงานวิจัย

จากงานการศึกษางานวิจัยข้างต้นสามารถเป็นแนวทางในการกำหนดขอบเขตงานวิจัยนี้ ในงานวิจัยนี้ศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของกลีเซอรอล ตามขอบเขตดังนี้

1) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{CoMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เพื่อศึกษาเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา ความว่องไวในการทำปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งทั้ง 2 ชนิด

2) ศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่กลีเซอรอลเริ่มเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน จนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่กลีเซอรอลทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ (ผลวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส กลีเซอรอลไม่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ไม่พบปริมาณกลีเซอรอลในผลิตภัณฑ์)

3) ศึกษาผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนในช่วง 30 ถึง 70 บาร์ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเป็นปฏิกิริยาที่ต้องการแก๊สไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยา การเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนมีผลต่อค่าการละลายของแก๊สไฮโดรเจนในสารตั้งต้น ผลคือปฏิกิริยาเกิดได้มากขึ้น ซึ่งช่วงความดันที่เลือกศึกษาอยู่ในช่วงการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของแอลกอฮอล์

บทที่ 3

การทดลองและการวิเคราะห์

บทนี้แสดงวิธีดำเนินงานวิจัยเพื่อทดสอบผลของปัจจัยที่ศึกษาต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชั้นของกลีเซอรอล ได้แก่ เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชั้นของกลีเซอรอล อุณหภูมิ ความดันแก๊สไฮโดรเจน และตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองเป็นเกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) และเกรดอุตสาหกรรม (Commercial reagent grade) ดังตารางที่ 3.1 น้ำที่ใช้ในการทดลอง คือ น้ำดีไอออไนซ์ (Deionized water)

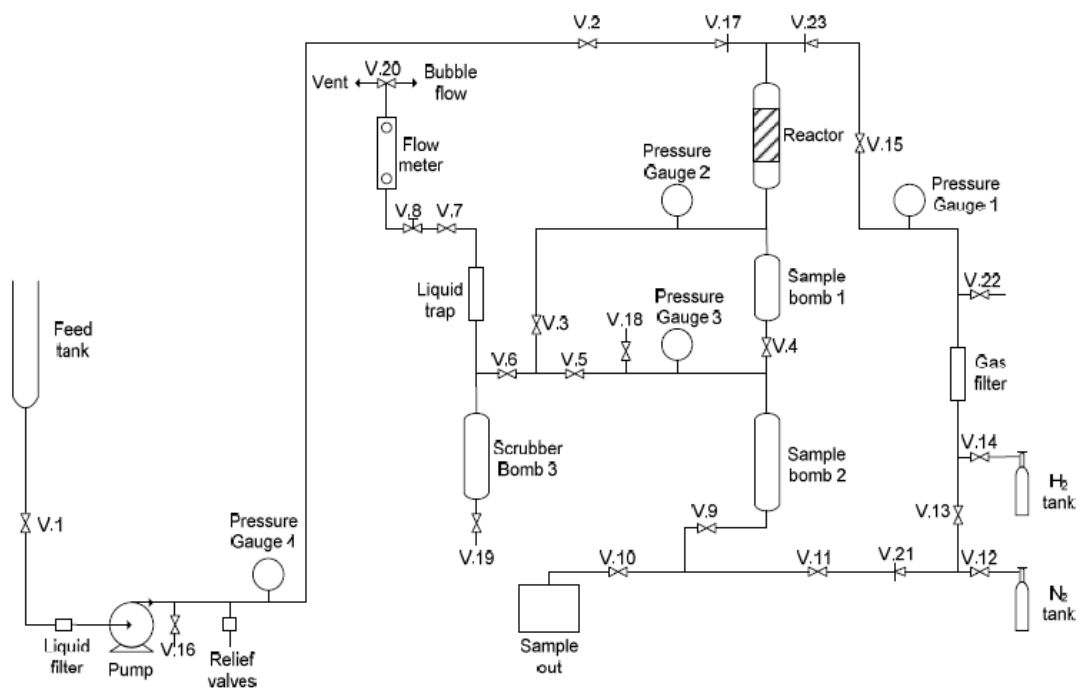
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	ผู้ผลิต	เกรด/ความบริสุทธิ์
Hydrogen	Praxair	99.9%
Nitrogen	Praxair	99.9%
Glycerol	Patum Vegetable Oil	99.5%
1,2-Propanediol	Ajac Finechem	99.5%
1,3-Propanediol	Sigma Aldrich	98.0%
1-Propanol	Qrec Chemical	99.5%
2-Propanol	Ajac Finechem	Commercial
Ethylene glycol	Fisher Chemical	99.9%
Ethanol	RCI Labscan	99.9%
Methanol	RCI Labscan	99.9%
2-Butanol	Qrec	99.5%
Carbon disulfide	Applichem Panreac	99.5%
Hexane	RCI Labscan	Commercial
Sodium hydroxide	Ajax Finechem	99.8%
Sodium periodate	Ajac Finechem	99.8%
Nickle molybdenum catalyst		Commercial catalyst
Cobalt molybdenum catalyst		Commercial catalyst

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

3.2.1 เครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นของกลีเซอรอลคือ เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลต่อเนื่อง สามารถรองรับอุณหภูมิและความดันได้สูงสุดเท่ากับ 380 องศาเซลเซียส และ 110 บาร์ ตามลำดับ ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ เช่น ท่อ ข้อต่อ และวาล์ว ทำด้วยสแตนเลสสตีลเพื่อป้องกันการกัดกร่อน แผนผังระบบเครื่องปฏิกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลต่อเนื่อง

สารตั้งต้นที่เป็นของเหลวซึ่งถูกเก็บไว้ใน Feed tank ถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์โดยไหลผ่านวาล์วหมายเลข 1 ไหลผ่านตัวกรองขนาด 7 ไมโครเมตร เพื่อกรองสิ่งสกปรก ไหลเข้าสู่ปั๊มความดันสูงเพื่อเพิ่มความดันของของเหลว และปรับอัตราการไหลให้ได้ตามต้องการ ความดันของของเหลวสามารถตรวจสอบได้จากมาตรวัดความดันหมายเลข 4 จากนั้นของเหลวจะไหลผ่านวาล์วหมายเลข 2 และเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ สารตั้งต้นที่เป็นแก๊สไฮโดรเจนจะถูกส่งจากถังเก็บ ไหลผ่านวาล์วหมายเลข 14 ผ่านมาตรวัดความดันหมายเลข 1 และผ่านวาล์วหมายเลข 15 ตามลำดับ ก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์

สารตั้งต้นที่เป็นของเหลวและแก๊สจะพบกันที่ส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์ และไหลทางเดียวกันเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 1.27 เซนติเมตร ความหนา 0.089 เซนติเมตร ความยาว 47.5 เซนติเมตร ภายในบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ด้านบนและด้านล่างของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบรรจุเม็ดแก้วขนาด 3 มิลลิเมตรเต็ม ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยประกบเหล็ก 2 ชั้นที่ประกบกับเครื่องปฏิกรณ์ ทำหน้าที่ส่งความร้อนจากฮีตเตอร์ขนาด 1,750 วัตต์ จำนวน 2 ชั้น ชั้นส่วนทั้งหมดถูกหุ้มด้วยฉนวนใยเซรามิก อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถูกควบคุมโดยเทอร์โมคัปเปิล 4 ตัว ซึ่งถูกติดตั้งภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ 3 ตัว คือ ส่วนบน ส่วนกลาง ส่วนล่าง และภายในเครื่องปฏิกรณ์ 1 ตัว

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและของเหลวจะออกทางด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์ และถูกแยกออกจากกันโดยไหลผ่านถังเก็บตัวอย่างถังที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สจะไหลผ่านวาล์ว หมายเลข 5 วาล์วหมายเลข 6 และวาล์วหมายเลข 20 ซึ่งสามารถเลือกได้ระหว่างปล่อยสู่ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ หรือไหลผ่านมาตรวัดอัตราการไหล ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจะไหลลงสู่ด้านล่างของถังเก็บตัวอย่าง

3.2.2 เครื่อง X-ray fluorescence

เครื่อง X-ray fluorescence เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของสารตัวอย่าง ทำโดยการวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) ที่ปลดปล่อยออกมา ธาตุแต่ละชนิดจะมีพลังงานเฉพาะตัวจึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณรังสีที่ปลดปล่อยออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่าง ทำให้สามารถหาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดในสารตัวอย่างได้อีกด้วย

3.2.3 เครื่อง BET

เครื่อง BET (Brunauer-Emmett-Teller) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย

3.2.4 เครื่อง NH₃-TPD

NH₃-TPD (Temperature-Programmed Desorption of Ammonia) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หาปริมาณและความแรงของกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา อาศัยหลักการดูดซับ-คายซับของแก๊สแอมโมเนียที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยคือ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องผ่านกระบวนการซัลไฟด์ (Sulfidation) เพื่อเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปซัลไฟด์ก่อนใช้งาน การซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและเวลาการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนการซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำดังต่อไปนี้

1. ป้อนสารละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ในเฮกเซนปริมาณร้อยละ 1.5 โดยปริมาตร เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยความเร็วเชิงสเปซของเหลวเท่ากับ 2 ต่อชั่วโมง ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ความดัน 20 บาร์
2. เพิ่มอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เป็น 150 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส ต่อ 10 นาที จากอุณหภูมิห้อง
3. ปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกจากระบบ และแทนที่ด้วยแก๊สไฮโดรเจน ความดัน 20 บาร์ ปรับอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 6.0 (อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อสารละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ในเฮกเซนเท่ากับ 200 ต่อ 1 โดยปริมาตร)
4. หลังจากปรับอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนได้แล้ว ทำการคงอุณหภูมิไว้ที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. เพิ่มอุณหภูมิเป็น 230 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ต่อ 5 นาที และคงไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
6. เพิ่มอุณหภูมิเป็น 280 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ต่อ 5 นาที และคงไว้เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
7. เพิ่มอุณหภูมิเป็น 320 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ต่อ 5 นาที และคงไว้เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

3.3.2 การทำการทดลอง

หลังจากซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก่อนเริ่มการทดลองจะลดอุณหภูมิเหลือ 240 องศาเซลเซียส และทำการป้อน 2-Propanol เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ด้วยความเร็วเชิงสเปซของเหลวเท่ากับ 1 ต่อชั่วโมง ก่อนทำการป้อนกลีเซอรอลเข้าสู่ระบบ เนื่องจากสารละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ในเฮกเซนและกลีเซอรอลไม่ละลายเข้าด้วยกัน แต่ 2-Propanol สามารถละลายได้ดีทั้งในเฮกเซนและกลีเซอรอล หลังจากป้อน 2-Propanol เพื่อล้างเฮกเซนออกจาก

ระบบเรียบร้อยแล้ว ป้อนกลีเซอรอลเข้าสู่ระบบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อล้าง 2-Propanol ออกจากระบบ และเริ่มทำการทดลอง ภาวะการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ภาวะการทดลอง

ภาวะการทดลอง	
อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ (องศาเซลเซียส)	200, 220, 240, 260, 280
ความดันแก๊สไฮโดรเจน (บาร์)	30, 50, 70
ความเร็วเชิงสเปซของเหลว (ต่อชั่วโมง)	1.0
อัตราส่วนแก๊สต่อกลีเซอรอล (โดยปริมาตร)	500:1
ตัวเร่งปฏิกิริยา	NiMo/Al ₂ O ₃ , CoMo/Al ₂ O ₃
ปริมาตรเบดตัวเร่งปฏิกิริยา (มิลลิลิตร)	30

3.3.3 การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างจากระบบทำทุก 4 ชั่วโมง ระบบถูกออกแบบให้มีถังเก็บตัวอย่าง 2 ถัง เพื่อรักษาภาวะคงตัวของระบบ ขั้นตอนในการเก็บตัวอย่าง มีดังนี้

1. เปิดวาล์วหมายเลข 3 ปิดวาล์วหมายเลข 4 และ 5 เพื่อแยกถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 ออกจากระบบ ของเหลวที่เหลืออย่างต่อเนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกเก็บในถังเก็บตัวอย่างที่ 1 ชั่วคราว และแก๊สจากระบบจะไหลผ่านวาล์วหมายเลข 3 เพื่อออกสู่บรรยากาศ

2. ลดความดันภายในถังเก็บตัวอย่างที่ 2 โดยการเปิดวาล์วหมายเลข 18 จากนั้นปล่อยผลิตภัณฑ์ของเหลวออกจากระบบด้วยแรงดัน ผ่านวาล์วหมายเลข 9 และ 10 สู่อ่างเก็บตัวอย่าง

3. หลังการเก็บตัวอย่างเสร็จสิ้น ถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 จะสูญเสียความดัน จึงต้องเพิ่มความดันให้เท่ากับความดันภายในระบบ โดยใช้แก๊สไนโตรเจนไหลผ่านวาล์วหมายเลข 12 11 และ 9 ตามลำดับ เมื่อความดันในถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 มีค่าเท่ากับความดันภายในระบบ ทำการปิดวาล์วหมายเลข 9 11 และ 12 และเปิดวาล์วหมายเลข 4 และ 5 และปิดวาล์วหมายเลข 3 เพื่อเชื่อมต่อถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 กับระบบทั้งหมด

3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง

เมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยา ตัวอย่างที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

3.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอล

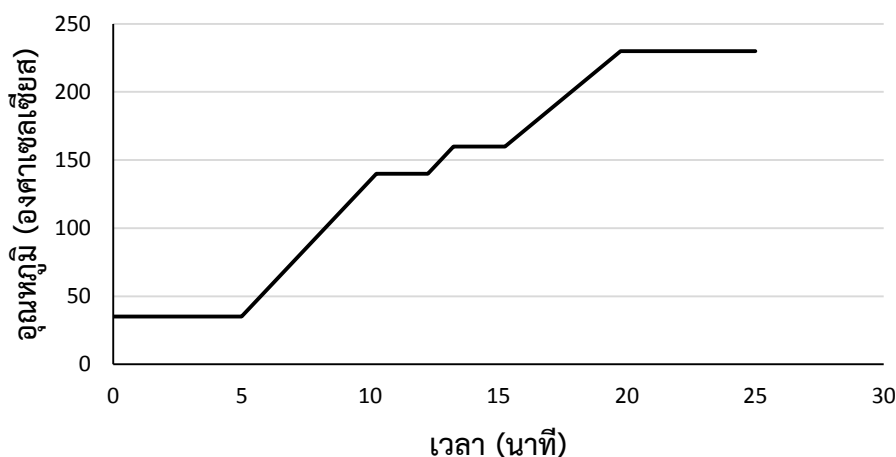
ตัวอย่างที่ได้หลังจากการทำปฏิกิริยาจะนำไปวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาด้วยวิธีการไทเทรตตามมาตรฐาน BS 5711 ซึ่งนำไปคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นต่อไป

3.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟียี่ห้อ Varian รุ่น 3800 คอลัมน์ที่ใช้เป็นแบบแคปิลารีชนิดมีขั้ว (Agilent, HP- Innovax 20M) ตัวตรวจจับสัญญาณเป็นแบบเปลวไอออนไนซ์ (Flame Ionization Detector, FID)

การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีทำโดยผสมตัวทำละลาย Methanol ต่อสารมาตรฐาน 2-Butanol และผลิตภัณฑ์ในอัตราส่วน 1 : 19.9 : 20 นำตัวอย่างปริมาณ 1 ไมโครลิตร ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ภาวะคอลัมน์ของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี แสดงดังรูปที่ 3.2

ภาวะคอลัมน์ของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



รูปที่ 3.2 ภาวะคอลัมน์ของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

3.5 การคำนวณที่เกี่ยวข้อง

3.5.1 การคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Respond Factor)

ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองเป็นค่าที่บ่งบอกถึงค่าการตอบสนองของสารที่วิเคราะห์เมื่อเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน นิยามดังสมการที่ 3.1

$$R.F. = \frac{A_{I.S.} \times m_{Product}}{A_{Product} \times m_{I.S.}} \quad (3.1)$$

- โดย R.F. คือ แฟกเตอร์ตอบสนอง
 $m_{Product}$ คือ มวลของผลิตภัณฑ์ในตัวอย่าง
 $A_{Product}$ คือ พื้นที่ของผลิตภัณฑ์จากโครมาโทแกรม
 $m_{I.S.}$ คือ มวลของ Internal Standard ในตัวอย่าง
 $A_{I.S.}$ คือ พื้นที่ของ Internal Standard จากโครมาโทแกรม

ตัวอย่างการคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของ 1,2-PDO ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- น้ำหนักของ 1,2-PDO = 0.0512 กรัม
- พื้นที่ของ 1,2-PDO = 49,246
- น้ำหนักของสารมาตรฐาน = 0.0502 กรัม
- พื้นที่ของสารมาตรฐาน = 75,179

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.1 จะได้

$$1.557 = \frac{75,179 \times 0.0512}{49,246 \times 0.0502}$$

3.5.2 การคำนวณปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์จากโครมาโทแกรม

$$\text{ปริมาณผลิตภัณฑ์ (\%)} = \frac{R.F._{Product} \times m_{I.S.} \times A_{Product}}{A_{I.S.} \times m_{Sample} \times m_{Total}} \times 100 \quad (3.2)$$

- โดย $R.F._{Product}$ คือ แฟกเตอร์ตอบสนองของผลิตภัณฑ์
 $m_{I.S.}$ คือ มวลของ Internal Standard ในตัวอย่าง
 $A_{Product}$ คือ พื้นที่ของผลิตภัณฑ์จากโครมาโทแกรม
 $m_{Product}$ คือ มวลของผลิตภัณฑ์ในตัวอย่าง
 $A_{I.S.}$ คือ พื้นที่ของ Internal Standard จากโครมาโทแกรม

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณ 1,2-PDO ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- แฟกเตอร์ตอบสนองของ 1,2-PDO = 1.502
- น้ำหนักของตัวอย่าง = 0.4963 กรัม
- พื้นที่ของ 1,2-PDO จากโครมาโทแกรม = 75,525

- น้ำหนักของสารมาตรฐานในตัวอย่าง = 0.025 กรัม
- พื้นที่ของสารมาตรฐานจากโครมาโทแกรม = 46,870

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.2 จะได้

$$12.64\% = \frac{1.557 \times 0.025 \times 75,525}{46,870 \times 0.4963} \times 100$$

3.5.3 การคำนวณปริมาณร้อยละของกลีเซอรอลในตัวอย่าง

$$\text{ปริมาณกลีเซอรอล (\%)} = \frac{V_{\text{Sample}} \times V_{\text{Blank}}}{g_{\text{Sample}}} \times \frac{\text{MW}_{\text{Glycerol}} \times \text{Conc}_{\text{NaOH}}}{1000} \quad (3.3)$$

โดย	V_{Sample}	คือ ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรต
	V_{Blank}	คือ ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรตเมื่อไม่ใส่ตัวอย่าง
	g_{Sample}	คือ น้ำหนักสารตัวอย่าง
	$\text{MW}_{\text{Glycerol}}$	คือ มวลโมเลกุลของกลีเซอรอล
	$\text{Conc}_{\text{NaOH}}$	คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณร้อยละของกลีเซอรอลซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรต = 21.15 มิลลิลิตร
- ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรตเมื่อไม่ใส่ตัวอย่าง = 11.6 มิลลิลิตร
- น้ำหนักสารตัวอย่าง = 0.2557 กรัม
- มวลโมเลกุลของกลีเซอรอล = 92.05 กรัม/กรัมโมล
- ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ = 0.123 โมลต่อลิตร

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.3 จะได้

$$42.29\% = \frac{21.15 - 11.6}{0.2557} \times \frac{92.05 \times 0.123}{1000}$$

3.5.4 การคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล

$$\text{การเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล (\%)} = \frac{m_{\text{In}} - (\text{wt\%}_{\text{Glycerol}} \times m_{\text{Out}})}{m_{\text{In}}} \times 100 \quad (3.4)$$

โดย	m_{In}	คือ น้ำหนักของกลีเซอรอลที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์
	m_{Out}	คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์

$wt\%_{\text{Glycerol}}$ คือ ปริมาณร้อยละกลีเซอรอลในสารตัวอย่าง
ตัวอย่างการคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- น้ำหนักของกลีเซอรอลที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ = 148 กรัม
- น้ำหนักของตัวจากที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ = 142 กรัม
- ปริมาณกลีเซอรอลในสารตัวอย่าง = 42.29 %

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.4 จะได้

$$59.43\% = \frac{148 - (0.4229 \times 142)}{148} \times 100$$

3.5.5 การคำนวณปริมาณกลีเซอรอลที่ทำปฏิกิริยา

$$\text{กลีเซอรอลที่ทำปฏิกิริยา} = \frac{m \times X}{MW_{\text{Glycerol}}} \quad (3.5)$$

โดย m_{in} คือ น้ำหนักของกลีเซอรอลที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์
 X คือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล

MW_{Glycerol} คือ มวลโมเลกุลของกลีเซอรอล

ตัวอย่างการคำนวณกลีเซอรอลที่ทำปฏิกิริยาซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- น้ำหนักของกลีเซอรอลที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ = 148 กรัม
- ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล = 0.5943
- มวลโมเลกุลของกลีเซอรอล = 92.05 กรัม/กรัมโมล

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.5 จะได้

$$0.80 = \frac{148 \times 0.5943}{92.05}$$

3.5.6 การคำนวณค่าร้อยละการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์

$$\text{ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ (\%)} = \frac{wt\%_{\text{Product}} \times m_{\text{Product}}}{MW_{\text{Product}} \times \text{Glycerol}_{\text{Reacted}}} \quad (3.6)$$

โดย $wt\%_{\text{Product}}$ คือ ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์จากการคำนวณตามหัวข้อ 3.4.2

m_{Product} คือ น้ำหนักของตัวจากที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์

MW_{Product} คือ มวลโมเลกุลของกลีเซอรอล

$Glycerol_{\text{Reacted}}$ คือ กลีเซอรอลที่เกิดปฏิกิริยา

ตัวอย่างการคำนวณค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- ปริมาณร้อยละ 1,2-PDO ในตัวอย่าง = 0.1264
- น้ำหนักของตัวจากที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ 142 กรัม
- มวลโมเลกุลของ 1,2-PDO = 76.09 กรัม/กรัมโมล
- กลีเซอรอลที่เกิดปฏิกิริยา = 0.80 กรัมโมล

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.6 จะได้

$$29.48\% = \frac{0.1264 \times 142}{76.09 \times 0.80} \times 100$$

3.5.7 การคำนวณค่าความเร็วเชิงสเปซของเหลว

$$LHSV = \frac{F_{\text{Feed}}}{V_{\text{Bed}}} \quad (3.7)$$

โดย LSHV คือ ความเร็วเชิงสเปซของเหลว (ชม^{-1})

F_{Feed} คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้น (มล./ชม.)

V_{Bed} คือ ปริมาตรของเบดบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา (มล.)

ตัวอย่างการคำนวณค่าความเร็วเชิงสเปซของเหลวที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของเหลวเท่ากับ 1 ชั่วโมง⁻¹ มีค่าดังต่อไปนี้

- อัตราการไหลของสารตั้งต้น = 30 มล./ชม
- ปริมาตรของเบดบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา = 30 มล.

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.7 จะได้

$$\text{ความเร็วเชิงสเปซของเหลว } (\text{ชม}^{-1}) = \frac{30}{30} = 1 \text{ ชม}^{-1}$$

3.5.8 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน (Error Bar)

ค่าความคลาดเคลื่อนแบ่งเป็นสองค่าคือ ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดและค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Max. error} = (\text{Max. value} - \text{Avg. value}) \quad (3.8)$$

$$\text{Min. error} = (\text{Avg. value} - \text{Min. value}) \quad (3.9)$$

โดย	Max. error	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด
	Max. error	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด
	Max. value	คือ ค่าสูงสุด
	Min. value	คือ ค่าต่ำสุด
	Avg. value	คือ ค่าเฉลี่ย

ตัวอย่างการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด และค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด มีค่าดังต่อไปนี้

$$\text{- ค่าสูงสุด} = 59.43$$

$$\text{- ค่าต่ำสุด} = 54.99$$

$$\text{- ค่าเฉลี่ย} = 56.83$$

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.8 และ 3.9 จะได้

$$\text{Max. error} = (\text{Max. value} - \text{Avg. value}) = (59.43 - 56.83) = 2.60$$

$$\text{Min. error} = (\text{Avg. value} - \text{Min. value}) = (56.83 - 54.99) = 1.84$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

งานวิจัยนี้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้นของกลีเซอรอล ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลต่อเนื่อง ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้นคือ ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา (ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม (NiMo) และตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม (CoMo)) อุณหภูมิ (200, 220, 240, 260 และ 280 องศาเซลเซียส) และความดันแก๊สไฮโดรเจน (30, 50 และ 70 บาร์) กำหนดอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ผลการทดลองถูกนำเสนอและอภิปราย ตามลำดับต่อไปนี้

- 4.1 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา
- 4.2 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้นของกลีเซอรอล
- 4.3 ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล
- 4.4 ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์

4.1 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองทำการเปรียบเทียบปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้นของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา (NiMo/Al₂O₃) และตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา (CoMo/Al₂O₃) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองเป็นเกรดทางการค้า ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF), BET และ NH₃-TPD เพื่อหาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุและองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม มีปริมาณโมลิบดีนัมซึ่งเป็นโลหะหลักปริมาณใกล้เคียงกันคือ 13.37% โดยโมล และ 14.43% โดยโมล นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดมีปริมาณโปรโมเตอร์แต่ละชนิดใกล้เคียงกันอีกด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีโลหะนิกเกิลเท่ากับ 6.95% โดยโมล และตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมมีปริมาณโคบอลต์เท่ากับ 6.30% โดยโมล

ตารางที่ 4.1 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

องค์ประกอบ	NiMo ปริมาณ (ร้อยละโดยโมล)	CoMo ปริมาณ (ร้อยละโดยโมล)
Al ₂ O ₃	70.59	51.96
MoO ₃	13.37	14.43
NiO	6.95	0.00
CoO	0.00	6.30
P ₂ O ₅	3.92	1.10
SiO ₂	4.11	5.09
TiO ₂	0.00	20.70
Rh	0.19	0.12
SO ₃	0.51	0.00
Cl	0.36	0.29

4.1.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวเร่งปฏิกิริยา

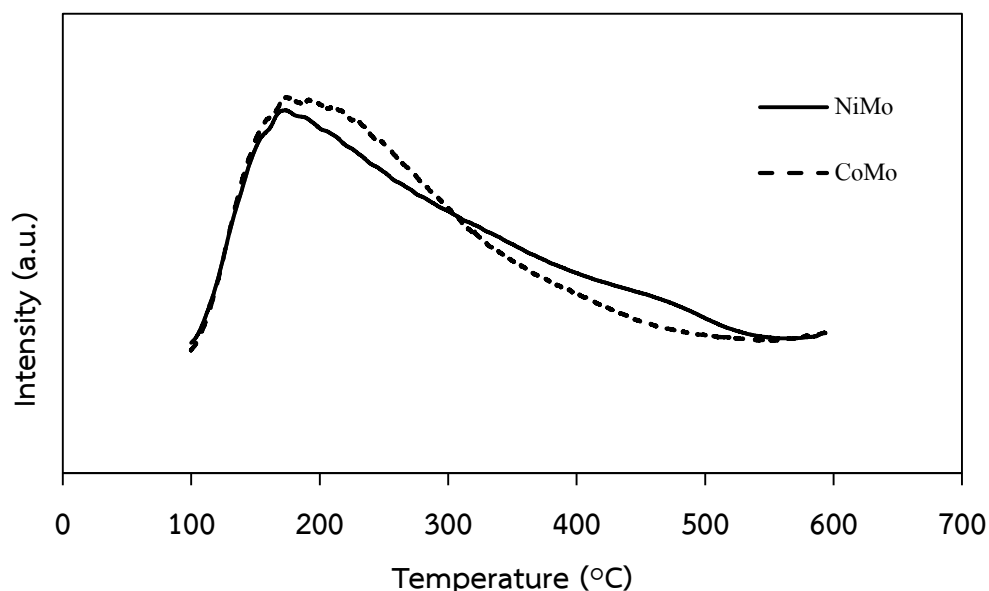
ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีพื้นที่ผิว มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวมาก ส่งผลให้สารตั้งต้นมีโอกาส เข้าทำปฏิกิริยาได้มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวน้อย ผลการทดลองยังพบอีกด้วยว่าตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลโมลิบดีนัมให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีพื้นที่ผิวมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

ตารางที่ 4.2 ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)	เส้นผ่านศูนย์กลางของ รูพรุนเฉลี่ย (nm)
NiMo/Al ₂ O ₃	115.77	0.162	1.21
CoMo/Al ₂ O ₃	89.276	0.128	1.21

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ความแรงของกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

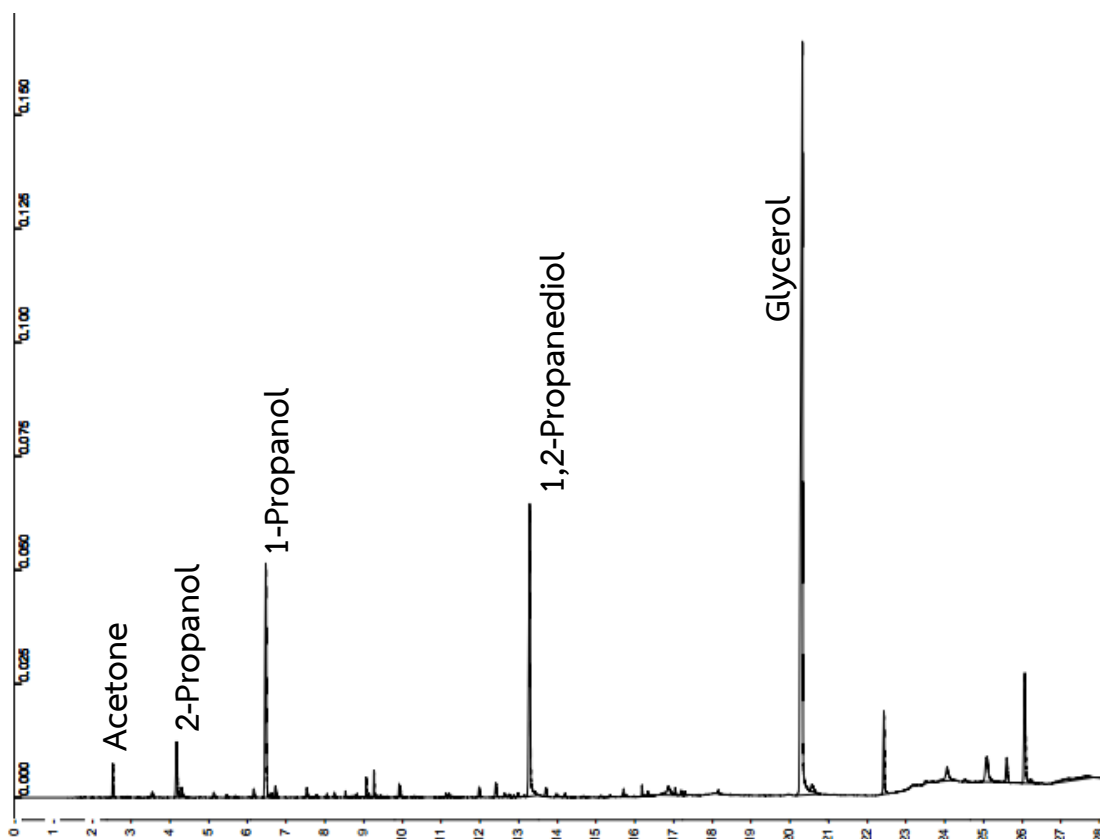
รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแรงของกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค NH_3 -TPD ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีความสูงพีการคายซับแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 100 ถึง 300 องศาเซลเซียส น้อยกว่าความสูงพีการคายซับแอมโมเนียของตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีปริมาณความเป็นกรดอ่อนน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม แต่อย่างไรก็ตามการคายซับของแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 300 ถึง 500 องศาเซลเซียสพบว่าพีการคายซับของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีความสูงมากกว่าพีการคายซับของตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีความเป็นกรดแก่มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม



รูปที่ 4.1 การคายซับแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

4.2 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันของกลีเซอรอล

การศึกษาเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันของกลีเซอรอล ทำโดยวิเคราะห์ตัวอย่างที่ได้จากการทำการทดลองเพื่อหาค่าประกอบของสารที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออนไนเซชัน โดยการเทียบรีเทนชันไทม์ (Retention time) ของผลิตภัณฑ์กับสารมาตรฐาน ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.2

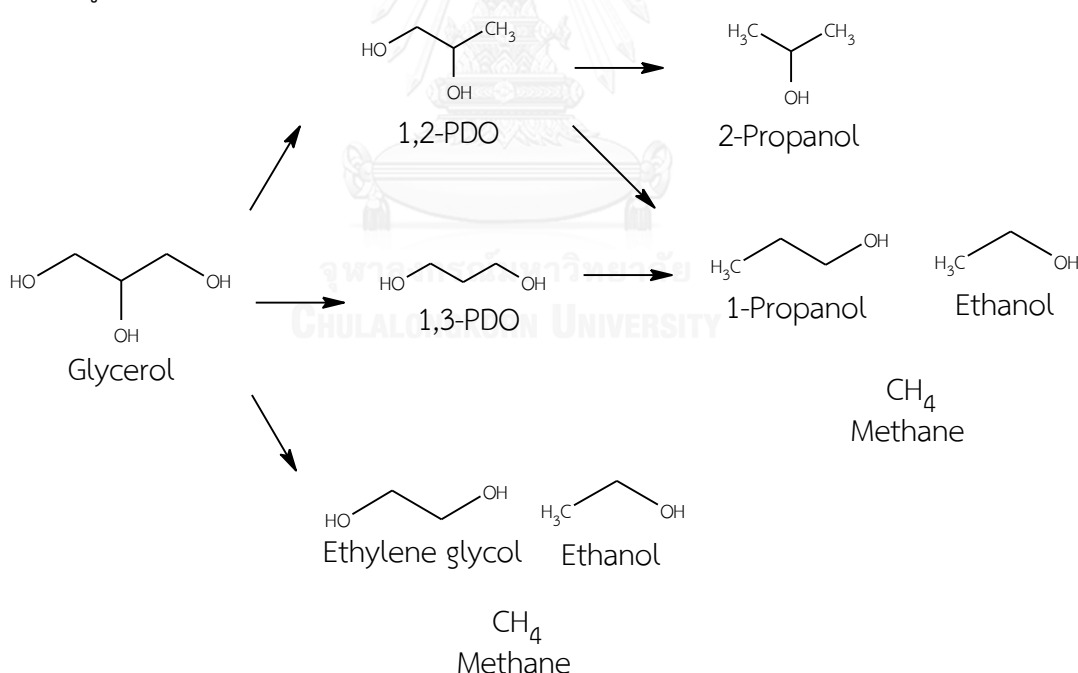


รูปที่ 4.2 โครมาโทแกรมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออไนเซชันของตัวอย่างจากการทำการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

โครมาโทแกรมแสดงให้เห็นว่า ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นคือ Acetone, 2-PO, 1-PO และ 1,2-DPO ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชันของกลีเซอรอลในงานวิจัยนี้ คล้ายกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากงานวิจัยอื่น ดังต่อไปนี้

งานวิจัยของ Kusunoki, Y. et al. (2005) ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ (Ru/C, Pt/C, Pd/C และ Rh/C) และตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมที่เป็นกรด ($\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$, BEA, USY, MFI, H_2WO_4 , Amberlyst และ H_2SO_4) ที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิสของกลีเซอรอล ใช้สารละลายกลีเซอรอลในน้ำ 20% โดยน้ำหนัก ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้คือ 120 องศาเซลเซียส และ 80 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 ชั่วโมง พบว่าผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้น ได้แก่ 1,2-PDO, 1,3-PDO, 1-PO และ 2-PO นอกจากนี้ยังพบผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดจากปฏิกิริยาแตกกิ่ง (Cracking reaction) ได้แก่ Ethylene glycol, EtOH, MeOH และ Methane ผลการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ru/C ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของ

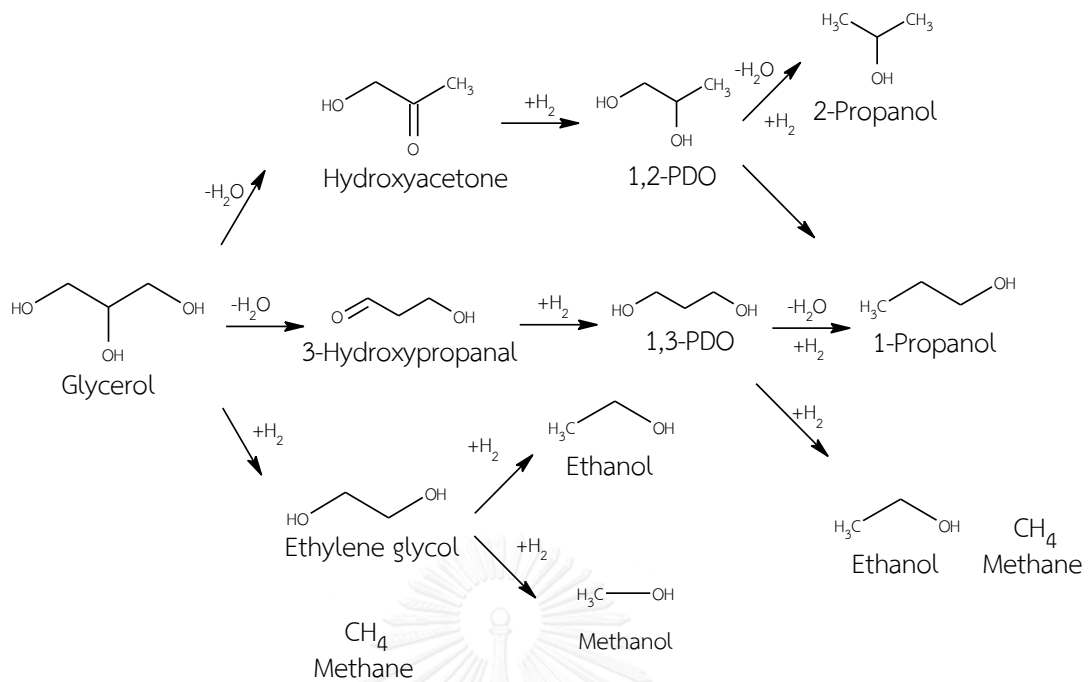
กลีเซอรอลสูงสุด (6.3%) เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะชนิดอื่น (น้อยกว่า 1%) อย่างไรก็ตาม ผลผลิตที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเท่ากับ 81.4%) ดังนั้นจึงเลือกตัวเร่งปฏิกิริยา Ru/C ใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดชนิดต่างๆ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ru/C + Amberlyst ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลสูงสุด (40%) เมื่อเทียบกับการใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดชนิดอื่น (น้อยกว่า 4%) นอกจากนี้ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล โดยไม่ใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะพบว่าได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลน้อยกว่า 0.3% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสต้องการตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ และการใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะช่วยเพิ่มความว่องไวในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของ 1,2-PDO และ 1,3-PDO เพื่อไขข้อสงสัยเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของ 1,2-PDO และ 1,3-PDO คือ 1-PO, 2-PO, EtOH และ Methane โดยไม่พบ Ethylene glycol จากสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า Ethylene glycol เกิดขึ้นโดยตรงจากปฏิกิริยาแทรกกิ่งของกลีเซอรอล ผู้วิจัยนำเสนอเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดย Kusunnoki และคณะ (2005)

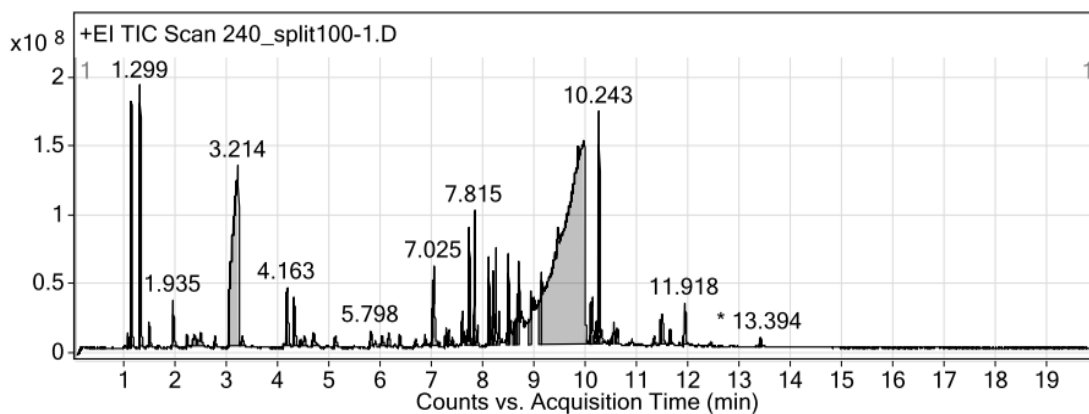
Miyazawa, T. et al. (2006) ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ (Ru/C, Pt/C, Pd/C และ Rh/C) และตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมที่เป็นกรด (HCl, Amberlyst และ H₂SO₄) ที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล ใช้สารละลายกลีเซอรอลในน้ำ 20% โดยน้ำหนัก ทำการทดลองใน

เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้คือ 120 องศาเซลเซียส และ 80 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 ชั่วโมง นิยามผลิตภัณฑ์หลัก ได้แก่ 1,2-PDO, 1,3-PDO, 1-PO และ 2-PO ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดจากปฏิกิริยาแทรกกิง ได้แก่ Ethylene glycol, EtOH, MeOH และ Methane ผลการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ru/C ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลสูงสุด (3.5%) เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะชนิดอื่น (น้อยกว่า 0.5%) ผลการเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา Amberlyst พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ru/C + Amberlyst ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลและค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสสูงสุดเท่ากับ 12.9% และ 9.7% ตามลำดับ ขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ru/C ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดอีก 2 ชนิด คือ H_2SO_4 และ HCl ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลและค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสลดลง ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา Ru/C + Amberlyst จึงถูกเลือกใช้เพื่อศึกษาเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล ทั้งนี้ในการทดลองมีการพบ Hydroxyacetone ในปริมาณน้อยกว่า 0.01% ซึ่งเป็นสารมัธยันตร์ของ 1,2-PDO คาดว่า Hydroxyacetone เกิดจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันซึ่งถูกเร่งปฏิกิริยาโดยความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันต่อโดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ ได้ผลิตภัณฑ์คือ 1,2-PDO ผู้วิจัยจึงทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของ Hydroxyacetone พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ru/C ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของ Hydroxyacetone 100% ผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งหมดเป็น 1,2-PDO จึงสรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยาย่อยคือ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันซึ่งอาศัยความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันโดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ นอกจากนี้ผู้วิจัยทำการทดลองโดยใช้สารตั้งต้นเป็นสารละลายของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิส เพื่อศึกษาเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล สารละลายแต่ละชนิดมีความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนักจากการทดลองพบว่าสารละลาย MeOH, EtOH, 1-PO และ 2-PO ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงเกือบ 0% จึงถูกพิจารณาเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายของปฏิกิริยา การทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของสารละลาย Hydroxyacetone และสารละลาย 3-Hydroxypropanal พบว่าได้ผลิตภัณฑ์เป็น 1,2-PDO และ 1,3-PDO ตามลำดับ รวมถึงมีผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายเกิดขึ้นด้วย การทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของสารละลาย Ethylene glycol พบว่าได้ MeOH และ EtOH เป็นผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงเสนอเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดย Miyazawa และคณะ (2006)

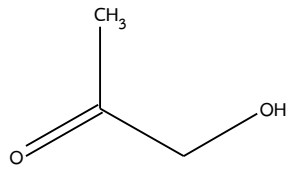
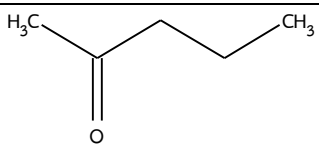
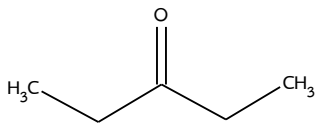
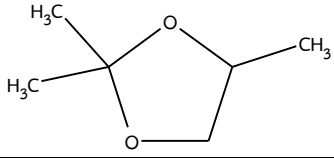
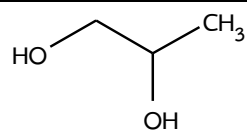
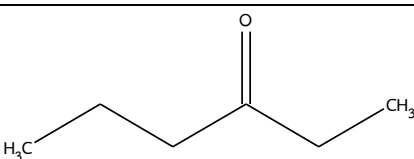
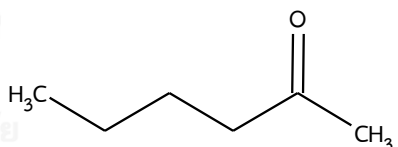
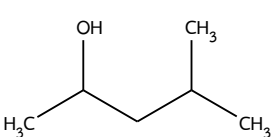
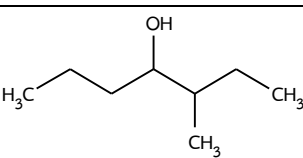
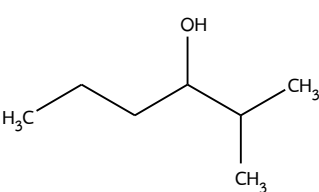
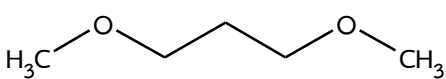
งานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยาย่อยคือ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันซึ่งต้องการความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันซึ่งอาศัยความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ การเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันจะได้สาร 2 ชนิดคือ Hydroxyacetone และ 3-Hydroxypropanal ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันต่อไปได้เป็น 1,2-PDO และ 1,3-PDO ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม 1,2-PDO และ 1,3-PDO สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสต่อไปได้เป็นผลิตภัณฑ์ตัวอื่น จากโครมาโทแกรมของตัวอย่างจากการทำการทดลองที่นำไปวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เห็นได้ว่านอกจากจะตรวจพบพีกของสารที่เป็นผลิตภัณฑ์หลักแล้ว ยังพบพีกของสารอื่นอีกด้วย แต่ไม่สามารถระบุได้ด้วยวิธีการเทียบปริมาตรพื้นที่กับสารมาตรฐาน ดังนั้นจึงนำตัวอย่างเดียวกันไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีตัวตรวจวัดชนิดแมสสเปกโตรมิเตอร์ ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.5 ชื่อสารเคมีและสูตรโครงสร้างแสดงดังตารางที่ 4.3

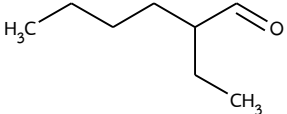
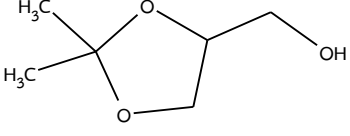
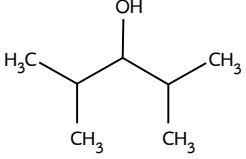
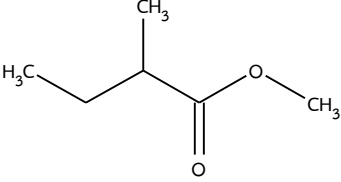
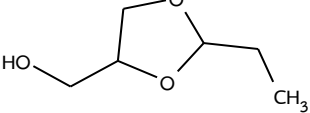
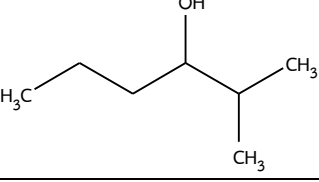
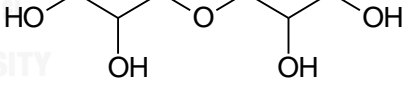
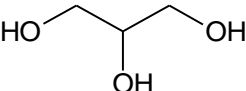


รูปที่ 4.5 โครมาโทแกรมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดแมสสเปกโตรมิเตอร์ของตัวอย่างจากการทำการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

ตารางที่ 4.3 ชื่อสารและสูตรโครงสร้างจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดแมสสเปกโตรมิเตอร์ของตัวอย่างจากการทำการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รีเทนชันไทม์	ชื่อสาร	สูตรโครงสร้าง
1.056	Ethanol (C_2H_6O)	<chem>CCO</chem>
1.121	Methoxyacetone ($C_4H_8O_2$)	<chem>COC(=O)C</chem>
1.296	1-Propanol (C_3H_8O)	<chem>CCCO</chem>
1.464	2-Butanone (C_4H_8O)	<chem>CCC(=O)C</chem>

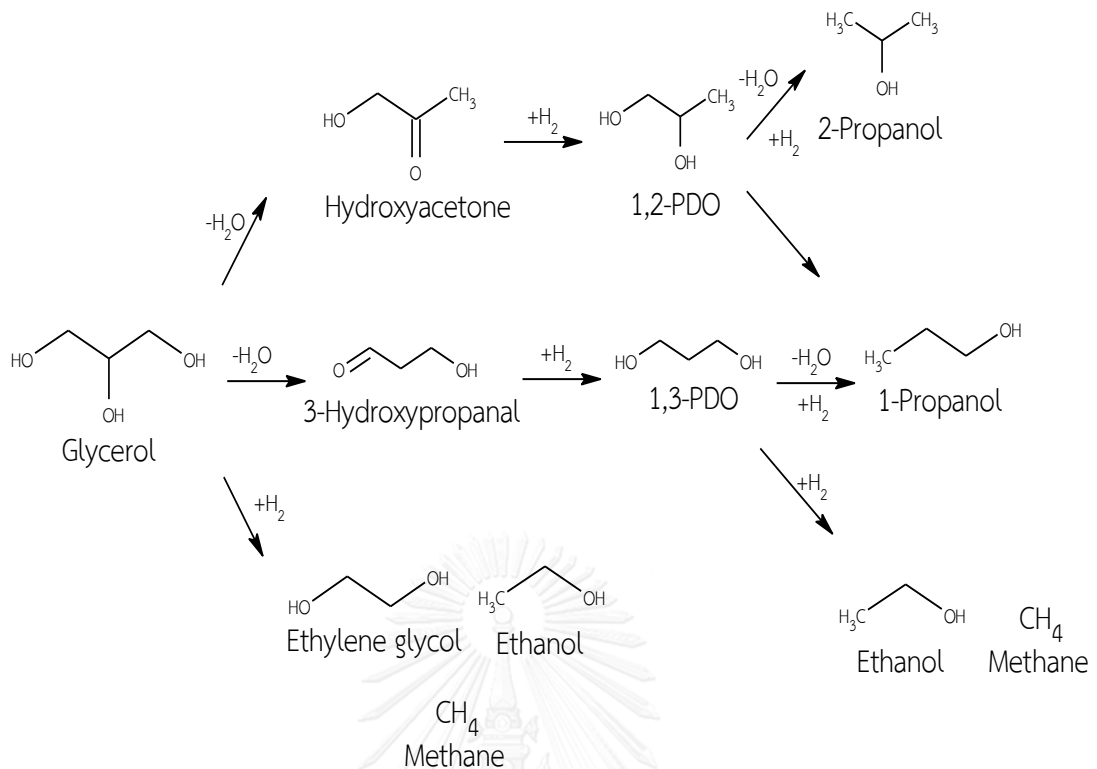
1.934	Hydroxyacetone (C ₃ H ₆ O ₂)	
2.210	2-Pentanone (C ₅ H ₈ O)	
2.340	3-Pentanone (C ₅ H ₈ O)	
2.756	2,2,4-Trimethyl-1,3-dioxolane (C ₆ H ₁₂ O ₂)	
3.214	1,2-Propanediol (C ₃ H ₆ O ₂)	
4.163	3-Hexanone (C ₆ H ₁₂ O)	
4.295	2-Hexanone (C ₆ H ₁₂ O)	
4.680	4-Methyl-2-pentanol (C ₆ H ₁₄ O)	
6.359	3-Methyl-4-heptanol (C ₈ H ₁₈ O)	
6.997	2-Methyl-3-hexanol (C ₇ H ₁₆ O)	
7.025	1,3-Dimethoxypropane (C ₅ H ₁₂ O ₂)	

7.312	2-Ethylhexanal (C ₈ H ₁₆ O)	
7.712	1,3-Dioxolane-4-methanol, 2,2-dimethyl (C ₆ H ₁₂ O ₃)	
8.094	2,4-Dimethyl-3-pentanol (C ₇ H ₁₆ O)	
8.172	Butanoic acid, 2-methyl-, methyl ester (C ₆ H ₁₂ O ₂)	
8.194	2-Ethyl-2-methyl-1,3-dioxolane (C ₆ H ₁₂ O ₂)	
8.232	2-Methyl-3-hexanol (C ₇ H ₁₆ O)	
8.642	Diglycerol (C ₆ H ₁₄ O ₅)	
9.436	Glycerol (C ₃ H ₈ O ₃)	

เมื่อพิจารณาเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 3 อะตอมลงมา จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออนไนเซชันโดยการเทียบรีเทนชันไทม์ (Retention time) ของผลิตภัณฑ์กับสารมาตรฐาน และเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีตัวตรวจวัดชนิดแมสสเปกโตรมิเตอร์พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ 1,2-PDO, 1-PO, 2-PO, Hydroxyacetone และ Acetone ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Miyazawa, T. et al. (2006) ที่เสนอว่าปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยาย่อยคือ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน และปฏิกิริยาไฮโดรจีโนชัน โดย Hydroxyacetone และ Acetone ที่พบในตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกลีเซอรอล และ 1,2-PDO ตามลำดับ

เมื่อ Acetone เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันต่อจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น 1-PO นอกจากนี้มีงานวิจัยอื่นที่เสนอรูปแบบการเกิดปฏิกิริยาในลักษณะเดียวกัน ดังนี้

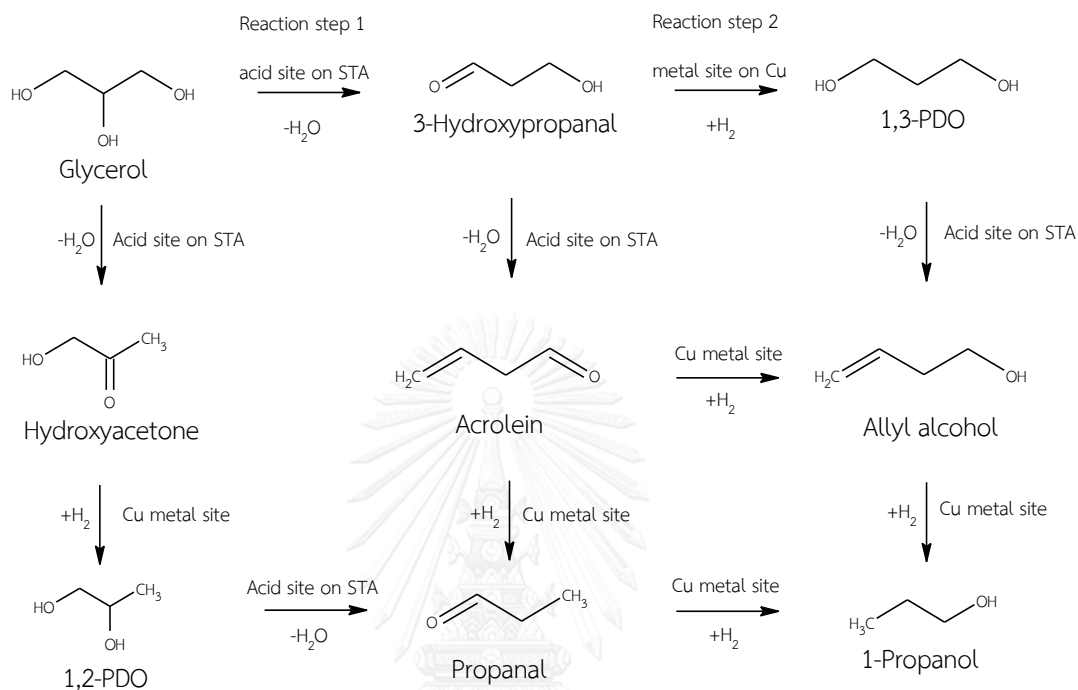
งานวิจัยของ Miyazawa, T. et al. (2007) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล ใช้สารละลายกลีเซอรอลในน้ำ 20% โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองคือ Ru/C + Amberlyst ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้คือ 120 องศาเซลเซียส และ 80 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 ชั่วโมง พบว่ากลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสได้ ประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยาย่อยคือ ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 4.6 จากการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ 1,2-PDO, 1,3-PDO, 1-PO, 2-PO, Ethylene glycol, EtOH, MeOH และ Methane นอกจากนี้ยังพบ Hydroxyacetone ปริมาณเล็กน้อยในผลิตภัณฑ์ คาดว่าเป็นสารมัธยันตร์ของปฏิกิริยา จึงทำการทดลองโดยใช้ Hydroxyacetone เป็นสารตั้งต้น พบว่า Hydroxyacetone สามารถเปลี่ยนเป็น 1,2-PDO ได้ทั้งหมด เป็นการยืนยันว่า 1,2-PDO เกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของ Hydroxyacetone อีกทั้งผู้วิจัยได้ทดลองทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของ 1,2-PDO และ 1,3-PDO พบว่า 1,2-PDO สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสได้ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ 1-PO และ 2-PO การทดลองที่ใช้ 1,3-PDO เป็นสารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ 1-PO, Ethanol และ Methane โดยไม่พบ Ethylene glycol เป็นผลิตภัณฑ์ไม่ว่าจะใช้ 1,2-PDO หรือ 1,3-PDO เป็นสารตั้งต้น สรุปได้ว่า Ethylene glycol เกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลาย (Degradation reaction) โดยตรงจากกลีเซอรอล



รูปที่ 4.6 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสและปฏิกิริยาการย่อยสลายของกลีเซอรอลโดย Miyazawa และคณะ (2007)

Huang, Z. et al. (2009) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันของกลีเซอรอล ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-H₄SiW₁₂O₄₀/SiO₂ (Cu-STA/SiO₂) ทำการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการปรับปริมาณโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยา xCu-ySTA/SiO₂ ค่า x และ y หมายถึง ปริมาณ Cu และ STA โดยน้ำหนัก ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้คือ 180 ถึง 230 องศาเซลเซียส และ 3.6 บาร์ การทดลองการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10Cu/SiO₂ พบว่าเกิด Hydroxyacetone, 3-Hydroxypropanal และ Acrolein ปริมาณน้อยมาก แสดงถึงความไม่ว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu ในการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน ในขณะที่การทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดคือ 30STA/SiO₂ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ Hydroxyacetone, 3-Hydroxypropanal และ Acrolein แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา STA ซึ่งมีความเป็นกรด มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกลีเซอรอล ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ Hydroxyacetone และ 3-Hydroxypropanal จากนั้น 3-Hydroxypropanal สามารถเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันต่อได้ Acrolein เป็นผลิตภัณฑ์ โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยา STA ไม่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเพื่อเปลี่ยน Hydroxyacetone และ 3-Hydroxypropanal ให้กลายเป็น 1,2-PDO และ 1,3-PDO นอกจากนี้การศึกษานี้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดยใช้

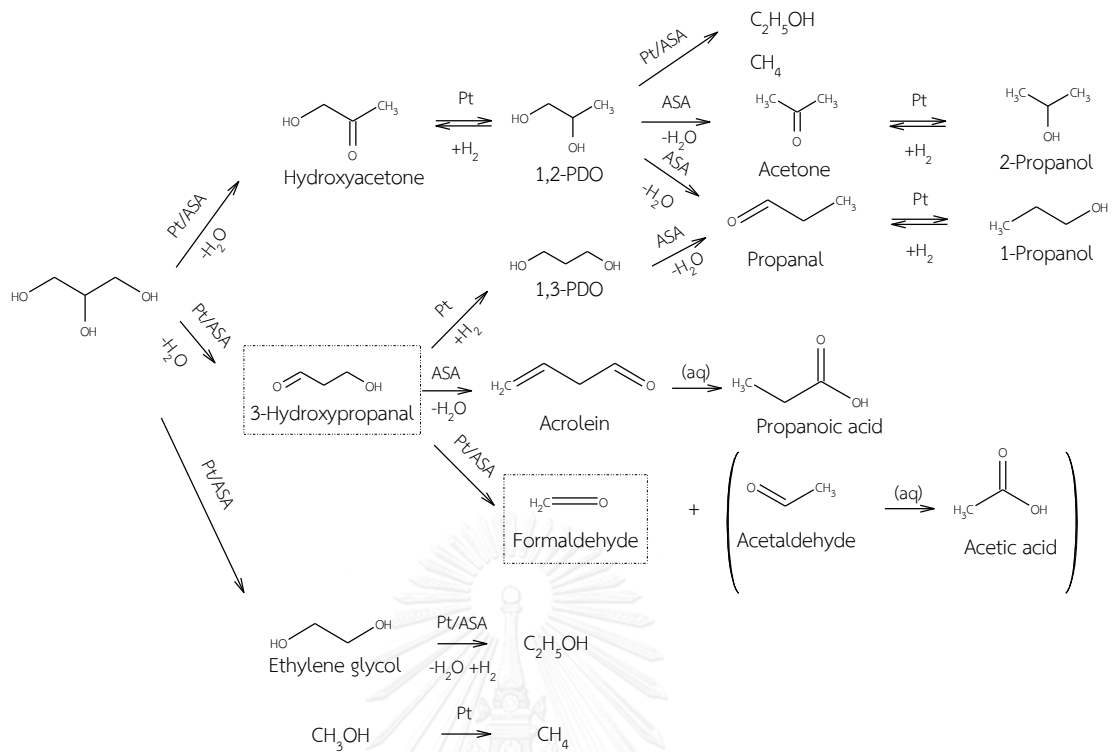
ตัวเร่งปฏิกิริยา 10Cu-20STA/SiO₂ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ 1,2-PDO, 1,3-PDO และ 1-PO อีกทั้งยังพบ Propanal และ Allyl alcohol ปริมาณเล็กน้อยในผลิตภัณฑ์ เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันของกลีเซอรอลถูกนำเสนอ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 เส้นทางการเกิดและปฏิกิริยาดีไฮโดรชันของ 1,2-PDO และ 1,3-PDO โดย Huang และคณะ (2009)

Gandarias, I. et al. (2010) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันของกลีเซอรอล ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/ASA (Amorphous silico alumina) สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองคือ สารละลายกลีเซอรอลในน้ำ 20% โดยน้ำหนัก และใช้สารตั้งต้นชนิดอื่น ได้แก่ สารละลาย Acetol ในน้ำ 4.2% โดยน้ำหนัก สารละลาย 1,2-PDO ในน้ำ 3.8% โดยน้ำหนัก สารละลาย 1,3-PDO 3.8% โดยน้ำหนัก สารละลาย Ethylene glycol ในน้ำ 1.6% โดยน้ำหนัก และสารละลาย 2-PO ในน้ำ 2.6% โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้เท่ากับ 220 องศาเซลเซียส และ 45 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง การทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในวัฏภาคของเหลว ได้แก่ 1,2-PDO, 1,3-PDO, 1-PO, 2-PO, Acetol, Propanal, Acetone, Acrolein, Propanoic acid, Ethylene glycol, MeOH, EtOH, Acetaldehyde และ Acetic acid ผลิตภัณฑ์ในวัฏภาคแก๊ส ได้แก่ Methane, Ethane, Ethylene และ Propene การทดลองเปรียบเทียบผลของการทำ

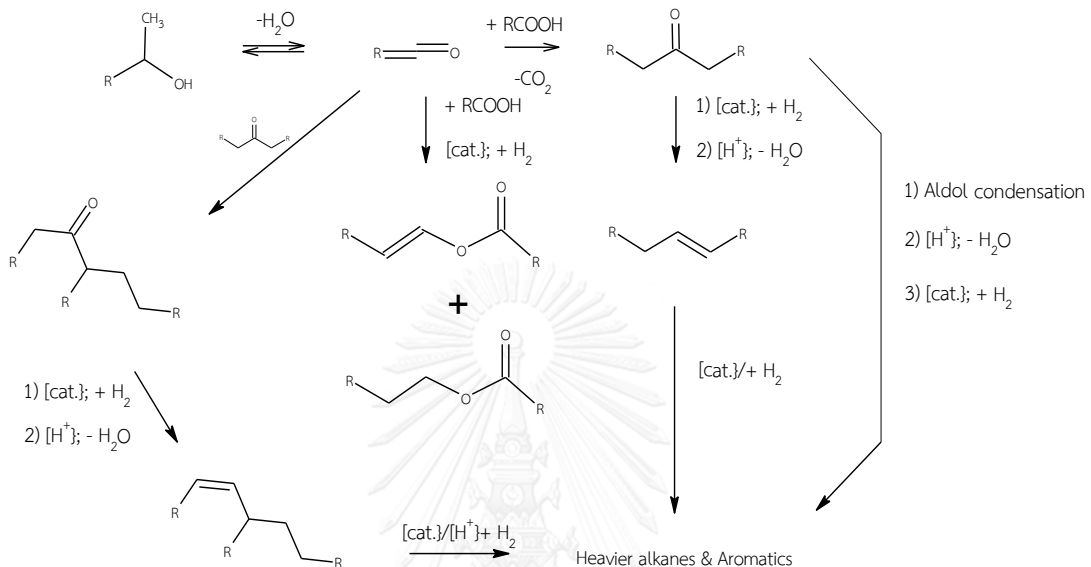
ปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวรองรับ ASA อย่างเดียว และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/ASA พบว่าเมื่อใช้ตัวรองรับ ASA อย่างเดียวผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันเท่านั้น เช่น Hydroxyacetone และ Acrolein แต่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/ASA ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมาจากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน เช่น 1,2-PDO, 1-PO, 2-PO แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยาย่อยคือ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน เกิดขึ้นโดยใช้ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันจากความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ และยังพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/ASA ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาแทรกกิง เช่น Ethylene glycol, MeOH, EtOH, Acetaldehyde และ Acetic acid มีปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีใช้ตัวรองรับ ASA อย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา Pt มีความสามารถในการทำลายพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอม นอกจากการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล ผู้วิจัยศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเดียวกันคือ Pt/ASA เพื่อศึกษาเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา ผลการศึกษาเป็นดังต่อไปนี้ การทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของสารละลาย Hydroxyacetone พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้แก่ Propanal, Acetone, 1,2-PDO, 1,3-PDO, 1-PO, 2-PO, EtOH, Ethane และ Propane เมื่อใช้สารละลาย 1,2-PDO เป็นสารตั้งต้นพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ Propanal, Acetone, 1-PO, 2-PO, EtOH, Hydroxyacetone, Ethane และ Propane เมื่อใช้สารละลาย 1,3-PDO เป็นสารตั้งต้นพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้แก่ Propanal, EtOH, 1-PO, Ethane และ Propane เมื่อใช้สารละลาย 2-PO เป็นสารตั้งต้นพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ Acetone, Propene และ Propane จากผลการทดลองสรุปได้ว่า 1,2-PDO, 1-PO และ 2-PO นอกจากจะเกิดปฏิกิริยาต่อเป็นผลิตภัณฑ์อื่นแล้ว ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเป็น Hydroxyacetone, Acetone และ Propanal ได้อีกด้วย สำหรับ Propanoic acid และ Acetic acid เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Acrolein และ Formaldehyde ตามลำดับ ซึ่งทั้ง Acrolein และ Formaldehyde เกิดจาก 3-Hydroxypropanal แต่เนื่องจาก 3-Hydroxypropanal ไม่ตรวจพบในทุกการทดลอง คาดว่ามีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงมาก จากผลการทดลองทั้งหมด เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันและปฏิกิริยาการย่อยสลายของกลีเซอรอลถูกนำเสนอแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันและปฏิกิริยาการย่อยสลายของกลีเซอรอลโดย I. Gandarian และคณะ (2010)

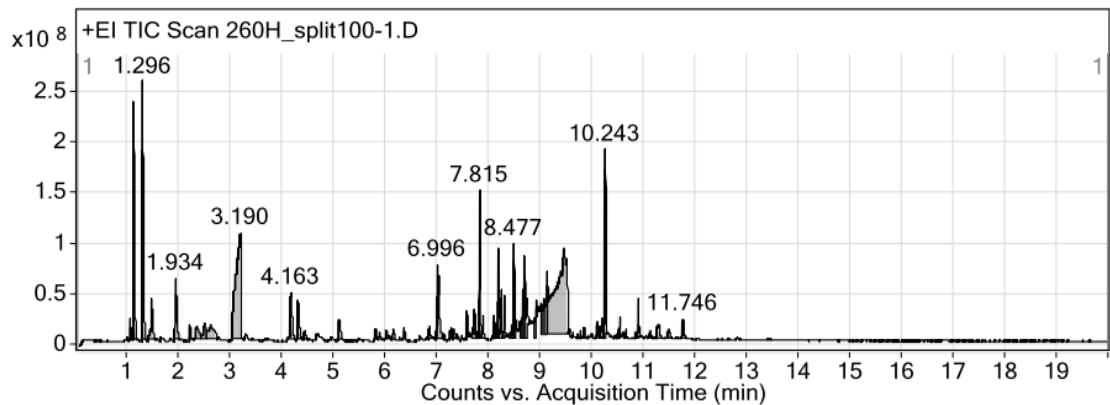
จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ได้จากการทำการทดลองโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดแมสสเปกโตรมิเตอร์ นอกจากจะพบสารประกอบออกซิเจน (Oxygenated products) ที่มีคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 3 อะตอมลงมาแล้ว ยังพบผลิตภัณฑ์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 3 อะตอมด้วย เช่น 2-Butanone, 4-Methyl-2-pentanol, 2-Ethylhexanal และ Diglycerol เป็นต้น คาดว่าเกิดจากปฏิกิริยาอัลดอลคอนเดนเซชัน (Aldol condensation) ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสายโซ่คาร์บอนยาวขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Karimi, E. et al. (2012) ที่ศึกษาปฏิกิริยาคีโตนเซชัน (Ketonization reaction) และต็อกซิเจนชันของกรดอัลคานอยิก (Alkanoic acid) เช่น กรดคาร์บอกซิลิก ทำการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ Red mud อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ในการทดลองคือ 365 องศาเซลเซียส และ 55 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 ชั่วโมง พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีทั้งสารประกอบออกซิเจนที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่าคาร์บอนอะตอมของสารตั้งต้น และมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่มีขั้วเป็นผลิตภัณฑ์ เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาถูกนำเสนอด้วยรูปที่ 4.9 ชั้นแรก กรดอัลคานอยิกจะเกิดปฏิกิริยาต็อกซิเจนชัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบคีโตน สารประกอบคีโตนที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยากับกรดอัลคานอยิกได้ผลิตภัณฑ์เป็นคีโตน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่า ปฏิกิริยา

คีโตโนเซชัน อย่างไรก็ตามทั้งคีตินและคีโตนที่เกิดขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาอัลดอลคอนเดนเซชัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบออกซิเจนที่มีสายโซ่ที่ยาวขึ้น สารที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน เพื่อกำจัดอะตอมของออกซิเจน ตามด้วยปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่มีขั้ว

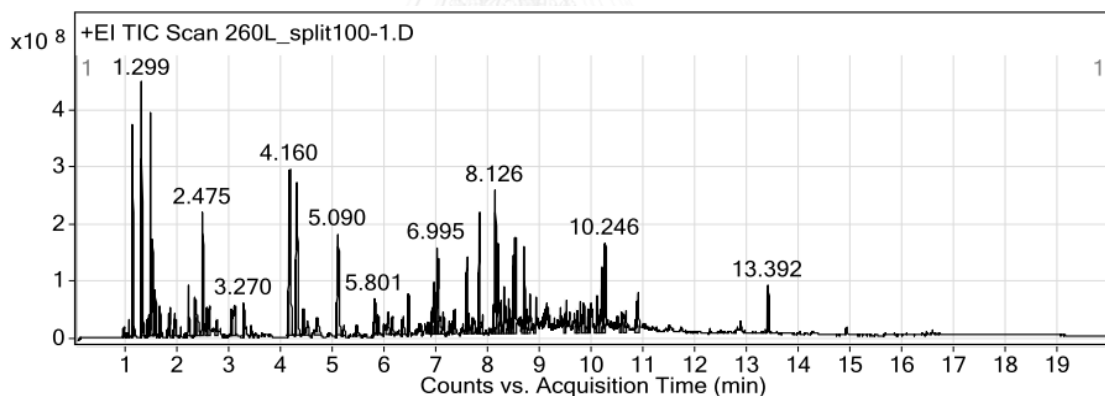


รูปที่ 4.9 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาคีโตโนเซชันของกรดอัลคานอยิกและปฏิกิริยาอื่นๆ โดย E. Karimi และคณะ (2012)

จากผลการทดลองการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันของกลีเซอรอลพบว่าเมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาสูงกว่า 240 องศาเซลเซียส (260 และ 280 องศาเซลเซียส) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมี 2 วัฏภาคไม่ละลายเข้าด้วยกัน จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีตัวตรวจวัดชนิดแมสสเปกโตรมิเตอร์พบว่าตัวอย่างวัฏภาคกลางเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดมีขั้ว องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหมือนกับตัวอย่างกรณีที่มี 1 วัฏภาค ส่วนตัวอย่างวัฏภาคบนพบว่ามีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่มีขั้วปนกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดมีขั้ว ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ซึ่งสารเคมีและสูตรโครงสร้างแสดงดังตารางที่ 4.2

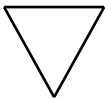
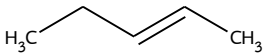
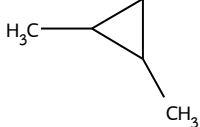
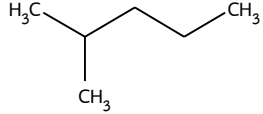
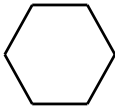
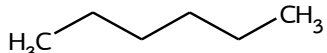
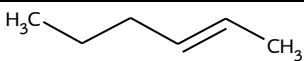
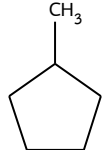
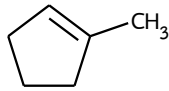
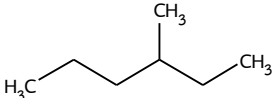
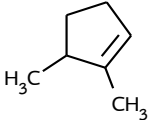


รูปที่ 4.10 โครมาโทแกรมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดแมสสเปกโตรมิเตอร์ของตัวอย่างวิทยาศาสตร์กลางจากการทำการทดลองที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

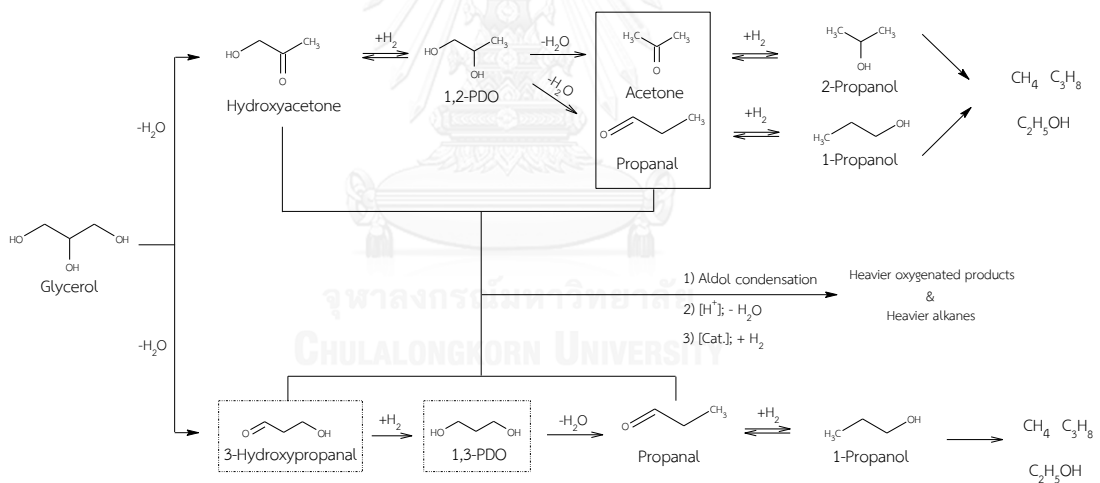


รูปที่ 4.11 โครมาโทแกรมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดแมสสเปกโตรมิเตอร์ของตัวอย่างวิทยาศาสตร์บนจากการทำการทดลองที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

ตารางที่ 4.4 ชื่อสารและสูตรโครงสร้างจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดแมสสเปกโตรมิเตอร์ของตัวอย่างวิภูภาคบนจากการทำการทดลองที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รีเทนชันไทม์	ชื่อสาร	สูตรโครงสร้าง
0.953	Cyclopropane (C ₃ H ₆)	
1.152	Pentene (C ₅ H ₁₀)	
1.171	1,2-Dimethylcyclopropane (C ₅ H ₁₀)	
1.327	2-Methylpentane (C ₆ H ₁₄)	
1.426	Cyclohexane (C ₆ H ₁₂)	
1.467	n-Hexane (C ₆ H ₁₄)	
1.508	2-Hexene (C ₆ H ₁₂)	
1.652	Methylcyclopentane (C ₆ H ₁₂)	
1.842	1-Methylcyclopentene (C ₆ H ₁₀)	
2.053	3-Methylhexane (C ₇ H ₁₆)	
2.384	1,5-Dimethylcyclopentene (C ₇ H ₁₂)	

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ได้จากการทำการทดลองและงานวิจัยที่ผ่านมา สามารถสรุปเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันของกลีเซอรอลและปฏิกิริยาข้างเคียงแสดงดังรูปที่ 4.12 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยาย่อยคือ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน เป็นการกำจัดอะตอมของออกซิเจนออกในรูปของน้ำ ได้สารมัธยันตร์ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลดีไฮด์และคีโตน จากนั้นสารมัธยันตร์เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันซึ่งเป็นการเติมอะตอมของไฮโดรเจนบนพันธะคู่ได้แอลกอฮอล์เป็นผลิตภัณฑ์ แอลกอฮอล์ที่เกิดขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันอีกครั้ง ได้ Propane เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย และแอลกอฮอล์ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาแครกกิงได้ EtOH และ Methane เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายเช่นกัน อย่างไรก็ตามการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงส่งผลในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง โดยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลดีไฮด์และคีโตนซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูง จะเกิดการรวมตัวผ่านปฏิกิริยาอัลดอลคอนเดนเซชัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบออกซิเจนที่มีสายโซ่ที่ยาวขึ้น สารประกอบออกซิเจนที่เกิดขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันและปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่ที่ยาวขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.12 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันของกลีเซอรอลและปฏิกิริยาข้างเคียง

4.3 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล

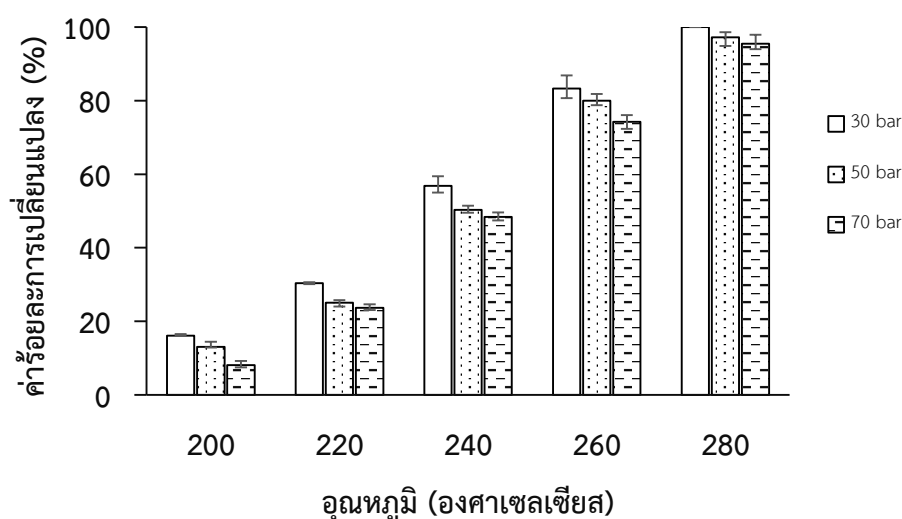
หัวข้อนี้แสดงผลของอุณหภูมิ (200, 220, 240, 260 และ 280 องศาเซลเซียส) และความดันแก๊สไฮโดรเจน (30, 50 และ 70 บาร์) ต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล ซึ่งคำนวณตามสมการที่ 3.4 ในการทดลองกำหนดความเร็วเชิงสเปซของเหลวเท่ากับ 1.0 ต่อชั่วโมง และอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อของเหลวเท่ากับ 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ผลการทดลองถูกนำเสนอเรียงลำดับจากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม การทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม และการเปรียบเทียบผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

4.3.1 ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รูปที่ 4.13 แสดงผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลมีค่าสูงขึ้น ที่อุณหภูมิเท่ากับ 280 องศาเซลเซียสได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลสูงสุดเท่ากับ 100.00%, 97.26% และ 95.48% ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 30, 50 และ 70 บาร์ ตามลำดับ อธิบายตามกฎอัตราจลพลศาสตร์ได้ว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นและค่าคงที่อัตรา ค่าคงที่อัตราแปรผันกับอุณหภูมิตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มค่าคงที่อัตรา อีกทั้งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Balaraju, M. et al. (2008) ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลตั้งแต่ 120 ถึง 220 องศาเซลเซียส ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-ZnO พบว่าได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลเท่ากับ 5% และ 98% ที่อุณหภูมิ 120 และ 220 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยนี้คือ การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลสูงขึ้น

ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจากรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยามีค่าต่ำกว่า 240 องศาเซลเซียส การเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงลดลง เนื่องจากการเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนเป็นการเพิ่มความดันให้กับระบบ เมื่อความดันของระบบสูงขึ้น น้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดีไฮโดรชันจะอยู่ในสภาพของเหลว และบดบังพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้กลีเซอรอลเข้าทำปฏิกิริยาบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้น้อยลง จากผลการทดลองพบว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนจาก 30 บาร์ เป็น 50

และ 70 บาร์ ส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลลดลงจาก 16.06% เป็น 13.01% และ 8.10% ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 260 องศาเซลเซียส การเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 280 องศาเซลเซียส การเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนไม่ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล เนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง น้ำสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ดีกว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นแม้จะเพิ่มความดันให้กับระบบ น้ำที่เกิดขึ้นยังสามารถกลายเป็นไอได้ ทำให้การเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนไม่ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล



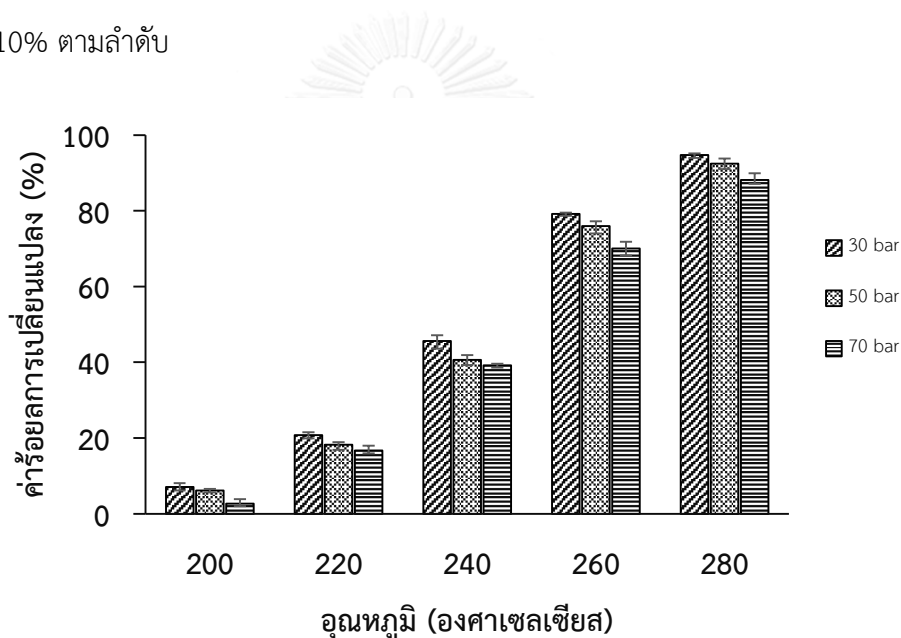
รูปที่ 4.13 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 ถึง 70 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

4.3.2 ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมแสดงดังรูปที่ 4.14 ผลการทดลองสอดคล้องกับกรณีการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมคือ การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลมีค่าสูงขึ้น ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 280 องศาเซลเซียส ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลสูงสุดเท่ากับ 94.76%, 92.48% และ 88.10% ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 30, 50 และ 70 บาร์ ตามลำดับ อีกทั้งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ

Mane, R.B. et al. (2010) ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล ตั้งแต่ 200 ถึง 240 องศาเซลเซียส ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Nano Cu:Al พบว่าได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของ กลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจาก 29% เป็น 76% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาจาก 200 เป็น 240 องศาเซลเซียส

ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลจากรูปที่ 4.14 พบว่าการเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลลดลง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับกรณีการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเท่ากับ 280 องศาเซลเซียส การเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนจาก 30 บาร์ เป็น 50 และ 70 บาร์ ส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลลดลงจาก 94.76% เป็น 92.48% และ 88.10% ตามลำดับ

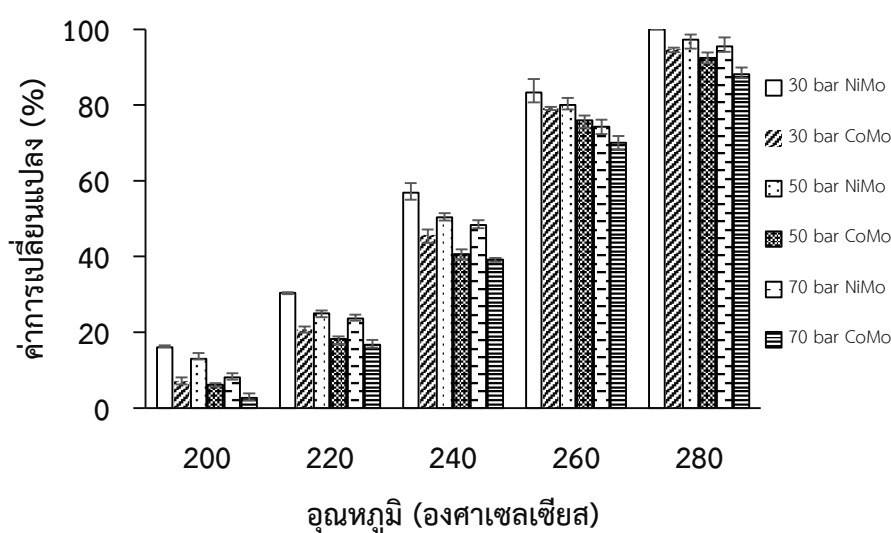


รูปที่ 4.14 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 ถึง 70 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

4.3.3 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

รูปที่ 4.15 แสดงผลการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยา

โคบอลต์โมลิบดีนัม ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลมากกว่าผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค BET พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 115.77 และ 89.276 ตารางเมตรต่อกรัมตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ การที่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีพื้นที่ผิวมากกว่า ส่งผลให้กลีเซอรอลมีพื้นที่ผิวในการทำเข้าปฏิกิริยามากกว่า ดังนั้นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลจากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจึงมีค่าสูงกว่า



รูปที่ 4.15 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 ถึง 70 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

4.4 ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์

หัวข้อนี้แสดงผลของอุณหภูมิ (200, 220, 240, 260 และ 280 องศาเซลเซียส) และความดันแก๊สไฮโดรเจน (30, 50 และ 70 บาร์) ต่อค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮโดรดิออกซิเจนชันของกลีเซอรอล ได้แก่ 1,2-PDO, Acetone, 1-PO, 2-PO, และ Ethanol การทดลองกำหนดความเร็วเชิงสเปซของเหลวเท่ากับ 1.0 ต่อชั่วโมง และอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อของเหลวเท่ากับ 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ผลการทดลองถูกนำเสนอเรียงลำดับจากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม การทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม และการเปรียบเทียบผลการทดลองโดยการใช้นิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

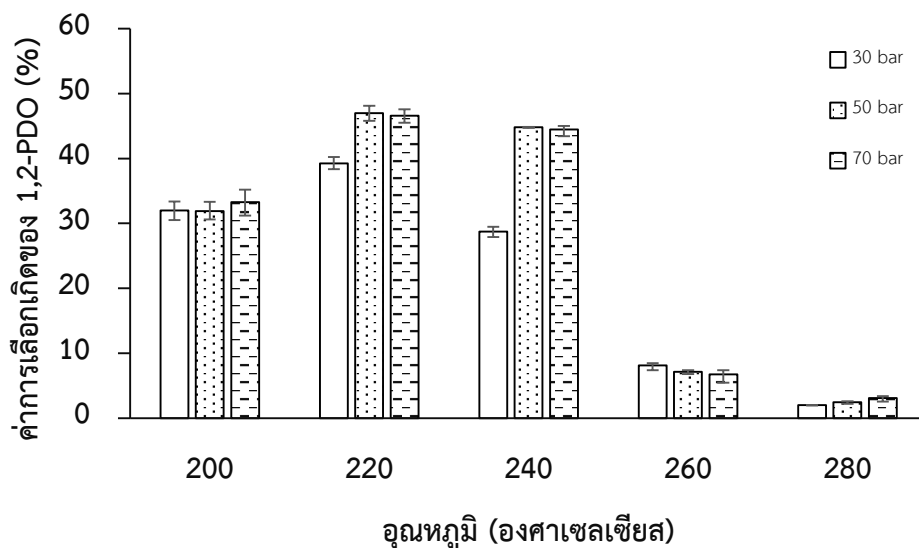
4.4.1 ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ 1,2-Propanediol

จากเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของกลีเซอรอลดังรูปที่ 4.12 เมื่อกลีเซอรอลเกิดปฏิกิริยาขั้นแรกคือ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน จะได้ Hydroxyacetone เป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันต่อได้ 1,2-PDO อย่างไรก็ตาม 1,2-PDO สามารถเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันต่อได้ Acetone และ Propanal เป็นผลิตภัณฑ์ หัวข้อนี้แสดงผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ที่แสดง เป็นค่าที่วัดจากตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 4.16 แสดงผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิเท่ากับ 220 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 39.24%, 47.00% และ 46.60% ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 30, 50 และ 70 บาร์ ตามลำดับ จากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา อธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ 1,2-PDO เกิดปฏิกิริยาต่อเป็น Acetone และ Propanal ได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ลดลง อีกทั้งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Auneau, F. et al. (2011) ที่ศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ir/C อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 100 ถึง 200 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 50 บาร์ พบว่าได้ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO สูงสุดเท่ากับ 64% ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ลดลงอธิบายได้ว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง 1,2-PDO จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสอีกครั้งได้ผลิตภัณฑ์ตัวอื่น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Ma, L. et al. (2008) ที่ศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Re}_2(\text{CO})_{10}$ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาในช่วง 120 ถึง 180 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO มีค่าลดลง แต่ค่าการเลือกเกิดของ 1-PO, 2-PO, Ethanol และ Ethylene glycol มีค่าสูงขึ้น อธิบายได้ว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงเกินไป ส่งผลให้ 1,2-PDO เกิดปฏิกิริยาต่อกลายเป็น 1-PO และ 2-PO อีกทั้งทำให้ปฏิกิริยาแทรกกึ่งเกิดได้ดีขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคาร์บอนอะตอมน้อยกว่าคาร์บอนอะตอมของสารตั้งต้น นอกจากนี้จากงานวิจัยอื่นยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO มีค่าลดลง เช่น ในงานวิจัยของ (Guo, L. et al. 2009) ทำปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส ได้ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO เท่ากับ 92% แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 240 องศาเซลเซียส ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ลดลงเหลือ 73% ให้เหตุผลว่า การทำ

ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการแตกพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมกับคาร์บอนอะตอมของโมเลกุล เกิดเป็นแอลกอฮอล์ที่มีขนาดเล็กลง เช่น Methanol และ Ethanol

ความดันแก๊สไฮโดรเจนส่งผลต่อค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO เนื่องจาก เมื่อกลีเซอรอล เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะได้ Hydroxyacetone ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันต่อโดยใช้ ไฮโดรเจนเข้าทำปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งพันธะคู่ ได้ผลิตภัณฑ์เป็น 1,2-PDO ผลของความดันแก๊ส ไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจากรูปที่ 4.16 พบว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส การเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนไม่ส่งผล ต่อค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO เนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ กลีเซอรอลเกิดปฏิกิริยาได้ ข้น ส่งผลให้ปริมาณ Hydroxyacetone มีปริมาณน้อย ดังนั้นการเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนจึงไม่ ส่งผลต่อค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ในขณะที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยามากกว่าหรือเท่ากับ 220 องศาเซลเซียส การเพิ่มความดันส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO มากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนส่งผลให้ Hydroxyacetone เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันกลายเป็น 1,2-PDO ได้มากขึ้น ในงานวิจัยของ Hnat, A.W. et al. (2013) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิจีเนชัน ของกลีเซอรอล ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/Al_2O_3 ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน อุณหภูมิ การทำปฏิกิริยาเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนตั้งแต่ 35 ถึง 87 บาร์ พบว่าเมื่อ เพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนจาก 35 บาร์ เป็น 87 บาร์ ส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO เพิ่มขึ้น จาก 77.4% เป็น 96.0% ผู้วิจัยอธิบายว่าการเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนเป็นการเพิ่มอัตรา การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของ Hydroxyacetone เป็น 1,2-PDO ทำให้ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO สูงขึ้น

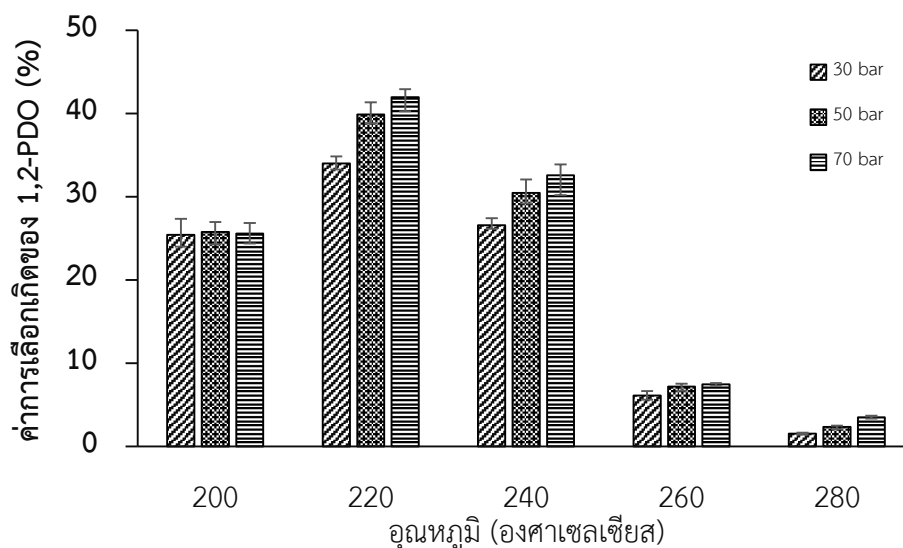


รูปที่ 4.16 ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 ถึง 70 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รูปที่ 4.17 แสดงผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิเท่ากับ 220 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 33.99%, 39.89% และ 41.96% ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 30, 50 และ 70 บาร์ ตามลำดับ จากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา ซึ่งให้ผลเหมือนกับผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม งานวิจัยของ Marinoiu, M. et al. (2009) ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni/SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิสของกลีเซอรอล อุณหภูมิตั้งแต่ 170 ถึง 250 องศาเซลเซียส พบว่าได้ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO สูงสุดเท่ากับ 84% ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 250 องศาเซลเซียส ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO กลับมีค่าลดลงเหลือ 10% เนื่องจากที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาสูง 1,2-PDO จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิสอีกครั้งได้เป็นผลิตภัณฑ์ตัวอื่น

รูปที่ 4.17 แสดงผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม ซึ่งให้ผลเหมือนกับผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม งานวิจัยของ Guo, X. et al. (2009) ทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันของสารละลายกลีเซอรอลในน้ำ 10% โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่ม

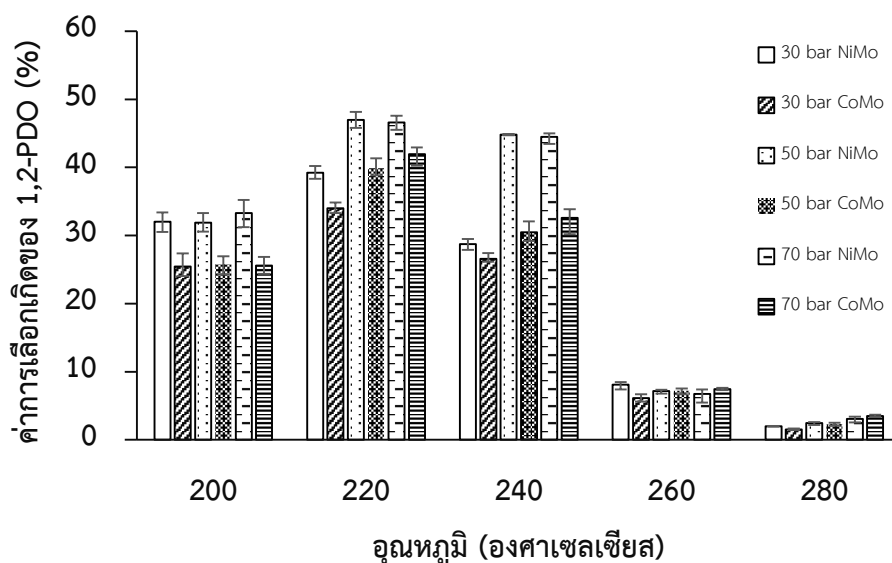
ความดันแก๊สไฮโดรเจนจาก 10 บาร์ เป็น 30 บาร์ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลเพิ่มจาก 36.1% เป็น 46.9% อธิบายได้ว่าการเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนในสารละลายกลีเซอรอล ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.17 ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 ถึง 70 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

ผลการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมแสดงดังรูปที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมได้ค่าร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO มากกว่าผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม อธิบายได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันได้ดีว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของ Hydroxyacetone เพื่อเปลี่ยนเป็น 1,2-PDO จึงเกิดได้ดีกว่า ส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีค่ามากกว่าการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม งานวิจัยของ Senol, O.I. et al. (2007) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิจีเนชันของสารละลาย Heptanol ใน m-Xylene ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ และ CoMo/Al₂O₃ ในรูปซัลไฟด์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง อุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 250 องศาเซลเซียส และ 15 บาร์ ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ Heptane เท่านั้น เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo/Al₂O₃ ผลิตภัณฑ์

ที่พบมีทั้ง Heptane และ Heptene แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันไม่เท่ากัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al₂O₃ มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo/Al₂O₃



รูปที่ 4.18 ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 ถึง 70 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

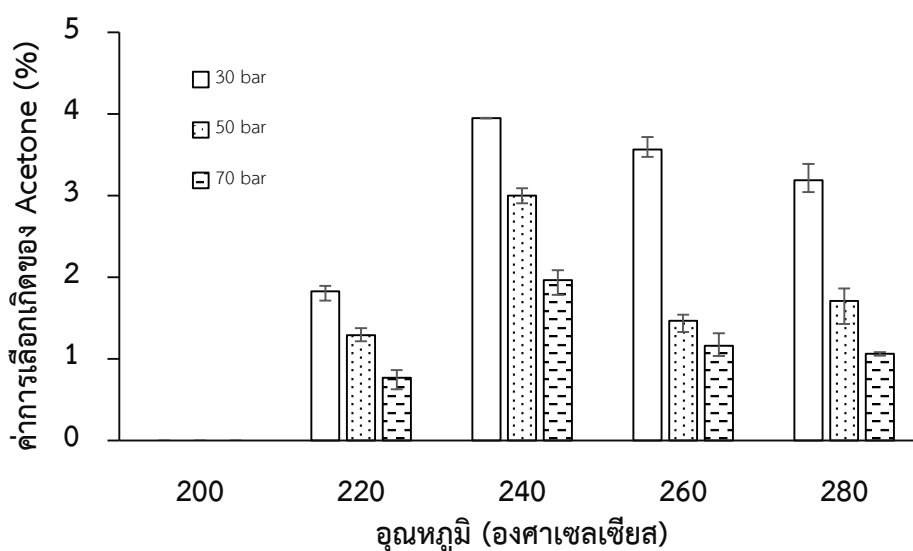
4.4.2 ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ Acetone

จากเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิจีเนชันของกลีเซอรอลดังรูปที่ 4.12 1,2-PDO ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิจีเนชันของกลีเซอรอล สามารถเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันต่อได้ Propanal และ Acetone เป็นผลิตภัณฑ์ แต่อย่างไรก็ตาม Propanal และ Acetone สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันได้ผลิตภัณฑ์เป็น 1-PO และ 2-PO หรือเกิดปฏิกิริยาอัลดอลคอนเดนเซชันได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบออกซิเจนที่มีสายโซ่ที่ยาวขึ้นได้ ในหัวข้อนี้แสดงผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ Acetone ค่าการเลือกเกิดของ Acetone ที่แสดงเป็นค่าที่วัดจากตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 4.19 แสดงผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ Acetone โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส ไม่พบ Acetone ในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากอุณหภูมียังไม่สูงพอใน

การเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของ 1,2-PDO แต่เริ่มพบ Acetone ในผลิตภัณฑ์เมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 220 องศาเซลเซียส ได้ค่าการเลือกเกิดของ Acetone สูงสุดที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 240 องศาเซลเซียส จากนั้นจะมีค่าลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง Acetone สามารถเกิดปฏิกิริยาอัลดอลคอนเดนเซชันกับสารประกอบแอลดีไฮด์หรือคีโตนชนิดอื่นในระบบ เช่น Hydroxyacetone, Propanal หรือรวมตัวกับ Acetone ด้วยกันเอง ได้สารประกอบออกซิเจนที่มีสายโซ่ที่ยาวขึ้น งานวิจัยของ Huang, L. et al. (2009) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสของกลีเซอรอล ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10Cu-20STA/SiO₂ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 180 ถึง 230 องศาเซลเซียส ทำปฏิกิริยาที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 3.6 บาร์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น สารประกอบออกซิเจนที่มีสายโซ่ยาวขึ้นเกิดมากขึ้น อธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาสูง สารประกอบแอลดีไฮด์และคีโตนเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันได้ดี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการลดลงของ Acetone ที่อุณหภูมิสูงเนื่องจาก Acetone เกิดปฏิกิริยาอัลดอลคอนเดนเซชันกลายเป็นสารประกอบออกซิเจนที่มีสายโซ่ที่ยาวขึ้น

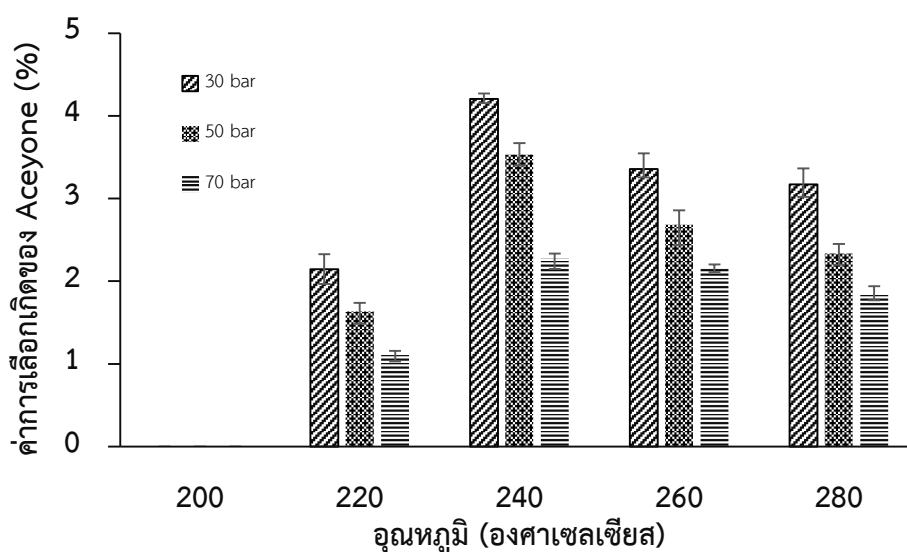
ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ Acetone โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจากรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อความดันแก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดของ Acetone ลดลง อธิบายได้ว่าเมื่อความดันแก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้น ทำให้มีปริมาณไฮโดรเจนมากขึ้น ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของ Acetone เปลี่ยนเป็น 2-PO จึงเกิดมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดของ Acetone ลดลง



รูปที่ 4.19 ค่าการเลือกเกิดของ Acetone ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 ถึง 70 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ Acetone โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมแสดงดังรูปที่ 4.20 ซึ่งให้ผลเหมือนกับผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมคือ การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส ไม่พบ Acetone ในผลิตภัณฑ์ และเริ่มพบ Acetone เมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 220 องศาเซลเซียส ได้ค่าการเลือกเกิดของ Acetone สูงสุดที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 240 องศาเซลเซียส จากนั้นจะมีค่าลดลง

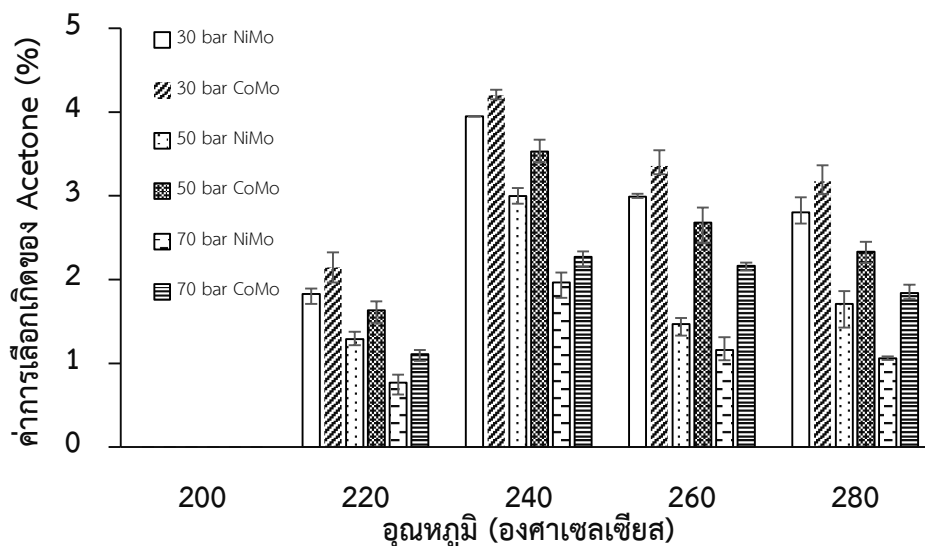
รูปที่ 4.20 แสดงผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนส่งผลต่อค่าการเลือกเกิดของ Acetone โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม ซึ่งให้ผลเหมือนกับผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมคือ เมื่อความดันแก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดของ Acetone ลดลง เนื่องจากการเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจน ทำให้ Acetone สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.20 ค่าการเลือกเกิดของ Acetone ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 ถึง 70 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

ผลการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ Acetone โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมแสดงดังรูปที่ 4.21 ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมได้ค่าร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone น้อยกว่าผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม อธิบายได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันได้ดีกว่า

ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม ดังนั้นการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของ Acetone ไปเป็น 2-PO จึงเกิดได้ดีกว่า ส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดของ Acetone จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีค่าน้อยกว่าการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม



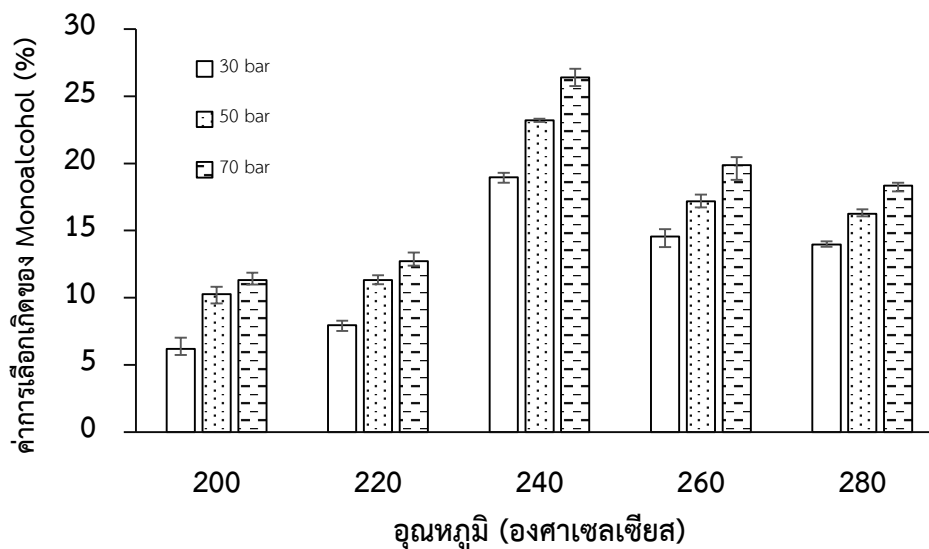
รูปที่ 4.21 ค่าการเลือกเกิดของ Acetone ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 ถึง 70 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

4.4.3 ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ 1-PO, 2-PO และ EtOH

จากเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันของกลีเซอรอลดังรูปที่ 4.12 เมื่อ Propanal และ Acetone เกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันจะได้ 1-PO และ 2-PO เป็นผลิตภัณฑ์ โดยที่ 1-PO และ 2-PO สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันต่อได้ Propane หรือเกิดปฏิกิริยาแทรกกิ่งได้ EtOH และ Methane อย่างไรก็ตามทั้ง Propanal และ Acetone สามารถเกิดปฏิกิริยาอัลดอลคอนเดนเซชันกับสารประกอบแอลดีไฮด์หรือคีโตนชนิดอื่นในระบบ เช่น Hydroxyacetone, Propanal หรือรวมตัวกับ Acetone ด้วยกันเอง ได้สารประกอบออกซิเจนที่มีสายโซ่ที่ยาวขึ้นได้ หัวข้อนี้แสดงผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ 1-PO, 2-PO และ EtOH ซึ่งนิยามรวมกันว่า Monoalcohol โดยค่าการเลือกเกิดที่แสดง เป็นค่าที่วัดจากตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 4.22 แสดงผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ Monoalcohol โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าการเลือกเกิดของ Monoalcohol จะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิเท่ากับ 240 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 18.97%, 23.21% และ 26.42% ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 30, 50 และ 70 บาร์ ตามลำดับ จากนั้นมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา อธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ 1,2-PDO สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเป็น Propanal และ Acetone ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันต่อได้เป็น 1-PO และ 2-PO ตามลำดับ ดังนั้นค่าการเลือกเกิดของ Monoalcohol จึงสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 240 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิเท่ากับ 260 และ 280 องศาเซลเซียส ค่าการเลือกเกิดของ Monoalcohol ลดลง เนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง Propanal และ Acetone สามารถเกิดการรวมตัวกับสารประกอบอัลดีไฮด์หรือคีโตนชนิดอื่นผ่านปฏิกิริยาอัลคอลลคอนเดนเซชัน งานวิจัยของ Ryneveld, E.V. et al. (2011) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิสของกลีเซอรอล ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ru/C อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 80 บาร์ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาจาก 150 เป็น 250 องศาเซลเซียส ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ลดลงจาก 67.00% เหลือ 0.30% ขณะที่ค่าการเลือกเกิดของ 1-PO เพิ่มขึ้นจาก 3.10% เป็น 17.60% ผู้วิจัยอธิบายว่าที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาสูง 1,2-PDO จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิสต่อกลายเป็น 1-PO และผลิตภัณฑ์ตัวอื่น

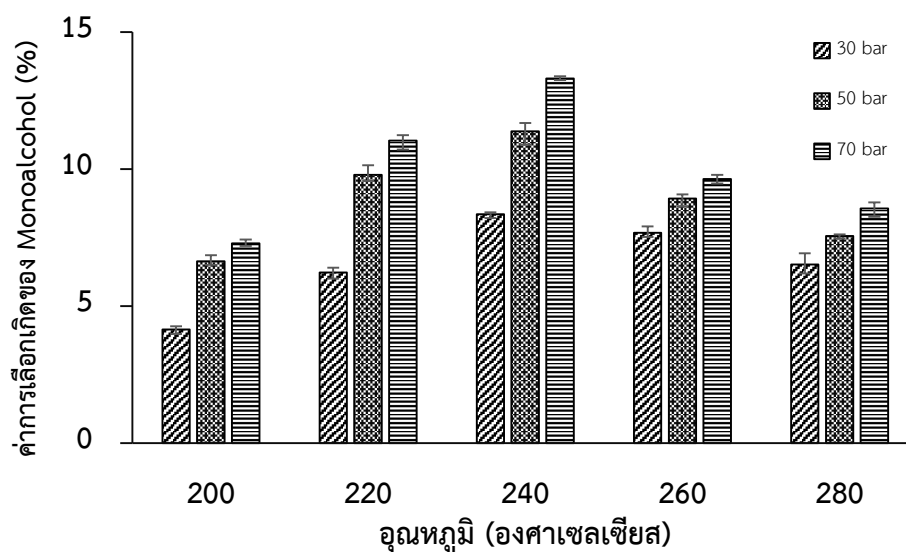
ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ Monoalcohol โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจากรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อความดันแก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดของ Monoalcohol เพิ่มขึ้นตามไปด้วย อธิบายได้ว่าเมื่อความดันแก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้นส่งผลให้ไฮโดรเจนมีปริมาณมากขึ้น ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของ Propanal และ Acetone เปลี่ยนเป็น 1-PO และ 2-PO จึงเกิดมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.22 ค่าการเลือกเกิดของ Monoalcohol ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 ถึง 70 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

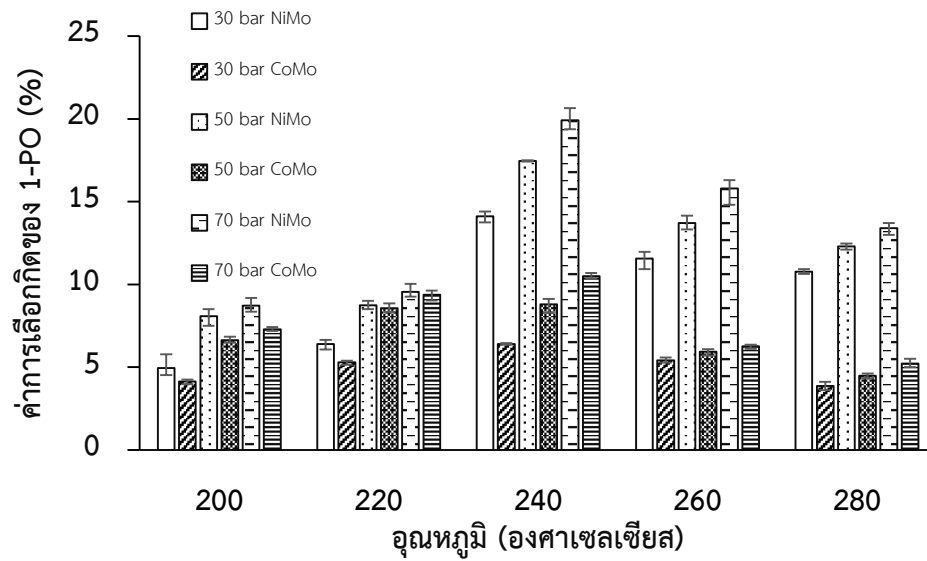
ผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ Monoalcohol โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมแสดงดังรูปที่ 4.23 ซึ่งให้ผลเหมือนกับผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมคือ ค่าการเลือกเกิดของ Monoalcohol จะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิเท่ากับ 240 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 8.35%, 11.39% และ 13.31% ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 30, 50 และ 70 บาร์ ตามลำดับ จากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา งานวิจัยของ Huang, L. et al. (2008) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ศึกษาอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 170 ถึง 210 องศาเซลเซียส ทำปฏิกิริยาที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 1 บาร์ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาจาก 170 เป็น 210 องศาเซลเซียส ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ลดลงจาก 43.00% เหลือ 31.10% ค่าการเลือกเกิดของ 1-PO และ 2-PO เพิ่มขึ้นจาก 2.10% และ 0.60% เป็น 8.10% และ 3.90% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ส่งผลให้ 1,2-PDO เกิดปฏิกิริยาต่อกลายเป็นสารชนิดอื่นเช่น 1-PO และ 2-PO

ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ Monoalcohol โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมแสดงดังรูปที่ 4.23 ซึ่งให้ผลเหมือนกับผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมคือ เมื่อความดันแก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดของ Monoalcohol เพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.23 ค่าการเลือกเกิดของ Monoalcohol ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 ถึง 70 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

ผลการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิและความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าการเลือกเกิดของ Monoalcohol โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม แสดงดังรูปที่ 4.24 ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมได้ค่าร้อยละการเลือกเกิดของ Monoalcohol มากกว่าผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม อธิบายได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของ Propanal และ Acetone ไปเป็น 1-PO และ 2-PO จึงเกิดได้ดีกว่า ส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดของ Propanal และ Acetone จากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีค่าน้อยกว่าการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม



รูปที่ 4.24 ค่าการเลือกเกิดของ Monoalcohol ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 ถึง 70 บาร์ ความเร็วเชิงสเปสของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ และความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจเนชันของกลีเซอรอลสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. ปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจเนชันของกลีเซอรอลประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยาย่อยคือ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน เป็นการกำจัดอะตอมของออกซิเจนออกจากโมเลกุลของกลีเซอรอล ได้ผลิตข้างเคียงคือน้ำ และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน เป็นการเติมอะตอมของไฮโดรเจนลงบนพันธะคู่ของ HA, Acetone และ Propanal

2. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจเนชันของกลีเซอรอลสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมที่ภาวะการทำปฏิกิริยาเดียวกัน อีกทั้งการทดลองโดยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมให้ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักสูงกว่าการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

3. ผลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาส่งผลให้กลีเซอรอลเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น แต่ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO กลับลดลง เนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ 1,2-PDO เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิอีกครั้ง กลายเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงตัวอื่น เช่น 1-PO, 2-PO, Propane, EtOH และ Methane อีกทั้งการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้สารมัธยันตร์ซึ่งเป็นสารประกอบจำพวกแอลดีไฮด์และคีโตน เกิดการรวมตัวกันผ่านปฏิกิริยาอัลดอลคอนเดนเซชัน ได้สารประกอบออกซิเจนที่มีสายโซ่ที่ยาวขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจเนชันของกลีเซอรอลเท่ากับ 220 องศาเซลเซียส

4. ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนพบว่า การเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนส่งผลให้ได้ค่าการเลือกเกิดของ 1,2-PDO สูงขึ้น เนื่องจากทำให้ Hydroxyacetone เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน กลายเป็น 1,2-PDO ได้มากขึ้น ความดันแก๊สไฮโดรเจนที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจเนชันของกลีเซอรอลเท่ากับ 50 บาร์

รายการอ้างอิง

- Amada, Y., Y. Shinmi, S. Koso, T. Kubota, Y. Nakagawa & K. Tomishige (2011) Reaction Mechanism of the Glycerol Hydrogenolysis to 1,3-Propanediol over Ir-ReO_x/SiO₂ Catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental* 105, 117–127.
- Auneau, F., S. Noël, G. Aubert, M. Besson, L. Djakovitch & C. Pinel (2011) On the Role of the Atmosphere in the Catalytic Glycerol Transformation over Iridium-based Catalysts. *Catalysis Communications* 16, 144–149.
- Balaraju, M., V. Rekha, P. P. S. Prasad, R. B. N. Prasad & N. Lingaiah (2008) Selective Hydrogenolysis of Glycerol to 1, 2 Propanediol over Cu–ZnO Catalysts. *Catalysis Letters* 126, 119–124.
- Balaraju, M., V. Rekha, P. S. Prasad Sai, B. L. A. Prabhavathi Devi, R. B. N. Prasad & N. Lingaiah (2009) Influence of Solid Acids as Co-Catalysts on Glycerol Hydrogenolysis to Propyleneglycol over Ru/C Catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 354, 82–87.
- Dasaria, M. A., P. P. Kiatsimkula, W. R. Sutterlin & G. J. Suppes (2005) Low-Pressure Hydrogenolysis of Glycerol to Propylene Glycol. *Applied Catalysis A: General* 281, 225–231.
- Delgado, S. N., L. Vivier & C. Especel (2014) Polyol Hydrogenolysis on Supported Pt Catalysts: Comparison between Glycerol and 1,2-Propanediol. *Catalysis Communications*, 43, 107–111.
- Feng, J., W. Xiong, B. Xu, W. Jiang, J. Wang & H. Chen (2014) Basic Oxide-Supported Ru Catalysts for Liquid Phase Glycerol Hydrogenolysis in an Additive-Free System. *Catalysis Communications*, 46, 98–102.
- Furimsky, E. *Comprehensive Heterocyclic Chemistry*. Pergamon Press, 4.
- Gandarias, I., P. L. Arias, J. Requies, M. B. Güemez & J. L. G. Fierro (2010) Hydrogenolysis of Glycerol to Propanediols over a Pt/ASA Catalyst: The Role of Acid and Metal Sites on Product Selectivity and the Reaction Mechanism. *Applied Catalysis B: Environmental* 97, 248–256.

- Grange, P. & X. Vanhaeren (1997) Hydrotreating Catalysts, An Old Story with New Challenges. *Catalysis Today*, 36, 375-391.
- Grilc, M., B. Likozar & J. Levec (2014) Hydrodeoxygenation and Hydrocracking of Solvolysed Lignocellulosic Biomass by Oxide, Reduced and Sulphide Form of NiMo, Ni, Mo and Pd Catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 150-151, 275-287.
- Guo, L., J. Zhou, J. Mao, X. Guo & S. Zhang (2009) Supported Cu Catalysts for the Selective Hydrogenolysis of Glycerol to Propanediols. *Applied Catalysis A: General* 367, 93-98.
- Guo, X., Y. L. R. Shi, Q. L. E. Zhan & W. Shen (2009) Co/MgO Catalysts for Hydrogenolysis of Glycerol to 1, 2-Propanediol. *Applied Catalysis A: General*, 371, 108-113.
- Hancsók, J., T. Kasza, S. Kovács, P. Solymosi & A. Holló (2012) Production of Bioparaffins by the Catalytic Hydrogenation of Natural Triglycerides. *Journal of Cleaner Production*, 34, 76-81.
- Hao, S. L., W. C. Peng, N. Zhao, F. K. Zhao, W. Wei & Y. H. Sun (2010) Hydrogenolysis of Glycerol to 1,2-Propanediol Catalyzed by Cu-H₄SiW₁₂O₄₀/Al₂O₃ in Liquid Phase. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 85, 1499-1503.
- Hnat, A. W., E. Milchert & B. Grzmil (2013) Influence of Parameters on Glycerol Hydrogenolysis over a Cu/Al₂O₃ Catalyst. *Chemical Engineering & Technology* 36, 411-418.
- Huang, L., Y. Zhu, H. Y. Zheng, G. Ding & Y. Li (2009) Direct Conversion of Glycerol into 1,3-Propanediol over Cu-H₄SiW₁₂O₄₀/SiO₂ in Vapor Phase. *Catalysis Letters*, 131, 312-320.
- Huang, L., Y. L. Zhu, H. Y. Zheng, Y. W. Li & Z. Y. Zeng (2008) Continuous Production of 1,2-Propanediol by the Selective Hydrogenolysis of Solvent-Free Glycol Under Mild Condition. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 83, 1670-1675.
- Huang, Z., F. Cui, H. Kang, J. Chen & C. Xia (2009) Characterization and Catalytic Properties of the CuO/SiO₂ Catalysts Prepared by Precipitation-gel Method in

- the Hydrogenolysis of Glycerol to 1,2-Propanediol: Effect of Residual Sodium. *Applied Catalysis A: General*, 366, 288–298.
- Karimi, E., I. F. Teixeira, L. P. Ribeiro, A. Gomez, R. M. Lago, G. Penner, S. W. Kycia & M. Schlaf (2012) Ketonization and Deoxygenation of Alkanoic Acids and Conversion of Levulinic Acid to Hydrocarbons using a Red Mud Bauxite Mining Waste as the Catalyst. *Catalysis Today*, 190, 73–88.
- Katritzky, A. R. & C. W. Rees *Comprehensive Heterocyclic Chemistry*. Pergamon Press, 4.
- Kusunoki, Y., T. Miyazawa, K. Kunimori & K. Tomishige (2005) Highly Active Metal–Acid Bifunctional Catalyst System for Hydrogenolysis of Glycerol Under Mild Reaction Conditions. *Catalysis Communications*, 6, 645–649.
- Li, Y., L. Ma, H. Liu & D. He (2014) Influence of HZSM5 on the Activity of Ru Catalysts and Product Selectivity during the Hydrogenolysis of Glycerol. *Applied Catalysis A: General* 469, 45–51.
- Ma, L., D. He & Z. Li (2008) Promoting Effect of Rhenium on Catalytic Performance of Ru Catalysts in Hydrogenolysis of Glycerol to Propanediol. *Catalysis Communications*, 9, 2489–2495.
- Mane, R. B., A. M. Hengne, A. A. Ghalwadkar, S. Vijayanand, P. H. Mohite, H. S. Potdar & C. V. Rode (2010) Cu:Al Nano Catalyst for Selective Hydrogenolysis of Glycerol to 1,2-Propanediol. *Catalysis Letters*, 135, 141–147.
- Marinoiu, M., G. Ionita, C. L. Gaspar, C. Cobzaru & S. Oprea (2009) Glycerol Hydrogenolysis to Propylene Glycol. *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, 97, 315–320.
- Martin, A., U. Armbruster, I. Gandarias & A. P.L. (2013) Glycerol Hydrogenolysis into Propanediols using Insitu Generated Hydrogen – A cCritical Review. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 115, 9–27.
- Meher, L. C., R. Gopinath, S. N. Naik & A. K. Dalai (2009) Catalytic Hydrogenolysis of Glycerol to Propylene Glycol over Mixed Oxides Derived from a Hydrotalcite-Type Precursor. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 48, 1840–1846.

- Miranda, B. C., R. J. Chimentão, J. B. O. Santos, F. Gispert-Guirado, L. Llorca, F. Medina, F. López Bonillo & J. E. Sueiras (2014) Conversion of glycerol over 10%Ni/Al₂O₃ catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*, 147, 464–480.
- Miyazawa, T., S. Koso, K. Kunimori & K. Tomishige (2007) Development of a Ru/C Catalyst for Glycerol Hydrogenolysis in Combination with an Ion-exchange Resin. *Applied Catalysis A: General*, 318, 244–251.
- Miyazawa, T., Y. Kusunoki, K. Kunimori & K. Tomishige (2006) Glycerol Conversion in the Aqueous Solution under Hydrogen over Ru/C + an Ion-exchange Resin and Its Reaction Mechanism. *Journal of Catalysis*, 240, 213–221.
- Perosa, A. & P. Tundo (2005) Selective Hydrogenolysis of Glycerol with Raney Nickel. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 44, 8535-8537.
- Rode, C. V., A. A. Ghalwadkar, R. B. Mane, A. M. Hengne, S. T. Jadkar & N. S. Biradar (2010) Selective Hydrogenolysis of Glycerol to 1,2-Propanediol: Comparison of Batch and Continuous Process Operations. *Organic Process Research & Development*, 14, 1385–1392.
- Romero, Y., F. Richard & S. Brunet (2010) Hydrodeoxygenation of 2-Ethylphenol as a Model Compound of Bio-Crude over Sulfided Mo-based Catalysts: Promoting Effect and Reaction Mechanism. *Applied Catalysis B: Environmental* 98, 213–223.
- Ryneveld, E. V., A. S. Mahomed, P. S. V. Heerden & H. B. Friedrich (2011) Direct Hydrogenolysis of Highly Concentrated Glycerol Solutions over Supported Ru, Pd and Pt Catalyst Systems. *Catalysis Letters*, 141, 958–967.
- Santikunaporn, M. & S. Ejaroj (2012) Production of Hydrocarbons from Palm Oil over NiMo Catalyst. *American Transactions on Engineering & Applied Sciences*, 1.
- Schuchardt, U., R. Serchelia & R. M. Vargas (1998) Transesterification of Vegetable Oils: a Review. *JOURNAL OF THE BRAZILIAN CHEMICAL SOCIETY*, 9, 199-210.
- Senol, O. I., E. M. Ryymin, T. R. Viljava & A. O. I. Krause (2007) Reactions of Methyl Heptanoate Hydrodeoxygenation on Sulphided Catalysts. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 268, 1–8.

- Senol, O. I., T. R. Viljava & A. O. I. Krause (2005a) Hydrodeoxygenation of Aliphatic Esters on Sulphided NiMo/Al₂O₃ and CoMo/Al₂O₃ catalyst: The Effect of Water. *Catalysis Today*, 106, 186–189.
- (2005b) Hydrodeoxygenation of Methyl Esters on Sulphided NiMo/Al₂O₃ and CoMo/Al₂O₃ Catalysts. *Catalysis Today*, 100, 331–335.
- Toba, M., Y. Abe, H. Kuramochi, M. Osako, T. Mochizuki & Y. Yoshimura (2011) Hydrodeoxygenation of Waste Vegetable Oil over Sulfide Catalysts. *Catalysis Today*, 164, 533–537.
- Topsoe, H., B. S. Clausen & F. E. Massoth. 1996. *Hydrotreating Catalysis Science and Technology*. Springer Berlin Heidelberg.
- Veriansyah, B., J. Y. Han, S. K. Kim, S. A. Hong, Y. J. Kim, J. S. Lim, Y. W. Shu, S. G. Oh & J. Y. Kim (2012) Production of Renewable Diesel by Hydroprocessing of Soybean Oil: Effect of Catalyst. *Fuel*, 94, 578–585.
- Wang, X., G. Li & U. S. Ozkan (2004) Hydrogenation of Hexanal over Sulfided Ni-Mo/Al₂O₃ Catalysts. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 217, 219–229.
- ณรงค์วุฒิ เจ้าแก้วแก้ว, 2554. ไฮโดรดีออกซิเจนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม. วิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภทร จิรเศวตกุล, 2553. ไฮโดรดีออกซิเจนชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและโคบอลต์โมลิบดีนัม. วิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภาณุวิชญ์ เจริญวงศ์, 2553. การไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม. วิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรรัตน์ เลิศสนเมธากุล, 2553. กระบวนการผลิตกลีเซอรอลคาร์บอนเนตจากกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล. วิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม
ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.50	0.50	0.49	0.50	0.67	1.34
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที)	255.50	254.00	247.94	252.48	1.20	1.80
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	150.00	149.00	148.00	149.00	0.67	0.67
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	146.00	145.00	143.00	144.67	0.92	1.15
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	4.00	4.00	5.00	4.33	15.38	7.69
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	146.00	145.00	143.00	144.67	0.92	1.15
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	15.54	16.56	16.07	16.06	3.14	3.22
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	32.13	30.52	33.39	32.01	4.30	4.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.79	4.53	4.56	4.96	16.69	8.59
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.24	1.20	1.25	1.23	1.54	2.19
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.49	0.49	0.49	0.49	0.00	0.00
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที)	250.39	248.92	247.94	249.08	0.52	0.46
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	148.00	148.00	147.00	147.67	0.23	0.45
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	145.00	145.00	143.00	144.33	0.46	0.92
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	3.00	3.00	4.00	3.33	20.00	10.00
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	145.00	145.00	143.00	144.33	0.46	0.92
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	15.54	16.56	16.07	16.06	3.14	3.22
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	32.13	30.52	33.39	32.01	4.30	4.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	1.71	1.88	1.89	1.83	3.58	6.42
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.79	4.53	4.56	4.96	16.69	8.59
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.24	1.20	1.25	1.23	1.54	2.19
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.49	0.49	0.49	0.49	0.00	0.00
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	250.39	248.92	247.94	249.08	0.52	0.46
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	148.00	148.00	148.00	148.00	0.00	0.00
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	142.00	142.00	141.00	141.67	0.24	0.47
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	6.00	6.00	7.00	6.33	10.53	5.26
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	142.00	142.00	141.00	141.67	0.24	0.47
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	15.54	16.56	16.07	16.06	3.14	3.22
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	32.13	30.52	33.39	32.01	4.30	4.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	3.95	3.95	3.95	3.95	0.00	0.00
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.79	4.53	4.56	4.96	16.69	8.59
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.24	1.20	1.25	1.23	1.54	2.19
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.49	0.49	0.49	0.49	0.00	0.00
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	250.39	248.92	247.94	249.08	0.52	0.46
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	148.00	148.00	148.00	148.00	0.00	0.00
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	135.00	134.00	135.00	134.67	0.25	0.50
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	13.00	14.00	13.00	13.33	5.00	2.50
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	111.00	108.00	108.00	109.00	1.83	0.92
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	24.00	26.00	27.00	25.67	5.19	6.49
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	15.54	16.56	16.07	16.06	3.14	3.22
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	32.13	30.52	33.39	32.01	4.30	4.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	3.02	2.98	2.97	2.99	1.05	0.59
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.79	4.53	4.56	4.96	16.69	8.59
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.24	1.20	1.25	1.23	1.54	2.19
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	1.30	1.29	1.28	1.29	0.84	0.96

ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.50	0.50	0.49	0.50	0.67	1.34
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	255.50	254.00	247.94	252.48	1.20	1.80
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	150.00	149.00	148.00	149.00	0.67	0.67
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	122.00	122.00	121.00	121.67	0.27	0.55
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	28.00	27.00	27.00	27.33	2.44	1.22
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	92.00	90.00	86.00	89.33	2.99	3.73
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	30.00	32.00	35.00	32.33	8.25	7.22
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	15.54	16.56	16.07	16.06	3.14	3.22
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	32.13	30.52	33.39	32.01	4.30	4.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	2.98	2.67	2.76	2.80	6.41	4.74
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.79	4.53	4.56	4.96	16.69	8.59
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.24	1.20	1.25	1.23	1.54	2.19
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	2.23	2.12	2.11	2.15	3.64	2.07

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม
ความดันแก๊สไฮโดรเจน 50 บาร์ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 50 บาร์
 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.49	0.49	0.49	0.49	0.00	0.00
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที)	250.39	248.92	247.94	249.08	0.52	0.46
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	148.00	147.00	148.00	147.67	0.23	0.45
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	144.00	143.00	144.00	143.67	0.23	0.46
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	144.00	143.00	144.00	143.67	0.23	0.46
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	15.54	16.56	16.07	16.06	3.14	3.22
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	32.13	30.52	33.39	32.01	4.30	4.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.79	4.53	4.56	4.96	16.69	8.59
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.24	1.20	1.25	1.23	1.54	2.19
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 50 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.50	0.49	0.49	0.49	1.35	0.68
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	255.50	248.92	247.94	250.79	1.88	1.14
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	149.00	148.00	148.00	148.33	0.45	0.22
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	145.00	144.00	143.00	144.00	0.69	0.69
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	4.00	4.00	5.00	4.33	15.38	7.69
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	145.00	144.00	143.00	144.00	0.69	0.69
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	15.54	16.56	16.07	16.06	3.14	3.22
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	32.13	30.52	33.39	32.01	4.30	4.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	1.38	1.22	1.28	1.29	6.65	5.82
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.79	4.53	4.56	4.96	16.69	8.59
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.24	1.20	1.25	1.23	1.54	2.19
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 50 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.49	0.50	0.50	0.50	0.67	1.34
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	250.39	254.00	253.00	252.46	0.61	0.82
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	148.00	150.00	149.00	149.00	0.67	0.67
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	142.00	144.00	142.00	142.67	0.93	0.47
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	6.00	6.00	7.00	6.33	10.53	5.26
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	142.00	144.00	142.00	142.67	0.93	0.47
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	15.54	16.56	16.07	16.06	3.14	3.22
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	32.13	30.52	33.39	32.01	4.30	4.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	2.90	2.93	3.09	2.98	4.30	4.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.79	4.53	4.56	4.96	16.69	8.59
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.24	1.20	1.25	1.23	1.54	2.19
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	1.39	1.44	1.41	1.41	1.82	1.67

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 50 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.49	0.49	0.49	0.49	0.00	0.00
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	250.39	248.92	247.94	249.08	0.52	0.46
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	151.00	150.00	148.00	149.67	0.89	1.11
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	139.00	137.00	136.00	137.33	1.21	0.97
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	12.00	13.00	12.00	12.33	5.41	2.70
ผลิตภัณฑ์เฟรมมีซ์ (กรัม)	117.00	114.00	114.00	115.00	1.74	0.87
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซ์ (กรัม)	22.00	23.00	22.00	22.33	2.99	1.49
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	15.54	16.56	16.07	16.06	3.14	3.22
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	32.13	30.52	33.39	32.01	4.30	4.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	1.54	1.33	1.53	1.47	4.99	9.33
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.79	4.53	4.56	4.96	16.69	8.59
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.24	1.20	1.25	1.23	1.54	2.19
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	1.58	1.56	1.54	1.56	1.22	1.20

ตารางที่ ข-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 50 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.49	0.49	0.49	0.49	0.00	0.00
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	250.39	248.92	247.94	249.08	0.52	0.46
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	147.00	147.00	148.00	147.33	0.45	0.23
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	123.00	125.00	125.00	124.33	0.54	1.07
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	24.00	22.00	23.00	23.00	4.35	4.35
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	94.00	95.00	93.00	94.00	1.06	1.06
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	29.00	30.00	32.00	30.33	5.49	4.40
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	15.54	16.56	16.07	16.06	3.14	3.22
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	32.13	30.52	33.39	32.01	4.30	4.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	1.43	1.84	1.86	1.71	8.83	16.58
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.79	4.53	4.56	4.96	16.69	8.59
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.24	1.20	1.25	1.23	1.54	2.19
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	2.50	2.78	2.59	2.63	5.94	4.71

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

ความดันแก๊สไฮโดรเจน 70 บาร์ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 70 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.49	0.50	0.50	0.50	1.00	1.61
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที)	250.39	255.52	253.51	253.14	0.94	1.09
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	147.00	148.00	149.00	148.00	0.68	0.68
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	144.00	145.00	147.00	145.33	1.15	0.92
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	3.00	3.00	2.00	2.67	12.50	25.00
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	144.00	145.00	147.00	145.33	1.15	0.92
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	15.54	16.56	16.07	16.06	3.14	3.22
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	32.13	30.52	33.39	32.01	4.30	4.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.79	4.53	4.56	4.96	16.69	8.59
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.24	1.20	1.25	1.23	1.54	2.19
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 70 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.49	0.49	0.50	0.49	1.49	0.74
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	250.39	248.92	253.51	250.94	1.02	0.80
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	147.00	148.00	150.00	148.33	1.12	0.90
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	144.00	145.00	146.00	145.00	0.69	0.69
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	3.00	3.00	4.00	3.33	20.00	10.00
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	144.00	145.00	146.00	145.00	0.69	0.69
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	15.54	16.56	16.07	16.06	3.14	3.22
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	32.13	30.52	33.39	32.01	4.30	4.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	0.86	0.81	0.63	0.77	12.43	18.42
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.79	4.53	4.56	4.96	16.69	8.59
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.24	1.20	1.25	1.23	1.54	2.19
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-

ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 70 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.49	0.50	0.50	0.50	1.00	1.61
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	250.39	255.52	253.51	253.14	0.94	1.09
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	148.00	149.00	150.00	149.00	0.67	0.67
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	142.00	142.00	144.00	142.67	0.93	0.47
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	6.00	7.00	6.00	6.33	10.53	5.26
ผลิตภัณฑ์เฟสมีขี้ (กรัม)	142.00	142.00	144.00	142.67	0.93	0.47
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีขี้ (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	15.54	16.56	16.07	16.06	3.14	3.22
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	32.13	30.52	33.39	32.01	4.30	4.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	2.09	1.78	2.02	1.96	6.13	9.20
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.79	4.53	4.56	4.96	16.69	8.59
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.24	1.20	1.25	1.23	1.54	2.19
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	1.62	1.66	1.59	1.62	2.21	1.92

ตารางที่ ค-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 70 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.49	0.50	0.50	0.50	1.00	1.61
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	250.39	255.52	253.51	253.14	0.94	1.09
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	148.00	149.00	149.00	148.67	0.22	0.45
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	136.00	136.00	137.00	136.33	0.49	0.24
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	12.00	13.00	12.00	12.33	5.41	2.70
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	116.00	115.00	117.00	116.00	0.86	0.86
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	20.00	21.00	20.00	20.33	3.28	1.64
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	15.54	16.56	16.07	16.06	3.14	3.22
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	32.13	30.52	33.39	32.01	4.30	4.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	1.13	1.31	1.04	1.16	13.25	10.62
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.79	4.53	4.56	4.96	16.69	8.59
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.24	1.20	1.25	1.23	1.54	2.19
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	1.82	1.86	1.96	1.88	4.26	3.30

ตารางที่ ค-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 70 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.33	0.27
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	255.50	255.52	253.51	254.84	0.27	0.52
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	149.00	151.00	150.00	150.00	0.67	0.67
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	126.00	127.00	126.00	126.33	0.53	0.26
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	23.00	24.00	24.00	23.67	1.41	2.82
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	26.00	27.00	26.00	26.33	2.53	1.27
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	15.54	16.56	16.07	16.06	3.14	3.22
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	32.13	30.52	33.39	32.01	4.30	4.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	1.08	1.06	1.04	1.06	2.01	1.95
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.79	4.53	4.56	4.96	16.69	8.59
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.24	1.20	1.25	1.23	1.54	2.19
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	3.50	3.33	3.36	3.40	2.99	1.94

ภาคผนวก ง
ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โพลีบดินัม
ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์
 ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โพลีบดินัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.48	0.48	0.49	0.48	1.38	0.69
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที)	245.28	243.84	247.94	245.69	0.92	0.75
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	146.00	146.00	148.00	146.67	0.91	0.45
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	142.00	142.00	143.00	142.33	0.47	0.23
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	4.00	4.00	5.00	4.33	15.38	7.69
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	142.00	142.00	143.00	142.33	0.47	0.23
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	6.18	8.11	6.86	7.05	15.07	12.37
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	27.36	24.90	24.01	25.43	7.60	5.55
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	4.26	4.20	3.98	4.15	2.70	3.90
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-

ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.49	0.49	0.49	0.49	0.00	0.00
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	250.39	248.92	247.94	249.08	0.52	0.46
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	148.00	148.00	148.00	148.00	0.00	0.00
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	140.00	140.00	139.00	139.67	0.24	0.48
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	8.00	8.00	9.00	8.33	8.00	4.0
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	140.00	140.00	140.00	139.00	0.24	0.48
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	19.94	21.56	20.79	20.76	3.83	3.97
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	34.83	33.29	33.84	33.99	2.49	2.05
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	2.33	1.97	2.14	2.14	8.48	8.33
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.40	5.15	5.35	5.30	1.89	2.81
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.45	1.59	5.35	5.30	1.89	2.81
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-

ตารางที่ ง-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.50	0.49	0.49	0.49	1.35	0.68
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	255.50	248.92	247.94	250.79	1.88	1.14
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	150.00	147.00	147.00	148.00	1.35	0.68
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	140.00	136.00	136.00	137.33	1.94	0.97
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	10.00	11.00	11.00	10.67	3.13	6.25
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	140.00	136.00	136.00	137.33	1.94	0.97
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	46.22	47.17	43.57	45.66	3.32	4.56
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	27.42	26.22	26.15	26.60	3.09	1.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	4.15	4.19	4.27	4.20	1.56	1.18
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	6.46	6.36	6.41	6.41	0.73	0.76
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.29	1.19	1.26	1.25	3.65	4.36
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	0.66	0.66	0.76	0.69	9.28	4.78

ตารางที่ ง-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.49	0.50	0.49	0.49	1.75	0.88
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	250.39	255.52	247.94	251.28	1.69	1.33
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	147.00	148.00	147.00	147.33	0.45	0.23
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	131.00	133.00	132.00	132.00	0.76	0.76
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	16.00	15.00	15.00	15.33	4.35	2.17
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	105.00	109.00	109.00	107.67	1.24	2.48
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	26.00	24.00	23.00	24.33	6.85	5.48
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	79.27	79.53	78.64	79.15	0.49	0.64
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	6.67	5.63	6.09	6.13	8.84	8.12
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	3.27	3.26	3.55	3.36	5.58	3.03
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.28	5.37	5.59	5.41	3.22	2.43
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.16	1.14	1.19	1.16	2.54	2.07
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	1.08	1.07	1.13	1.10	3.14	1.87

ตารางที่ ง-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่าง			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	ที่ 1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาท)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.13	0.27
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาท)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.33	0.27
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	150.00	148.00	149.00	149.00	0.67	0.67
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	122.00	120.00	120.00	120.67	1.10	0.55
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	28.00	28.00	29.00	28.33	2.35	1.18
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	89.00	88.00	86.00	87.67	1.52	1.90
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	33.00	32.00	34.00	33.00	3.03	3.03
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	95.10	95.19	93.99	94.76	0.45	0.81
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	1.65	1.41	1.51	1.52	8.25	7.34
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	3.02	3.36	3.13	3.17	6.08	4.73
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	4.11	3.87	3.62	3.87	6.36	6.34
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	0.81	0.75	0.79	0.78	3.54	4.20
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	2.00	1.81	1.77	1.86	7.26	4.73

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โพลีบดินัม
ความดันแก๊สไฮโดรเจน 50 บาร์ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

ตารางที่ จ-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 50 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โพลีบดินัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.49	0.50	0.51	0.50	1.80	2.20
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที)	250.39	255.52	258.06	254.66	1.34	1.68
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	148.00	151.00	152.00	150.33	1.11	1.55
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	143.00	145.00	147.00	145.00	1.38	1.38
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	5.00	6.00	5.00	5.33	12.50	6.25
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	143.00	145.00	147.00	145.00	1.38	1.38
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	5.62	6.28	6.54	6.15	6.32	8.51
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	26.95	26.13	24.26	25.78	4.52	5.89
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	6.85	6.50	6.56	6.64	3.22	2.03
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-

ตารางที่ จ-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 50 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.33	0.27
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	255.50	255.52	253.51	254.84	0.27	0.52
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	149.00	148.00	148.00	148.33	0.45	0.22
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	144.00	143.00	142.00	143.00	0.70	0.70
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	5.00	5.00	6.00	5.33	12.50	6.25
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	144.00	143.00	142.00	143.00	0.70	0.70
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	18.92	16.91	18.89	18.24	3.71	7.30
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	41.34	39.50	38.83	39.89	3.64	2.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	1.49	1.74	1.68	1.64	6.32	9.16
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	8.50	8.86	8.33	8.56	3.50	2.78
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.14	1.28	1.25	1.23	4.75	6.54
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-

ตารางที่ จ-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 50 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.33	0.27
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	255.50	255.52	253.51	254.84	0.27	0.52
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	149.00	150.00	149.00	149.33	0.45	0.22
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	143.00	143.00	142.00	142.67	0.23	0.47
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	6.00	7.00	7.00	6.67	5.00	10.00
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	143.00	143.00	142.00	142.67	0.23	0.47
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	41.89	40.76	39.28	40.65	3.07	3.35
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	29.20	30.11	32.09	30.47	5.34	4.16
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	3.40	3.52	3.67	3.53	3.98	3.64
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	8.96	9.14	8.31	8.80	3.80	5.63
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.68	1.65	1.74	1.69	2.96	2.57
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	0.94	0.91	0.85	0.90	4.35	5.57

ตารางที่ จ-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 50 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.00	0.00
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	255.50	254.00	253.00	254.17	0.52	0.46
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	151.00	150.00	150.00	150.33	0.44	0.22
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	135.00	135.00	135.00	135.00	0.00	0.00
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	16.00	15.00	15.00	15.33	4.35	2.17
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	111.00	112.00	113.00	112.00	0.89	0.89
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	24.00	23.00	22.00	23.00	4.35	4.35
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	73.98	77.24	76.64	75.95	1.70	2.60
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	7.52	6.71	7.34	7.19	4.66	6.72
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	2.86	2.44	2.75	2.68	6.62	9.18
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	6.09	5.70	6.02	5.94	2.61	4.05
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.56	1.43	1.59	1.53	3.91	6.35
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	1.42	1.50	1.46	1.46	2.89	2.97

ตารางที่ จ-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 50 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.00	0.00
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	255.50	254.00	253.00	254.17	0.52	0.46
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	150.00	150.00	150.00	150.00	0.00	0.00
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	121.00	122.00	122.00	121.67	0.27	0.55
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	29.00	28.00	28.00	28.33	2.35	1.18
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	91.00	91.00	92.00	91.33	0.73	0.36
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	30.00	31.00	30.00	30.33	2.20	1.10
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	93.84	91.02	92.59	92.48	1.47	1.58
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	2.08	2.41	2.50	2.33	7.23	10.67
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	2.20	2.45	2.35	2.33	4.99	5.69
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	4.33	4.63	4.51	4.49	3.09	3.56
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	0.87	0.83	0.86	0.85	1.83	2.64
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	2.27	2.15	2.22	2.22	2.36	2.79

ภาคผนวก ฉ

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โพลีบดินัม

ความดันแก๊สไฮโดรเจน 70 บาร์ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

ตารางที่ ฉ-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 70 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โพลีบดินัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.49	0.50	0.50	0.50	0.67	1.34
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	250.39	254.00	253.00	252.46	0.61	0.82
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	148.00	150.00	149.00	149.00	0.67	0.67
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	143.00	146.00	144.00	144.33	1.15	0.92
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	5.00	4.00	5.00	4.67	7.14	14.29
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	143.00	146.00	144.00	144.33	1.15	0.92
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	3.83	2.00	2.14	2.66	44.05	24.72
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	26.85	25.51	24.37	25.58	4.98	4.71
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	7.25	7.43	7.20	7.29	1.85	1.31
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-

ตารางที่ จ-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 70 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.00	0.00
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	255.50	254.00	253.00	254.17	0.52	0.46
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	150.00	150.00	150.00	150.00	0.00	0.00
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	142.00	143.00	142.00	142.33	0.47	0.23
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	8.00	7.00	8.00	7.67	4.35	8.70
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	142.00	143.00	142.00	142.33	0.47	0.23
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	16.16	17.95	15.90	16.67	7.65	4.60
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	42.69	40.26	42.92	41.96	2.30	4.05
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	1.16	1.03	1.14	1.11	4.46	7.03
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	9.62	9.03	9.48	9.38	2.63	3.74
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.62	1.68	1.69	1.66	1.50	2.66
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-

ตารางที่ ฉ-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 70 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.50	0.50	0.49	0.50	0.67	1.34
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	255.50	254.00	247.94	252.48	1.20	1.80
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	149.00	149.00	147.00	148.33	0.45	0.90
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	140.00	140.00	137.00	139.00	0.72	1.44
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	9.00	9.00	10.00	9.33	7.14	3.57
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	140.00	140.00	137.00	139.00	0.72	1.44
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	39.36	39.60	38.58	39.18	1.08	1.53
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	33.88	30.20	33.68	32.59	3.98	7.32
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	2.34	2.15	2.33	2.27	2.79	5.47
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	10.43	10.69	10.35	10.49	1.87	1.31
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.81	1.88	1.96	1.89	4.14	3.80
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	1.04	0.82	0.93	0.93	12.08	11.96

ตารางที่ จ-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 70 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.49	0.50	0.49	0.49	1.35	0.68
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที)	250.39	254.00	247.94	250.78	1.29	1.13
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	148.00	149.00	148.00	148.33	0.45	0.22
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	133.00	136.00	135.00	134.67	0.99	1.24
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	15.00	13.00	13.00	13.67	9.76	4.88
ผลิตภัณฑ์เฟรมมีซ์ (กรัม)	111.00	115.00	115.00	113.67	1.17	2.35
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซ์ (กรัม)	22.00	21.00	20.00	21.00	4.76	4.76
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	71.85	70.15	68.16	70.05	2.56	2.70
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	7.62	7.46	7.30	7.46	2.16	2.10
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	2.18	2.20	2.11	2.16	1.76	2.40
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	6.11	6.36	6.30	6.26	1.67	2.38
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	1.78	1.77	1.70	1.75	1.73	2.98
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	1.59	1.66	1.63	1.63	2.06	2.36

ตารางที่ จ-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 70 บาร์
ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.48	0.48	0.50	0.49	2.74	1.37
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	245.28	243.84	253.00	247.37	2.27	1.43
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	147.00	147.00	150.00	148.00	1.35	0.68
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	121.00	122.00	122.00	121.67	0.27	0.55
มวลที่สูญเสีย (กรัม)	28.00	27.00	26.00	27.00	3.70	3.70
ผลิตภัณฑ์เฟสมีซัว (กรัม)	95.00	97.00	96.00	96.00	1.04	1.04
ผลิตภัณฑ์เฟสไม่มีซัว (กรัม)	26.00	25.00	26.00	25.67	1.30	2.60
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอล	89.88	87.27	87.14	88.10	2.02	1.08
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1,2-PDO	3.35	3.48	3.69	3.51	5.26	4.39
ร้อยละการเลือกเกิดของ Acetone	1.77	1.94	1.82	1.84	5.26	3.99
ร้อยละการเลือกเกิดของ 1-PO	5.01	5.17	5.51	5.23	5.31	4.12
ร้อยละการเลือกเกิดของ 2-PO	0.91	0.93	0.85	0.90	3.29	4.93
ร้อยละการเลือกเกิดของ EtOH	2.33	2.55	2.43	2.44	4.76	4.43

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุทธิชัย สุรสมภพ เกิดเมื่อวันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาในระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนพัฒนเวชศึกษา ในปีการศึกษา 2544 สำเร็จการศึกษาในระดับประถมมัธยมศึกษาจากโรงเรียนระยองวิทยาคม ในปีการศึกษา 2550 สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2554 และในปีการศึกษา 2555 ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2557

