

ไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอน



นางสาวรุ่งทิวา โกศล

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PARTIAL HYDROGENATION OF BIODIESEL USING CARBON-SUPPORTED NICKEL CATALYST



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ไชโตรีจินชั้นบางส่วนของไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอน

โดย นางสาวรุ่งทิภา โกศล

สาขาวิชา ปีโตเรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. พงศกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรินทร ชวศิริ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. นพิศา หิณชิระนันท์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนาธิป สามารถ)

รุ่งทิพา โกศล : ไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอน (PARTIAL HYDROGENATION OF BIODIESEL USING CARBON-SUPPORTED NICKEL CATALYST) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ, 117 หน้า.

ไบโอดีเซล เป็นอีกหนึ่งพลังงานทางเลือกที่ได้รับความนิยมในการค้นคว้าและวิจัยเป็นจำนวนมาก โดยหนึ่งในพืชเกษตรกรรมที่ถูกนำมาผลิตไบโอดีเซล คือปาล์มน้ำมัน แม้ว่าไบโอดีเซลมีสมบัติที่สามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลที่ได้จากแหล่งปิโตรเลียมได้ แต่ไบโอดีเซลก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและค่าการไหลเท ณ อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติโดยปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโดยมีคาร์บอนเป็นตัวรองรับ ภายใต้การทดลองที่ความดัน 3 บาร์ และ 5 บาร์ อุณหภูมิ 80, 100 และ 120 องศาเซลเซียส ใช้น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ น้ำหนักไบโอดีเซลที่ 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สภาวะการทดลองดังกล่าวนี้ใช้เพื่อปรับปรุงข้อจำกัดของไบโอดีเซล นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการเติมโลหะแมกนีเซียมในการเลือกเกิดซิส-ทรานส์ไอโซเมอร์ โดยผ่านกระบวนการไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอนและเติมโลหะแมกนีเซียมด้วยวิธีการจุ่มชุ่ม ตัวเร่งปฏิกิริยาและไบโอดีเซล จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์พื้นผิว ก๊าซโครมาโทกราฟี เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน เครื่องมือวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การรีดักชันโดยก๊าซไฮโดรเจน เทคนิควิเคราะห์ปริมาณพันธะคู่ด้วยไอโอดีน เครื่องมือวิเคราะห์สัณฐานตัวเร่งปฏิกิริยา และเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติไบโอดีเซล จากผลการศึกษาทั้งหมดพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอนและเติมโลหะแมกนีเซียม สามารถลดปริมาณของคาร์บอน 18 อะตอม แบบอิมตัว ให้ปริมาณคาร์บอน 18 อะตอมที่มีพันธะคู่หนึ่งตำแหน่งแบบซิสไอโซเมอร์มากขึ้น และลดปริมาณคาร์บอน 18 อะตอมที่มีพันธะคู่หนึ่งตำแหน่งแบบทรานส์ไอโซเมอร์ ซึ่งส่งผลดีต่อสมบัติไบโอดีเซลมากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอนที่ไม่มีการเติมโลหะแมกนีเซียม.

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5872037223 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: PARTIAL HYDROGENATION / BIODIESEL / CARBON SUPPORTED NICKEL CATALYST

RUNGTIWA KOSOL: PARTIAL HYDROGENATION OF BIODIESEL USING CARBON-SUPPORTED NICKEL CATALYST. ADVISOR: ASSOC. PROF. PRASERT REUBROYCHAROEN, Ph.D., 117 pp.

Biodiesel is another popular alternative energy for many research. One of the agricultural crops used to produce biodiesel is oil from palm oil. Although biodiesel has properties that can be used to replace diesel that derived from petroleum but biodiesel also has limitations on the oxidative stability and cold flow properties, which can be improved by partial hydrogenation method. This study investigates the partial hydrogenation of biodiesel using carbon supported nickel catalyst under the experimental conditions at 3 bar and 5 bar, the temperatures of 80, 100 and 120 degree Celsius were used as the weight of catalyst per weight of biodiesel at 1, 3 and 5 percent by weight. This experiment conditions are used to improve biodiesel limits. In addition, the effect of magnesium addition was investigated in the selection of cis-trans isomers by partial hydrogenation of biodiesel. Using nickel catalyst on carbon supported and magnesium addition by impregnation method. Catalysts and biodiesel are analyzed by surface analyzer, Chromatography, X-ray diffraction analyzer, Analyzer for hydrogen reduction behavior, Techniques for analyzing the amount of double bonds with iodine, Catalytic converter and biodiesel properties analysis tools. All results showed that nickel catalyst on carbon supported and magnesium addition could reduce the amount of C18:0, cis-C18:1 were increased and reduce the amount of trans-C18:1. This results are better improve for biodiesel properties than the use of nickel-based catalysts on carbon supported without magnesium addition

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature

Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะสำเร็จลุล่วงมิได้หากขาดความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัสดุติบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ จากบุคคลากรและองค์กรต่าง ๆ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุนบุคคลากร และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาส ผู้วิจัยในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ แนวทางปฏิบัติ และสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์สถานที่ทำวิจัย และอำนวยความสะดวกในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์และติดต่อบุคคลากรจากองค์กรต่าง ๆ

2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ ชวศิริ ที่สละเวลามาเป็นประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

3. รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ทัญชีระนันท์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามารถ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

4. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่เครื่องมือและอุปกรณ์ทำวิจัย

5. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์การวิจัย ให้ความรู้และช่วยเหลือผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด

6. บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อน้ำมันไบโอดีเซลให้ผู้วิจัยเพื่อศึกษาและทำการทดลอง

7. รุ่งพี เพื่อน และบุคคลากรของหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอด

สุดท้ายนี้กราบขอบคุนบิดา มารดา ครอบครัวและญาติพี่น้อง ที่ให้การสนับสนุนอำนวยความสะดวกในการวิจัย และคอยเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด อีกทั้งครูอาจารย์ที่คอยอบรมสั่งสอน ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ข้าพเจ้าในทุกแขนง จนข้าพเจ้าสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ	1
สารบัญตาราง.....	4
บทที่ 1.....	6
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	6
1.2 วัตถุประสงค์.....	9
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้.....	9
2.1 ไบโอดีเซล	10
2.1.1 การผลิตไบโอดีเซล.....	10
2.1.2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล	11
2.1.3 คุณสมบัติของไบโอดีเซล	14
2.1.4 คุณภาพของไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์.....	15
2.2 นิกเกิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรต.....	19
2.2.1 การใช้งานนิกเกิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรต.....	20
2.2.2 ความเป็นพิษของโลหะนิกเกิลจากสารประกอบนิกเกิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรต	21
2.3 แมกนีเซียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรต.....	21
2.3.1 การใช้งานแมกนีเซียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรต.....	22
2.3.2 ความเป็นพิษของโลหะแมกนีเซียมจากสารประกอบแมกนีเซียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรต	22
2.4 ดี-ไซโลส.....	23

2.4.1	กระบวนการสังเคราะห์ไซโลส	23
2.4.2	การใช้ประโยชน์ของไซโลส	25
	การประยุกต์ใช้งานไซโลสในอุตสาหกรรม	25
2.4.2.1	การหมักเอทานอลออกจากน้ำตาลไซโลส (Bioethanol from xylose)	25
2.4.2.2	ยีสต์ที่หมักจากไซโลสด้วยวิธีธรรมชาติ	27
2.5	ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน	28
2.5.1	ประโยชน์ของการทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน	29
2.6	คาร์บอนทรงกลม	29
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการวิจัย	35
3.2	วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	36
3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	37
3.4	ขั้นตอนการทดลอง	39
3.4.1	การสังเคราะห์ตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมจากอนุพันธ์ไซโลส	39
3.4.2	การเติมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม	41
3.4.2.1	การเติมโลหะนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม (Ni/CS)	41
3.4.2.2	การเติมโลหะนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม โดยมีการเติมโลหะแมกนีเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสับสนุน (Ni-Mg/CS)	42
3.4.3	ทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน (partial hydrogenation)	43
3.4.4	สถานะที่ใช้ทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน	44
3.4.5	การพิสูจน์เอกลักษณ์และวิเคราะห์ผล	47
3.4.5.1	การวิเคราะห์ไบโอดีเซลที่ได้หลังไฮโดรจิเนชันบางส่วน	47
(1.)	การวิเคราะห์องค์ประกอบในไบโอดีเซลหลังไฮโดรจิเนชันบางส่วน	47

(2.) การวิเคราะห์ปริมาณพันธะคู่โดยวิธีทดสอบไอโอดีน	48
(3.) การวิเคราะห์สมบัติของไบโอดีเซล.....	48
3.4.5.2 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	49
(1.) การวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของผลึก	49
(2.) การตรวจสอบพฤติกรรมการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน.....	49
(3.) วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซ	50
(4.) การทดสอบลักษณะทางด้านสัญญาณวิทยา.....	52
4.1 การวิเคราะห์ไบโอดีเซลที่เป็นสารตั้งต้น	59
4.2 ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อไบโอดีเซลหลังการทำไฮโดรจีเนชันบางส่วน โดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS	61
4.2.1 พันธะคู่ของไบโอดีเซล	61
4.2.2 องค์ประกอบของไบโอดีเซล	63
4.2.3 การเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3	64
4.2.4 ปริมาณของ <i>cis</i> -C18:1 และ <i>trans</i> -C18:1	66
4.3 ผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS	67
4.3.1 พันธะคู่ของไบโอดีเซล	67
4.3.2 องค์ประกอบของไบโอดีเซล	68
4.3.3 การเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS	70
4.3.4 ปริมาณของ <i>cis</i> -C18:1 และ <i>trans</i> -C18:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS	70
4.4 ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อไบโอดีเซลหลังการทำไฮโดรจีเนชันบางส่วนโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS.....	72
4.4.1 พันธะคู่ของไบโอดีเซล	72
4.4.2 องค์ประกอบของไบโอดีเซล	73

4.4.3 การเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS.....	75
4.4.4 ปริมาณของ <i>cis</i> -C18:1 และ <i>trans</i> -C18:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS.....	76
4.5 ผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS.....	78
4.5.1 พันธะคู่ของไบโอดีเซล.....	78
4.5.3 การเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS.....	81
4.5.4 ปริมาณของ <i>cis</i> -C18:1 และ <i>trans</i> -C18:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS.....	82
4.6 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	84
4.6.1 ตรวจสอบพฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (temperature programmed reduction by hydrogen gas, H ₂ -TPR).....	84
4.6.2 การวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของผลึก (X-ray diffraction).....	85
4.6.3 วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของอนุภาคด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซ (Nitrogen adsorption-desorption).....	87
4.6.4 การทดสอบลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยา (Scanning electron microscope, SEM).....	88
4.6.5 สมบัติของไบโอดีเซล.....	89
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	91
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	92
รายการอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก ก.....	97
GC โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลก่อนและหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน.....	97
ภาคผนวก ข.....	111
วัดค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ.....	111
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	117

สารบัญรูปภาพ

หน้า

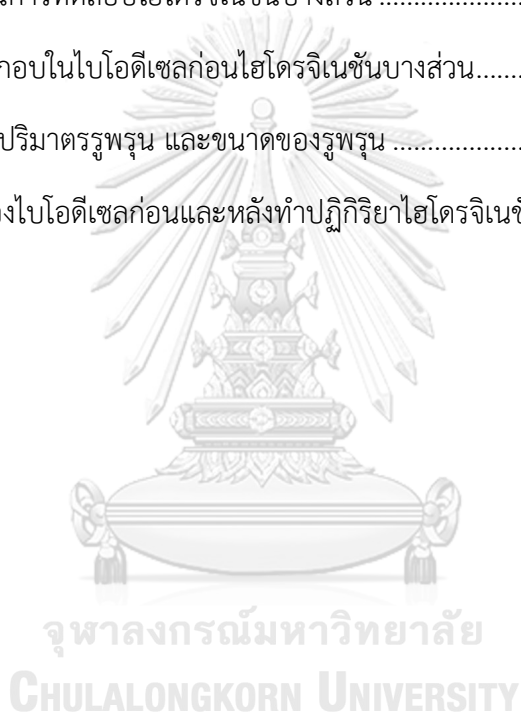
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาทรานเอสเตอร์ริฟิเคชันของไบโอดีเซล	12
รูปที่ 2.2 วิธีการสังเคราะห์ไบโอดีเซล	13
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของสารประกอบนิกเกิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรต	20
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสารประกอบแมกนีเซียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรต	22
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของไซโลส	24
รูปที่ 2.6 วิธีการนำน้ำตาลไซโลสเข้าสู่เซลล์ และวิธีการหมักเอทานอลจากน้ำตาลไซโลส	26
รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบนพื้นระคู่โดยใช้โลหะนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	28
รูปที่ 2.8 คาร์บอนทรงกลม	29
รูปที่ 3.1 เตาเพิ่มความดัน (autoclave)	39
รูปที่ 3.2 ตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมก่อนบด (ก.) และหลังบด (ข.)	39
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม	40
รูปที่ 3.4 เครื่องกลั่นระเหยแบบหมุน (rotary evaporation)	41
รูปที่ 3.5 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม (ก.) และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบน ตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมโดยมีการเติมโลหะแมกนีเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสับสนุน (ข.)	42
รูปที่ 3.6 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซล	43
รูปที่ 3.7 เตาปฏิกรณ์ชนิดกะ ขนาด 85 มิลลิลิตร	44
รูปที่ 3.8 เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (gas chromatography, GC) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7890A	47
รูปที่ 3.9 ทดสอบค่าไอโอดีน ก่อนไทเทรต(ก.) และหลังไทเทรต ณ จุดสมมูล(ข.)	48
รูปที่ 3.10 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance	49
รูปที่ 3.11 เครื่องมือการตรวจสอบพฤติกรรมเกิดการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (H ₂ -TPR)	50
รูปที่ 3.12 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของอนุภาคด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซ	51

รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Hitachi รุ่น S-3500N.....	52
รูปที่ 4.1 โครมาโตแกรมของไบโอดีเซลจากการวิเคราะห์โดยก๊าซโครมาโตกราฟี (GC)	61
รูปที่ 4.2 กรัมของไอโอดีน/100 กรัมของน้ำมันตัวอย่างบ่งบอกถึงปริมาณของพันธะคู่ในไบโอดีเซล เมื่อผ่านไฮโดรจิเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS	62
รูปที่ 4.3 องค์ประกอบของคาร์บอน 18 อะตอม ในไบโอดีเซลหลังปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน ..	65
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดัน	65
รูปที่ 4.5 ปริมาณของ cis-C18:1 และ trans-C18:1 หลังปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS.....	66
รูปที่ 4.6 กรัมของไอโอดีน/100 กรัมของน้ำมันตัวอย่างบ่งบอกถึงปริมาณของพันธะคู่ในไบโอดีเซลเมื่อผ่านไฮโดรจิเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มน้ำตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS ต่อน้ำหนักของไบโอดีเซล.....	67
รูปที่ 4.7 องค์ประกอบของคาร์บอน 18 อะตอม ในไบโอดีเซลหลังปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS ต่อน้ำหนักไบโอดีเซล	69
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 เมื่อเพิ่มน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	71
รูปที่ 4.9 ปริมาณของ cis-C18:1 และ trans-C18:1 หลังปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS.....	71
รูปที่ 4.10 กรัมของไอโอดีน/100 กรัมของน้ำมันตัวอย่างบ่งบอกถึงปริมาณของพันธะคู่ในไบโอดีเซลเมื่อผ่านไฮโดรจิเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มความดันและอุณหภูมิโดยใช้ Ni-Mg/CS ...	72
รูปที่ 4.11 องค์ประกอบของคาร์บอน 18 อะตอม ในไบโอดีเซลหลังปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS	75
รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดัน	76
รูปที่ 4.13 ปริมาณของ cis-C18:1 และ trans-C18:1 หลังปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS.....	77
รูปที่ 4.14 กรัมของไอโอดีน/100 กรัมของน้ำมันตัวอย่างบ่งบอกถึงปริมาณของพันธะคู่ในไบโอดีเซล เมื่อผ่านไฮโดรจิเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS	79

รูปที่ 4.15 แสดงถึงองค์ประกอบของคาร์บอน 18 อะตอม ในไบโอดีเซลหลังปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ,ความดันและน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS	81
รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 เมื่อเพิ่มน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS .	83
รูปที่ 4.17 ปริมาณของ cis-C18:1 และ trans-C18:1 หลังปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS	83
รูปที่ 4.18 อุณหภูมิการรีดักชัน ที่ 550 องศาเซลเซียส ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS	84
รูปที่ 4.19 อุณหภูมิการรีดักชัน ที่ 570 องศาเซลเซียส ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS.....	85
รูปที่ 4.20 สัณฐานของคาร์บอน.....	86
รูปที่ 4.21 รูปแบบของผลึกโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS.....	86
รูปที่ 4.22 รูปแบบของผลึกโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS.....	87
รูปที่ 4.23 SEM ของตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม (CS)	88
รูปที่ 4.24 SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS	88
รูปที่ 4.25 SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS.....	89

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าดัชนีมาตรฐานของสารประกอบที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	22
ตารางที่ 3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	36
ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	37
ตารางที่ 3.3 สภาวะในการทดสอบไฮโดรจีเนชันบางส่วน	45
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบในไบโอดีเซลก่อนไฮโดรจีเนชันบางส่วน.....	60
ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน	87
ตารางที่ 4.3 สมบัติของไบโอดีเซลก่อนและหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันบางส่วน	89





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

นับเป็นความโชคดีอย่างยิ่งของประชาชนชาวไทยที่ได้อาศัยอยู่ภายใต้ร่มพระบรมโพธิสมภารในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวผู้ทรงเปี่ยมด้วยพระเมตตาและพระปรีชาสามารถ พระวิสัยทัศน์ด้านพลังงานทดแทนที่ทรงเริ่มต้นศึกษาวิจัยขึ้นเมื่อ 20 ปีที่แล้ว ในขณะที่ราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกมีราคาสูงขึ้น ทำให้ปัจจุบันประชาชนชาวไทยได้มีทางเลือกในการใช้พลังงานทดแทนที่คนไทยสามารถผลิตได้เอง สามารถลดปริมาณการนำเข้าได้เป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีจำนวนประชากรเพิ่มมากขึ้น ความต้องการในการใช้พลังงานจึงมากขึ้นเช่นกัน ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของอุตสาหกรรม, การเกษตรกรรม และการขนส่ง ทำให้พลังงานที่ได้จากแหล่งปิโตรเลียมจากธรรมชาติถูกใช้มากขึ้น จนในปัจจุบันเริ่มมีแหล่งพลังงานเหล่านี้เริ่มลดลงอย่างมาก จึงทำให้ปัจจุบันมีพลังงานทางเลือกมากมายที่ได้รับความนิยม ซึ่งไบโอดีเซล หรือ กรดไขมันไม่อิ่มตัวเมทิลเอสเทอร์ ก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ได้รับความนิยม และถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง สาเหตุที่ไบโอดีเซลได้รับความนิยมเนื่องจากแหล่งที่ได้จากการผลิตนั้นมาจากธรรมชาติที่สามารถปลูกขึ้นมาทดแทนของเดิมได้ ความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมีการปลดปล่อยแก๊สออกสู่บรรยากาศได้น้อยกว่าน้ำมันจากแหล่งปิโตรเลียม อีกทั้งมีค่าเลขซีเทนที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่ได้จากแหล่งปิโตรเลียม อย่างไรก็ตามไบโอดีเซลก็มีข้อจำกัดหลักในด้านความเสถียรในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ (oxidative stability) และการไหลเท ณ อุณหภูมิต่ำ (cold flow properties) เพราะ ในไบโอดีเซลจะประกอบไปด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวหรือจำนวนพันธะคู่อยู่มากเป็นผลทำให้มีความเสถียรทางด้านการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนต่ำ เป็นผลให้มีผลต่อคุณภาพที่ด้อยลงของน้ำมันเมื่อมีการเก็บรักษาในระยะเวลาสั้น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจทำปฏิกิริยาเพื่อลดปริมาณพันธะไม่อิ่มตัวบางส่วนในไบโอดีเซล เนื่องจากหากโมเลกุลของไบโอดีเซลล้วนเป็นสายโซ่โมเลกุลแบบอิ่มตัวแล้ว แม้ว่าจะส่งผลดีต่อความเสถียรในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน แต่สายโซ่โมเลกุลที่อิ่มตัวของเอสเทอร์จะกลายเป็นผลึกได้ง่าย และไปขัดขวางระบบการทำงานของเครื่องยนต์ ดังนั้นงานนี้จึงทำการลดพันธะไม่อิ่มตัวลงเพียงบางส่วน องค์ประกอบไบโอดีเซลที่ส่งผลดีต่อความเสถียรทางด้านการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและสมบัติการไหลเท ณ อุณหภูมิต่ำที่เหมาะสม

คือ พันธะไม่อิ่มตัวแบบซิส หนึ่งตำแหน่งบนสายโซ่คาร์บอน 18 คาร์บอน (*cis*-C18:1) ที่พบว่าสามารถปรับปรุงข้อจำกัดของไบโอดีเซลได้เป็นอย่างดี

ไบโอดีเซล ถูกคิดค้นและนำมาทดลองใช้ในเครื่องยนต์เป็นผลสำเร็จครั้งแรกเมื่อ วันที่ 10 สิงหาคม ค.ศ. 1893 โดย “รูดอล์ฟ ดีเซล” (Rudolf C. Diesel : 1858-1913) วิศวกรชาวเยอรมัน ผู้ประดิษฐ์เครื่องยนต์ที่มีชื่อว่า “ดีเซล” เป็นผลสำเร็จในปี 1893 และจดสิทธิบัตรในปีถัดมา (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน)

ไบโอดีเซลหรือกรดไขมันไม่อิ่มตัวของเมทิลเอสเทอร์สามารถผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากสัตว์กับเมทานอลหรือเอทานอล ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ นิยมใช้ตัวเร่ง 2 ชนิด คือ ตัวเร่งชนิดกรด และตัวเร่งชนิดเบส การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน เช่น กรดซัลฟูริก, กรดฟอสฟอริกและกรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น แต่กระบวนการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าการใช้เบสเป็นตัวเร่ง จึงเหมาะสำหรับกลีเซอไรด์ที่มีปริมาณของกรดไขมันอิสระ สูงและมีน้ำหนักรวม ส่วนการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะรวดเร็วกว่าการใช้กรดถึง 4,000 เท่า จึงนิยมใช้วิธีนี้มากในการผลิตไบโอดีเซล โดยเฉพาะ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีราคาถูกกว่าชนิดอื่น และถึงแม้ว่าคุณสมบัติของไบโอดีเซลจะคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่ปัญหาหลักของไบโอดีเซลคือเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศและสมบัติการไหลเท ณ อุณหภูมิ-ต่ำ ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยเพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลโดยสามารถทำได้ด้วยไฮโดรจีเนชันบางส่วนของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวของเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งเรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไฮโดรจีเนชันบางส่วนของกรดไขมันไม่อิ่มตัวชนิดนี้ว่า “H-FAMES” โดยไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการไฮโดรจีเนชันบางส่วนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงได้อย่างมีนัยสำคัญ น้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการไฮโดรจีเนชันบางส่วน จะทนต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้มากขึ้น ส่งผลให้น้ำมันไม่เสื่อมคุณภาพลง ทั้งนี้การผลิต ไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการไฮโดรจีเนชันบางส่วน มักจะใช้สภาวะที่เหมาะสมและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมอีกด้วย

เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการไฮโดรจีเนชันบางส่วน กล่าวคือ น้ำมันจะผ่านปฏิกิริยาการเติมด้วยไฮโดรเจนที่ความดันต่ำ ทำให้สามารถเพิ่มคุณภาพและปรับปรุงข้อจำกัดของไบโอดีเซลได้โดยใช้ต้นทุนไม่สูงนัก สาเหตุที่ทำการไฮโดรจีเนชันเพียงบางส่วน เพื่อต้องการให้ในสายโซ่โมเลกุลของ ไบโอดีเซล มีปริมาณพันธะไม่อิ่มตัวหรือพันธะคู่ลดลงเท่านั้น ไม่ได้ต้องการให้เป็นสายโซ่ของเอสเทอร์ที่มีความอิ่มตัวทั้งหมด ยังคงต้องการให้เหลือพันธะไม่อิ่มตัวในสายโซ่เพียง

1 ตำแหน่งของสายโซ่คาร์บอนยาว 18 คาร์บอนเท่านั้น อีกทั้งพันธะไม่อิ่มตัวที่หลงเหลืออยู่ 1 ตำแหน่งนั้น ยังพบว่าหากเป็นคาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะไม่อิ่มตัว 1 ตำแหน่งแบบซิส (*cis*-C18:1) จะพบว่าส่งผลดีต่อคุณภาพของน้ำมันด้านการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าพันธะไม่อิ่มตัวแบบทรานส์ สาเหตุเนื่องมาจากจุดหลอมเหลวของไบโอดีเซลชนิด คาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะไม่อิ่มตัว 1 ตำแหน่งแบบทรานส์ (*trans*-C18:1) เท่ากับ 9.9°C ในขณะที่จุดหลอมเหลวของไบโอดีเซลชนิด คาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะไม่อิ่มตัว 1 ตำแหน่งแบบซิส (*cis*-C18:1) เท่ากับ -20.2°C (Iida et al., 2015) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าหากที่อุณหภูมิต่ำ คาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะไม่อิ่มตัว 1 ตำแหน่งแบบซิส (*cis*-C18:1) จะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ ทำให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำกับเครื่องยนต์ดีเซลได้อย่างไม่ขัดข้อง อีกทั้งไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการไฮโดรจิเนชันบางส่วนที่ได้ เป็นการปรับปรุงข้อจำกัดของไบโอดีเซลในด้านเสถียรภาพในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศต่ำ ทำให้มีเสถียรภาพด้านการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้เพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้สามารถเก็บรักษาได้ระยะเวลา ยาวนานขึ้น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำมัน ดังนั้นโมเลกุลของไบโอดีเซลเป็น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการไฮโดรจิเนชันบางส่วน มีคุณภาพดีกว่าไบโอดีเซลที่ใช้ในท้องตลาด และสามารถผ่านทุกมาตรฐานไบโอดีเซลสากล รวมทั้งมาตรฐาน World Wide Fuel Charter (WWFC) ด้วย

ในด้านของตัวเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยา และยังมีส่วนสำคัญต่อการเลือกเกิดปฏิกิริยาและปริมาณขององค์ประกอบที่อยู่ในผลิตภัณฑ์อีกด้วย จากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า การเลือกใช้โลหะเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและการเลือกชนิดของตัวรองรับ ล้วนมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณขององค์ประกอบสารที่ได้ โดยมีงานวิจัยของคุณ Thunyaratchatanon และคณะ (Thunyaratchatanon et al., 2016a) ได้ทำการศึกษาการทำไฮโดรจิเนชันบางส่วนโดยใช้ชนิดของโลหะที่แตกต่างกัน และมีการเติมโลหะแมกนีเซียมเพื่อศึกษาการเลือกเกิดพันธะคู่แบบซิส และแบบทรานส์ โดยใช้โลหะแพลทินัม โลหะแพลเลเดียม และโลหะนิกเกิล พบว่าการใช้โลหะแพลเลเดียมทำให้มีค่าความสามารถในการกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาได้สูงที่สุด รองลงมาเป็นโลหะแพลทินัม และน้อยที่สุดคือโลหะนิกเกิล แต่พบว่าการใช้โลหะแพลเลเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหลังไฮโดรจิเนชันบางส่วน จะให้ปริมาณของคาร์บอน 18 อะตอม ที่มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่งแบบทรานส์มากที่สุด และการใช้โลหะแพลทินัมก็ยังสามารถให้ปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอน 18 อะตอมที่เป็นแบบไม่อิ่มตัวมากที่สุด ล้วนเป็นองค์ประกอบที่ไม่ดีต่อสมบัติไบโอดีเซล ดังนั้นจึงเป็นที่มาในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้โลหะนิกเกิล เนื่องจากมีราคาถูกกว่าโลหะชนิดอื่น อีกทั้งเมื่อ

เปรียบเทียบที่สภาวะในการทดลองเดียวกันกับโลหะชนิดอื่น โลหะนิกเกิลสามารถให้อ่งค์ประกอบของไบโอดีเซลในปริมาณที่เหมาะสมได้ ในส่วนของการเลือกชนิดของตัวรองรับในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้ตัวรองรับคาร์บอน ซึ่งใช้ขั้นตอนในการสังเคราะห์ตัวรองรับคาร์บอนตามหลักการสังเคราะห์ผลึกสารประกอบด้วยสารละลายน้ำภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง (hydrothermal) โดยใช้อนุพันธ์ของน้ำตาล คือ ดี-ไซโลส เป็นสารตั้งต้นละลายกับน้ำปราศจากไอออน เช่นคุณ (Tran et al., 2016) ได้ทำการทดลองสังเคราะห์ตัวรองรับคาร์บอนเป็นลักษณะทรงกลม ซึ่งสาเหตุที่ใช้คาร์บอนเป็นตัวรองรับเนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ง่าย ราคาไม่แพง อีกทั้งยังมีเสถียรภาพทางด้านการใช้งาน คือ มีความแข็งแรงและทนต่ออุณหภูมิสูงที่ตีอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาการไฮโดรจีเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอน
- 2) ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาฐานนิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอน และวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

ได้ไบโอดีเซลที่ผ่านการไฮโดรจีเนชันบางส่วนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอน

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก นอกเหนือจากดีเซลที่ผลิตได้จากแหล่งปิโตรเลียมซึ่งมีแนวโน้มที่จะไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้งานเนื่องจากปริมาณประชากรในปัจจุบันที่เพิ่มมากขึ้นทุกวัน ไบโอดีเซลเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น ไขมันสัตว์ น้ำมันพืช และสาหร่าย เป็นต้น ซึ่งนำทรัพยากรดังกล่าวเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์มาผ่านกระบวนการเคมีเรียกว่า ทรานเอสเตอริฟิเคชัน (transesterification) (Faried et al., 2017) กระบวนการทรานเอสเตอริฟิเคชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ชนิดเอทานอล (ethanol) หรือเมทานอล (methanol) และใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประเภทเอสเทอร์ (ester) และมีผลพลอยได้คือกลีเซอรอล (glycerol) ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล ดังแสดงในรูปที่ 2.2

2.1.1 การผลิตไบโอดีเซล

ปัจจุบันการผลิตไบโอดีเซลแบ่งออกเป็น 4 วิธีหลักๆ คือ

2.1.1.1 การผลิตแบบกะ (batch process)

เป็นกระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง การผลิตแต่ละครั้งให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ไม่มาก ซึ่งในการผลิตเชิงพาณิชย์ต้องใช้เครื่องผลิตขนาดใหญ่มาก และควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สม่ำเสมอ จุดเด่นของการผลิต คือ ใช้เงินลงทุนไม่มาก เหมาะกับการผลิตปริมาณไม่มาก จุดด้อยคือ ระบบการผลิตต้องใช้พื้นที่มาก และน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการผลิตแต่ละรอบมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ

2.1.1.2 การผลิตแบบต่อเนื่อง (continuous process)

จุดเด่น คือ น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้มีคุณภาพสม่ำเสมอกว่า ให้กำลังผลิตมากกว่า จุดด้อยคือ ใช้เงินลงทุนสูงกว่าการผลิตแบบกะ (batch process) นอกจากนี้ยังมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตโดยพัฒนาแต่ละส่วนของกระบวนการอย่าง การใช้ความร้อนจากแหล่งอื่น เช่น คลื่นไมโครเวฟ คลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic) หรือการเพิ่มหน่วยแยกน้ำมันไบโอดีเซลและกลีเซอริน

โดยใช้อุปกรณ์ปั่นเหวี่ยงเพื่อลดเวลาแยก และทำให้เกิดความต่อเนื่องในกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามการเพิ่มเครื่องจักรหรืออุปกรณ์เสริมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพมีผลให้ต้องใช้เงินทุนมากขึ้น จึงยังไม่มีการใช้ในระดับอุตสาหกรรม (บุญรักษ์, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

2.1.1.3 แบบต่อเนื่อง 2 ขั้นตอน (2 step reaction)

เป็นกระบวนการที่สามารถใช้ได้กับวัตถุดิบหลายชนิด รวมถึงน้ำมันที่กรดไขมันอิสระสูง โดยการทำ ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในขั้นแรก และผ่านกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันซ้ำ ทำให้ได้ผลผลิตที่มากกว่า 2 ประเภทแรก แต่อย่างไรก็ตาม เงินลงทุนก็สูงขึ้นเช่นกัน

2.1.1.4 ไมโครเวฟเทคโนโลยี (microwave technology)

เป็นกระบวนการผลิตที่สามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น ด้วยการใช้คลื่นไมโครเวฟ และใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย อย่างไรก็ตามปัจจุบันยังคงมีเฉพาะ pilot plant และใช้เงินทุนสูงมาก (บางจาก, 2556)

2.1.2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

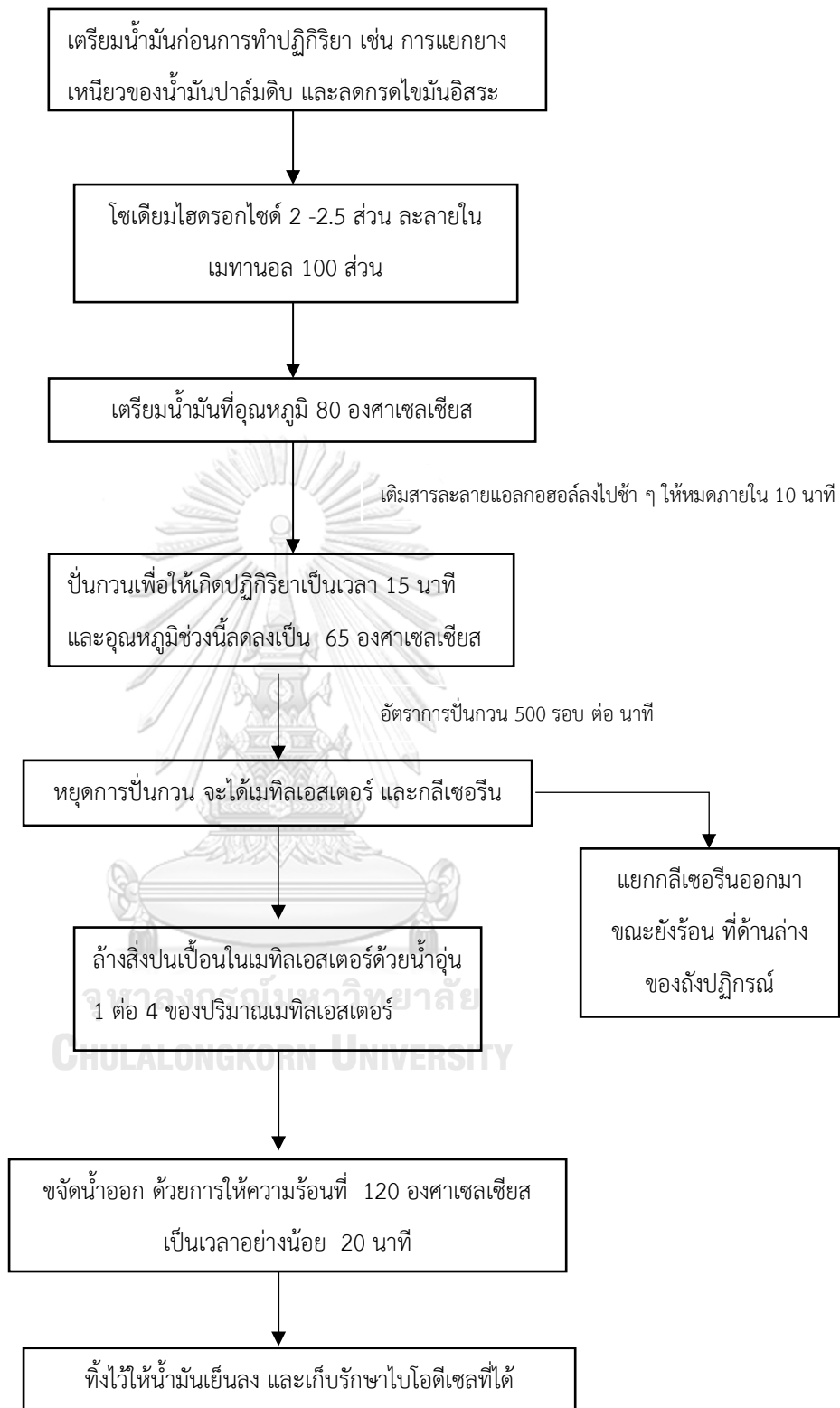
ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

2.1.2.1 นำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ มาผสมกับเมทิลแอลกอฮอล์หรือเอทิลแอลกอฮอล์ และใช้สารเร่งปฏิกิริยาประเภทกรดหรือด่าง เช่น กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) เป็นต้น

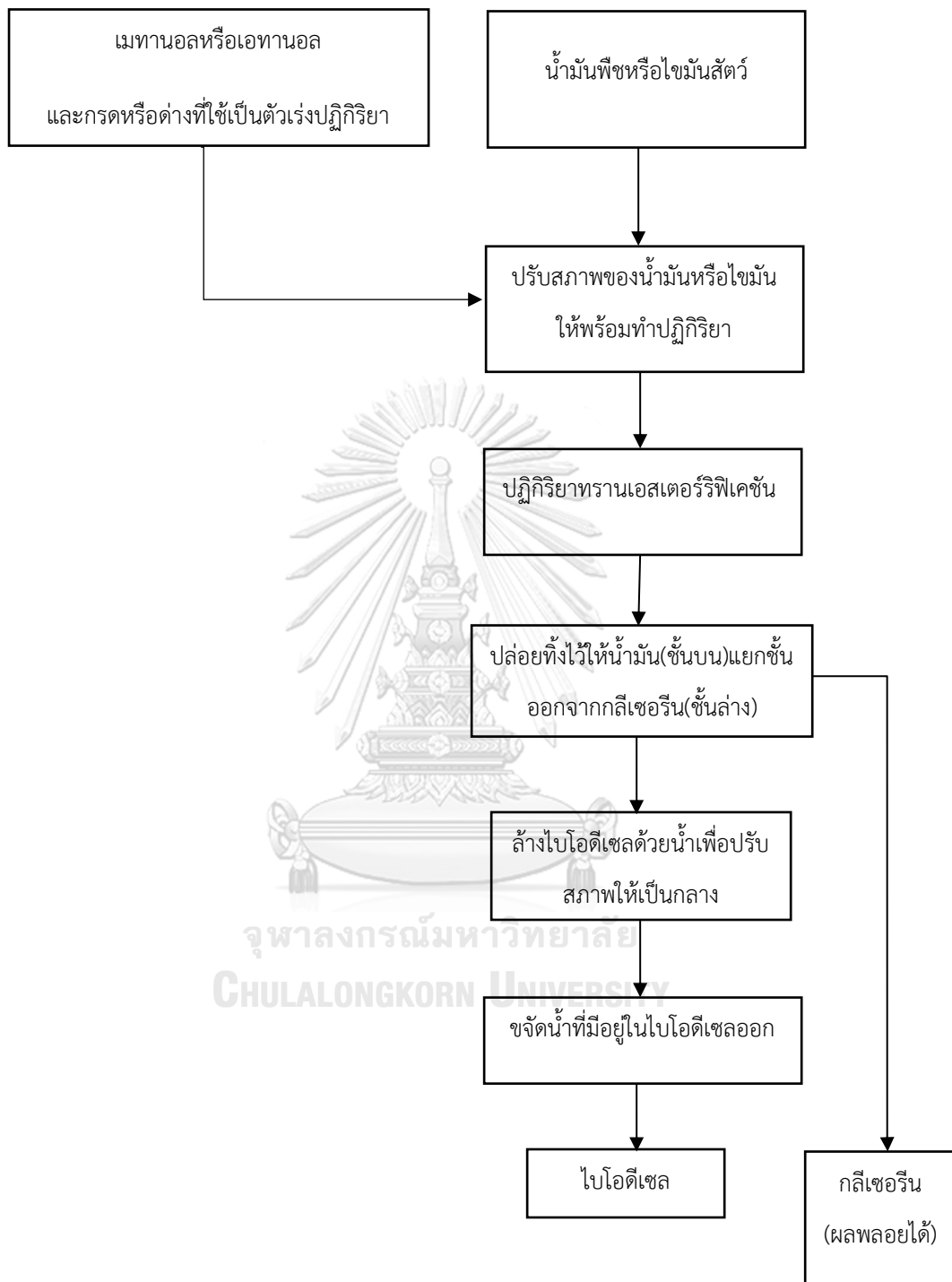
2.1.2.2 บ้อนของเหลวเข้าในถังปฏิกรณ์ กวนให้ส่วนผสมทำปฏิกิริยากัน โดยกระบวนการผลิตที่ใช้กรดเป็นสารเร่งปฏิกิริยาจะทำให้อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเกิน 3 ชั่วโมง แต่สำหรับกระบวนการผลิตที่ใช้ด่างเป็นสารเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิของกระบวนการผลิตจะอยู่ระหว่าง 50-70 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเกิน 1 ชั่วโมง ขั้นตอนนี้จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นของผสมระหว่างน้ำมันไบโอดีเซลกับกลีเซอริน (glycerine) และมีแอลกอฮอล์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยารวมอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.1.2.3 แยกน้ำมันไบโอดีเซล และกลีเซอรินออกจากกัน โดยทิ้งให้ของผสมเกิดการแยกชั้นน้ำมันไบโอดีเซลที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าจะแยกอยู่ชั้นบน ส่วนกลีเซอรินจะอยู่ชั้นล่าง

2.1.2.4 น้ำมันไบโอดีเซลที่แยกออกมาจะถูกนำมาล้างน้ำเพื่อชะล้างแอลกอฮอล์ สารเร่งปฏิกิริยา สิ่งปนเปื้อน และทำให้น้ำมันมีสภาพเป็นกลาง จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ให้ครบตามมาตรฐาน (บุญรักษ์, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชันของไปโอดีเซล



รูปที่ 2.2 วิธีการสังเคราะห์ไบโอดีเซล

2.1.3 คุณสมบัติของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นผลผลิตที่ได้จากน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการทางเคมี ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม ไบโอดีเซลยังมีโครงสร้างที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซลอยู่เล็กน้อยจึงส่งผลให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล มีทั้งคุณสมบัติที่ดีกว่าและคุณสมบัติที่ด้อยกว่าน้ำมันดีเซล เมื่อเปรียบเทียบไบโอดีเซลและดีเซล มีข้อแตกต่าง เช่น ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงมีความปลอดภัยมากกว่าในทางการขนส่ง เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วสามารถเปรียบเทียบสมบัติของไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลได้ดังนี้

2.1.3.1 ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ได้ดีกว่าน้ำมันดีเซล จึงช่วยให้ลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ได้ดีกว่า และเนื่องจากน้ำมันพืชที่ได้จากพืชที่ต่างชนิดกัน จะให้ความแตกต่างทางด้านองค์ประกอบของสารไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันอยู่ในโครงสร้าง ทำให้คุณสมบัติของน้ำมัน ทั้งทางเคมีและทางกายภาพเป็นไปตามกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ ดังนั้นไบโอดีเซลที่ผลิตได้นั้นจะมีคุณสมบัติตามกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของพืชแต่ละชนิดด้วย

2.1.3.2 ไบโอดีเซลมีค่าจุดวาบไฟที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงมีค่าจุดระเบิดในเครื่องยนต์ต่ำ

2.1.3.3 ไบโอดีเซลมีพันธะคู่อยู่ในน้ำมันพืช ซึ่งแตกต่างกันตามชนิดของน้ำมันพืช จึงเป็นผลให้ให้เกิดการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือไม่เสถียรตัวน้อยกว่าน้ำมันดีเซลนั่นเอง ในขณะที่น้ำมันดีเซลไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุล จึงไม่เกิดปัญหานี้ ทำให้มีระยะเวลาในการเก็บรักษาได้นานกว่าไบโอดีเซล

2.1.3.4 ไบโอดีเซลไม่มีองค์ประกอบของกำมะถัน ซึ่งต่างจากน้ำมันดีเซล ซึ่งปัญหาของการมีกำมะถันในองค์ประกอบของน้ำมันที่ใช้ในเครื่องยนต์บนท้องถนนหรือเครื่องยนต์อื่นๆ จะทำให้เกิดเป็นมลพิษทางอากาศ เมื่อโดนฝนชะล้าง มลพิษเหล่านี้จะทำให้กลายเป็นฝนกรด

2.1.3.5 โครงสร้างของไบโอดีเซลไม่มีองค์ประกอบของสารประกอบอะโรมาติกคาร์บอน (aromatic compound) และมีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้าง ทำให้เมื่อใช้งาน ไบโอดีเซล จะเกิดละอองฝุ่นขนาดเล็ก และมีควันดำที่น้อยกว่าการใช้งานน้ำมันดีเซล

2.1.4 คุณภาพของไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์

2.1.4.1 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์

ปริมาณเมทิลเอสเตอร์บ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลและการเกิดปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลที่สมบูรณ์ มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 96.5 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณเอสเทอร์น้อยกว่าที่กำหนด ชี้บอกลังยังมีโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ หรือไตรกลีเซอไรด์อยู่ในไบโอดีเซลปริมาณสูงกว่าที่กำหนด ส่งผลให้ไบโอดีเซลมีความหนืดสูง และเป็นผลให้เกิดการอุดตันในหัวฉีด หรือกระบอกสูบของเครื่องยนต์

2.1.4.2 ความหนืด

ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งเกี่ยวข้องกับกำไลด การฉีดเป็นฝอยของหัวฉีดในห้องเผาไหม้ การฉีดเป็นฝอยขนาดเล็กจะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ ความหนืดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบ ความหนืดยังเป็นดัชนีแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกด้วย

2.1.4.3 ความหนาแน่น

ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบระบบหัวจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ค่าความหนาแน่นเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง เมื่อค่าความหนาแน่นมีค่ามากก็จะให้พลังงานความร้อนมากขึ้นตามไปด้วยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณเดียวกัน ความหนาแน่นของไบโอดีเซลจากวัตถุดิบน้ำมันพืชแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้มีปริมาณเมทานอลที่ตกค้างในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำอีกด้วย

2.1.4.4 ปริมาณกำมะถัน

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ เนื่องจากน้ำมันพืชที่ใช้ในการผลิตมักมีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำกว่า 15 ส่วนในล้านส่วน องค์ประกอบกำมะถันในน้ำมันเมื่อถูกเผาไหม้จะเปลี่ยนเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งถูกปล่อยออกมาพร้อมไอเสียจากเครื่องยนต์ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.1.4.5 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นสารที่ปนเปื้อนอยู่ในวัตถุดิบน้ำมันพืชตั้งแต่เริ่มต้น หากไม่ทำการกำจัดออกจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีฟอสฟอรัสปะปนอยู่ด้วยซึ่งจะทำให้

ให้เกิดความเสียหายให้กับอุปกรณ์คะตะไลติกส์คอนเวอร์เตอร์ (Catalyst converter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการแพร่มลพิษจากการที่มาตรฐานของการแพร่มลพิษเป็นกฎข้อบังคับมากขึ้น อุปกรณ์คะตะไลติกส์ คอนเวอร์เตอร์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในไบโอดีเซล

2.1.4.6 โมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์

โมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์แสดงถึงความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลปริมาณโมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ส่งผลให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีดกระบอกสูบและวาล์วภายในเครื่องยนต์

2.1.4.7 กลีเซอรินอิสระ

ปริมาณกลีเซอรินที่ยังหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลเนื่องมาจากการแยกกลีเซอรินไม่สมบูรณ์ทำให้มีปัญหาการแยกชั้นของกลีเซอรินในการจัดเก็บไบโอดีเซลรวมถึงการสะสมที่บริเวณด้านล่างของถังน้ำมัน กลีเซอรินมีผลต่อการอุดตันที่หัวฉีดและระบบลำเลียงน้ำมัน

2.1.4.8 กลีเซอรินทั้งหมด

ปริมาณกลีเซอรินทั้งหมดคือปริมาณกลีเซอรินอิสระและปริมาณกลีเซอรินในโมเลกุลโมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่เจือปนในองค์ประกอบไบโอดีเซลซึ่งเป็นผลมาจากเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ ก่อให้เกิดการอุดตันที่บริเวณหัวฉีดและไส้กรองและปัญหาใช้งานในสภาพอากาศที่เย็น

2.1.4.9 กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น)

ปริมาณกากถ่านมีความสัมพันธ์กับปริมาณกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ สบู่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล หากมีปริมาณกากถ่านสูงกว่าข้อกำหนด ชี้บอกลังว่ายังคงมีสารต่างๆที่กล่าวข้างต้นหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลนอกจากนั้นยังแสดงถึงแนวโน้มของปริมาณกากถ่านที่เหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ กากถ่านมีผลต่อการอุดตันในหัวฉีดหรือลูกสูบ ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง เครื่องยนต์สกปรกและต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องบ่อยครั้ง

2.1.4.10 เถ้าซิลิเกต

ปริมาณเถ้าซิลิเกตมีผลต่อการอุดตันในเครื่องยนต์ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการตกค้างของสบู่และตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1.4.11 น้ำ

ปริมาณน้ำในน้ำมันทำให้การเผาไหม้ไม่ดี นอกจากนั้น น้ำในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติก ระหว่างน้ำกับเอสเทอร์ เกิดเป็นไขมันอิสระ ซึ่งส่งผลต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ และเป็นตัวเร่งให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเก็บน้ำมัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หัวฉีดอุดตัน

2.1.4.12 สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด

สารปนเปื้อนในไบโอดีเซลส่วนใหญ่มาจากกระบวนการทรานเอสเตอริฟิเคชัน และปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสบู่ของกรดไขมันอิสระและตัวเร่งปฏิกิริยาเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารที่ไม่ทำปฏิกิริยา ได้แก่ ไขมันที่ไม่อยู่ในรูปของกลีเซอไรด์, กรดไขมันอิสระ, สารประกอบไฮโดรคาร์บอน, แอลกอฮอล์อย่างแข็ง, สารประกอบแคโรทีน, วิตามิน และอื่นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุดิบน้ำมันพืชเริ่มต้นโดยทั่วไปสิ่งปนเปื้อนทั้งหมดจะถูกกำจัดออกจากไบโอดีเซลในขั้นตอนการล้างน้ำ สิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลมีผลเสียต่อเครื่องยนต์หลายด้าน เช่น คุณสมบัติด้านความเสถียรของไบโอดีเซลระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากสารประกอบของสารที่ไม่สะaponิฟาย เปลี่ยนสภาพเป็นสารที่มีผลในการลดคุณสมบัติด้านความเสถียรของไบโอดีเซล

2.1.4.13 การกัดกร่อนแผ่นทองแดง

การกัดกร่อนแผ่นทองแดงแสดงการกัดกร่อนของน้ำมันต่อโลหะที่ใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ดีเซลเนื่องจากปริมาณกรด เช่น กรดไขมันอิสระ และสารประกอบซัลเฟอร์ในน้ำมัน ซึ่งค่าการกัดกร่อนนี้มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์

2.1.4.14 กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์

แสดงถึงพันธะคู่หรือความไม่อิ่มตัวของไบโอดีเซล ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดพอลิ-เมอร์ในเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการอุดตัน และการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง ปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เลือกมาใช้เป็นวัตถุดิบ

2.1.4.15 ค่าของกรด

แสดงความเป็นกรดในไบโอดีเซล เป็นผลมาจากปริมาณกรดไขมันไขมันอิสระในวัตถุดิบน้ำมันพืชและปริมาณกรดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีผลต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ทำให้อายุการใช้งานของปั๊ม และไส้กรองน้ำมันลดลง นอกจากนี้ยังแสดงถึงการเสื่อมสภาพของน้ำมันเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกจากปริมาณของน้ำที่ปนอยู่ในน้ำมันและผลของสภาวะในการจัดเก็บ

2.1.4.16 ค่าไอโอดีน

ค่าไอโอดีนแสดงพันธะคู่ในน้ำมัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ค่าไอโอดีนต่ำแสดงถึงการมีสัดส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัวในโครงสร้างไบโอดีเซลสูง ทำให้มีแนวโน้มในการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้ ค่าไอโอดีนยังมีความสัมพันธ์กับจุดขุ่น ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มเกิดไข หรือจับตัวเป็นก้อนแข็ง ไบโอดีเซลที่มีค่าไอโอดีนต่ำจะมีจุดขุ่นสูง ซึ่งมีผลต่อการใช้งานสภาพอากาศที่เย็น ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบมีค่าไอโอดีน 50-55 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน กำหนดให้ ค่าไอโอดีนไม่สูงกว่า 120 กรัมไอโอดีน/100 กรัม

2.1.4.17 เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากการเกิดสารประเภทเพอร์ออกไซด์(peroxide linkage) ขึ้นระหว่างพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ที่อยู่ในโครงสร้างของไบโอดีเซล ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ โดยที่ความร้อนและแสงแดดมีผลช่วยเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่โลหะ เช่น ทองแดง และตะกั่ว ก็เป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น ผลของปฏิกิริยาทำให้เกิดพอลิเมอร์ (oxidation polymerization) และเกิดของแข็งที่ไม่ละลายในไบโอดีเซล เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากจะขึ้นกับประเภทและคุณสมบัติของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบแล้ว ยังขึ้นกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลอีกด้วย โดยกระบวนการผลิตที่มีการให้ความร้อนสูงแก่ ไบโอดีเซลเป็นระยะเวลาานาน อาจส่งผลให้เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดให้มีค่าสูงกว่า 6 ชั่วโมง ที่ 110 องศาเซลเซียส

2.1.4.18 เมทานอล

เมทานอลเป็นสารตั้งต้นที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกให้ก่อนนำไบโอดีเซลออกจำหน่าย จึงต้องมีปริมาณต่ำในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล จุดวาบไฟขั้นต่ำของไบโอดีเซล คือ 130 องศาเซลเซียส เมทานอลมีค่าจุดวาบไฟต่ำ ถ้ายังมีเมทานอลปะปนในไบโอดีเซลก็จะทำให้ไบโอดีเซลเสถียรจุดวาบไฟต่ำลงด้วย ซึ่งมีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษา การขนส่ง และการนำมาใช้ในเครื่องยนต์ เมทานอลมีค่าความเข้มข้นมากกว่า 5% จะมีผลกระทบต่อค่าซีเทนและความหล่อลื่นของน้ำมัน

2.1.4.19 โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม), โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม)

เป็นการวัดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบส สบู่ และโลหะหนักจากน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลที่หลงเหลือในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล แคลเซียมยังมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีสำหรับกระบวนการพอลิเมอร์ไรต์ของเอสเทอร์อีกด้วย ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลตามประกาศกรมธุรกิจพลังงานกำหนดให้ ปริมาณโลหะกลุ่ม 1 และโลหะกลุ่ม 2 ไม่สูงกว่าอย่างละ 5.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

2.1.4.20 จุดวาบไฟ

จุดวาบไฟเป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดเมื่อเปลวไฟผ่านเหนือไอของน้ำมัน แล้วทำให้น้ำมันติดไฟ มาตรฐานกำหนดให้มีค่าจุดวาบไฟมากกว่า 120 องศาเซลเซียส ปริมาณเมทานอลที่หลงเหลือในไบโอดีเซลทำให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานได้ จุดวาบไฟมีผลต่อการขนส่ง เคลื่อนย้าย และการจัดเก็บ ปริมาณ เมทานอลที่ยังคงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณมากกว่า 0.2% ส่งผลให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก ค คุณสมบัติไบโอดีเซล, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์)

2.2 นิกเกิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรต

ชื่อทางเคมี : นิกเกิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรต

สูตรโมเลกุลทางเคมี : $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ สูตรโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.3

น้ำหนักโมเลกุล : 290.81 กรัม/โมล

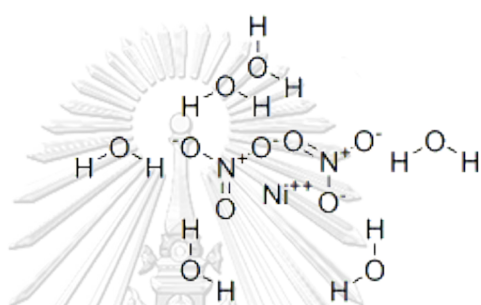
ลักษณะทางกายภาพ : ผลึกเชิงเดี่ยวสีเขียวสามารถละลายน้ำและเมทานอลได้

ลักษณะทางเคมี : จุดหลอมเหลวที่ 56.7 องศาเซลเซียส, จุดเดือด 137 องศาเซลเซียส และมี ความหนาแน่นเท่ากับ 2.05 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ค่าดัชนีรายการ (การวิเคราะห์) มีเนื้อหา $[\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ มากกว่า 98.5%

โซเดียม (Na)	: น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.01%
แมกนีเซียม (Mg)	: น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.01%
โพแทสเซียม (K)	: น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.005%
แคลเซียม (Ca)	: น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.01%
เหล็ก (Fe)	: น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.0005%
ทองแดง (Cu)	: น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.001%

สังกะสี (Zn)	: น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.005%
ตะกั่ว (Pb)	: น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.001%
โคบอลต์ (Co)	: น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.01%
ปริมาณน้ำที่ไม่ละลายน้ำ	: น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.005%
คลอไรด์ (Cl)	: น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.001%
ซัลเฟต (SO ₄)	: น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.005%



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของสารประกอบนิกเกิลไฮดรอกไซด์ไฮเดรต

2.2.1 การใช้งานนิกเกิลไฮดรอกไซด์ไฮเดรต

มีการใช้งานของนิกเกิลไฮดรอกไซด์ไฮเดรตในหลากหลายด้าน สามารถยกตัวอย่าง การใช้งานได้ดังนี้

- ใช้ชุบโลหะ ป้องกันการเกิดสนิม และช่วยให้มีผิวแวววาวมากขึ้น
- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมบางชนิด เช่น ใช้เร่งปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน กระบวนการผลิตน้ำมันพืช
- ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตโลหะผสมต่างๆสำหรับใช้งานในอุตสาหกรรม เช่น ใบพัด เรือขึ้นส่วนรถยนต์ เครื่องใช้ครัวเรือน และการผลิตท่อน้ำ เป็นต้น
- อิเล็กโทรดเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell electrodes)
- ใช้เป็นสารเคลือบผิวในอุตสาหกรรมเซรามิกส์
- ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตโลหะเพื่อใช้ในการประดับ
- ใช้เป็นส่วนผสมของโลหะ สำหรับการทำแม่เหล็ก

- ใช้เป็นส่วนผสมของน้ำมันเบนซิน
- ใช้เป็นส่วนผสมของหมึก และสี
- ใช้ผลิตเป็นฉนวนต้านทานไฟฟ้าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ

2.2.2 ความเป็นพิษของโลหะนิกเกิลจากสารประกอบนิกเกิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรต

ความเป็นพิษของนิกเกิลมักเกิดจากฝุ่นนิกเกิล และนิกเกิลคาร์บอนิลที่เกิดจากกระบวนการนิกเกิลบริสุทธิ์ รวมถึงนิกเกิลอิสระในรูปของประจุ +2 และสารประกอบของนิกเกิลอื่น ๆ ซึ่งสารประกอบของนิกเกิลสามารถทำให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์และสัตว์ได้ การสัมผัสกับนิกเกิลโดยตรงทั้งจากฝุ่น และนิกเกิลที่ละลายในน้ำจะทำให้เกิดอาการผื่นคันตามผิวหนัง รวมถึงการสัมผัสกับตาจะทำให้เกิดการระคายเคืองของเยื่อตา เกิดอาการแสบตา ตาแดง การสูดดมฝุ่นและไอระเหยของสารประกอบนิกเกิลยังเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดมะเร็งปอด และอาการระคายเคืองในระบบทางเดินหายใจ (สยามเคมี,2560)

2.3 แมกนีเซียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรต

ชื่อทางเคมี : แมกนีเซียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรต

สูตรโมเลกุลทางเคมี : $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ สูตรโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.4

น้ำหนักโมเลกุล : 256.41 กรัม/โมล

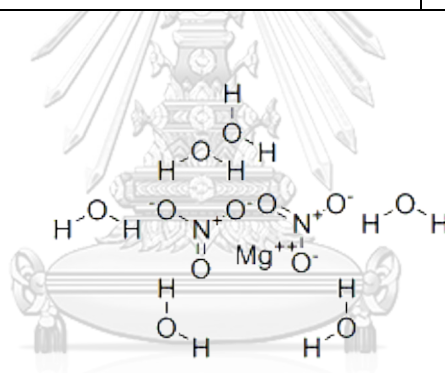
ลักษณะทางกายภาพ : ผลึกเชิงเดี่ยวใส ไม่มีสี สามารถละลายในน้ำและเอทานอล

ลักษณะทางเคมี : จุดหลอมเหลว 88.9 องศาเซลเซียส, จุดเดือด 330 องศาเซลเซียส (สลายตัว),และความหนาแน่นเท่ากับ 1.464 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ค่าดัชนีรายการ (การวิเคราะห์) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าดัชนีมาตรฐานของสารประกอบที่ใช้ในการวิเคราะห์

หลักดัชนี	ดัชนี
แมกนีเซียมไนเตรต[Mg (No3) 2 · 6H2O] % ≥	98.5
แมกนีเซียมออกไซด์เนื้อหา% ≥	15.0
ไนโตรเจนเนื้อหา% ≥	10.7
สารละลายปฏิกิริยา	ที่ผ่านการรับรอง
น้ำที่ไม่ละลายน้ำ% ≤	0.05
คลอไรด์% ≤	0.001
ซัลเฟต% ≤	0.02
Fe % ≤	0.001
โลหะหนัก% ≤	0.002
ค่าพีเอช	4.0-6.0



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสารประกอบแมกนีเซียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรต

2.3.1 การใช้งานแมกนีเซียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรต

ส่วนใหญ่ใช้จัดน้ำ, เป็นส่วนประกอบในการผลิตวัตถุระเบิด และตัวเร่งปฏิกิริยา

2.3.2 ความเป็นพิษของโลหะแมกนีเซียมจากสารประกอบแมกนีเซียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรต

หากได้รับปริมาณโลหะแมกนีเซียมในปริมาณมากจะทำให้มีผลต่อระบบหมุนเวียนโลหิต โดยทำให้ระบบหมุนเวียนโลหิตถูกทำลายได้ ผลกระทบต่อระบบผิวหนัง คือ อาจทำให้ระคายเคืองต่อผิวหนังเล็กน้อย และผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจคือทำลายระบบทางเดินหายใจหรือทำให้ทางเดินหายใจติดขัด

2.4 ดี-ไซโลส

ชื่อทางเคมี : ดี-ไซโลส (D-xylose)

สูตรโมเลกุลทางเคมี : $C_5H_{10}O_5$ สูตรโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.5

น้ำหนักโมเลกุล : 150.13 กรัม/โมล

ลักษณะทางกายภาพ : ผงสีขาว สามารถละลายน้ำร้อนและน้ำเย็น(water)

ลักษณะทางเคมี : จุดหลอมเหลว 144.5 องศาเซลเซียส สลายตัวได้ง่าย

ไซโลส(Xylose) เป็นน้ำตาลเพนโทสชนิดหนึ่งที่มีคาร์บอน 5 อะตอมและมีหมู่ฟังก์ชันคือ แอลดีไฮด์ เฮมิเซลลูโลส(Hemicellulose) คือพอลิแซคคาไรด์ของไซโลสที่สามารถพบได้ในธรรมชาติ ไซโลสถูกพบในเอมบริโอของพืชพอลิแซคคาไรด์ของไซโลส มีโครงสร้างใกล้เคียงกับเซลลูโลส ซึ่งประกอบไปด้วยไซโลส โดยพบในพืชจำพวก ชิงช้าวัตต์ เปลือกเมล็ดฝ้าย ฝางและเปลือกหอยนอกจากนี้ยังสามารถพบได้ในพอลิแซคคาไรด์ของเนื้อเยื่อเกี่ยวพันและบางครั้งพบในยูเรีย ดังนั้นไซโลสจึงมีส่วนเกี่ยวข้องในเส้นทางการสังเคราะห์ทางชีวภาพโดยส่วนใหญ่เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีประจุลบ (aps.plastic,2560)

2.4.1 กระบวนการสังเคราะห์ไซโลส

การเตรียมไซโลสจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสสามารถเตรียมได้ง่ายกว่าการสลายตัวของเซลลูโลสและไซโลส สามารถสกัดได้ง่ายด้วยกรดและกระบวนการอื่น ๆ ไซโลสถือเป็นผลิตภัณฑ์ทางอุตสาหกรรมที่สำคัญ โดยกระบวนการผลิตไซโลส มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1.1 กระบวนการปรับสภาพชิงช้าวัตต์ (Pretreatment of corncob)

กระบวนการกรอง: ล้างด้วยน้ำและผัดเพื่อเอาสิ่งเจือปนออกจากวัตถุดิบที่ต้องการ

การบดวัตถุดิบ: ปริมาณความชื้นของชิงช้าวัตต์ต้องต่ำกว่า 12.18% โดยชิงช้าวัตต์ที่ผ่านการบดจะต้องมีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 ไมโครเมตร การปรับสภาพด้วยน้ำ: ชิงช้าวัตต์ที่ถูกบดแล้วจะนำไปใส่ในหม้อต้มน้ำสแตนเลสและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที และกวนอย่างต่อเนื่องเพื่อกำจัดกัม(Gum) เพคติน เถ้าและสารเจือปนอื่น ๆ

2.4.1.2 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ชิงช้าวัตต์ที่ผ่านการปรับปรุงจะถูกใส่ในหม้อเพื่อทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยกระบวนการนี้มีอยู่ 2 แบบ คือ การเจือจางด้วยกรดไฮโดรไลซิสและการเจือจางด้วยกรดไฮโดรไลซิสความดันสูง ในกรดไฮโดรไลซิสความดันสูงมีความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกอยู่ 1.5-2.0% อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาประมาณ 100-105 องศาเซลเซียส ในกรดไฮโดรไลซิสความดันต่ำมีความเข้มข้นของกรดอยู่ 0.5-0.7% อุณหภูมิประมาณ 120-125 องศาเซลเซียส

2.4.1.3 การทำให้เป็นกลาง (Neutralization)

ในขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือการกำจัดกรดซัลฟูริก โดยทั่วไปมักนิยมใช้แคลเซียมคาร์บอเนต โดยสารที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสจะมีค่า pH อยู่ในช่วง 1.0-1.5 แต่เมื่อเติมสารปรับสภาพ(Neutralizing agent) ลงไป จะทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 2.8-3.0 ทำให้กรดซัลฟูริกที่เหลือมีความเข้มข้นลดลงเหลือเพียง 0.05-0.1% ในกรณีนี้สารละลายกรดอินทรีย์จะถูกกำจัดออกเมื่อค่า pH ของสารละลายเพิ่มถึง 4.0

2.4.1.4 การกำจัดสี (Decolorization)

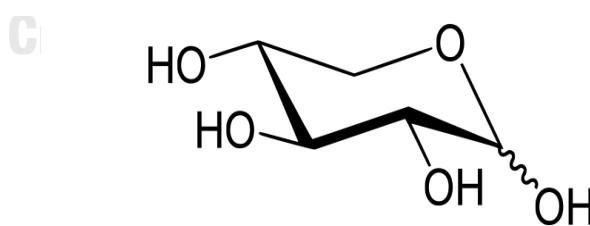
เป็นการกำจัดสีออกจากกระบวนการไฮโดรไลซิสโดยใช้สารฟอกขาว (Bleaching agent) ซึ่งได้แก่ คาร์บอน และ ลิกนินชนิดอื่นๆ โดยสารฟอกขาวเหล่านี้เมื่อใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลังจากผ่านการบำบัด

2.4.1.5 การทำสารละลายให้เข้มข้น (Concentration)

วัตถุประสงค์หลักของการทำน้ำเชื่อมเข้มข้นคือการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาล (ประมาณ 35-40%) นอกจากนี้การเติมสารตกตะกอนแคลเซียมซัลเฟตจะช่วยกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ในสารละลายด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน

2.4.1.6 การทำให้บริสุทธิ์ (Impurity) สารละลายน้ำตาลจะถูกทำให้เข้มข้นขึ้นด้วยการระเหย

2.4.1.7 การเกิดผลึก (Crystallization) การทำให้สารละลายเป็นผลึกไซโลส (aps.plastic,2560)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของไซโลส

2.4.2 การใช้ประโยชน์ของไซโลส

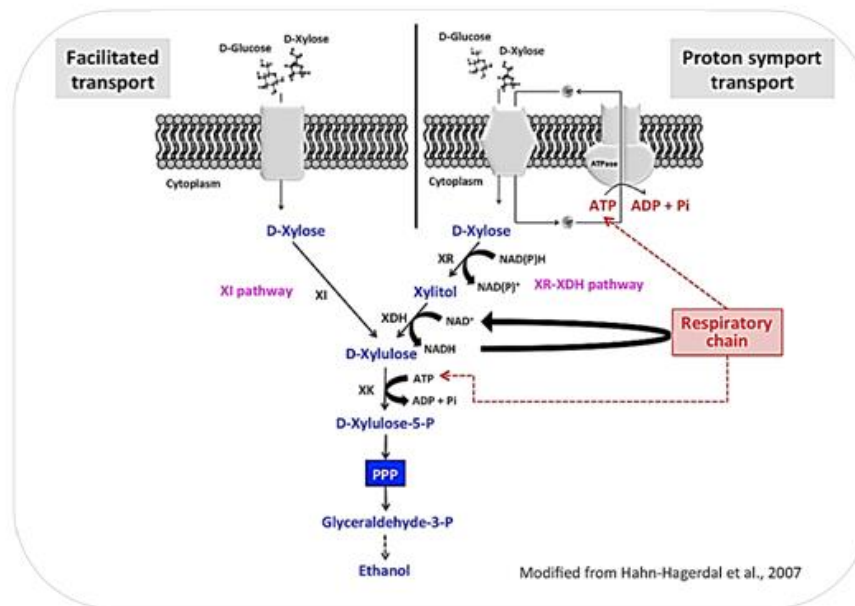
การประยุกต์ใช้งานไซโลสในอุตสาหกรรม

ไซโลสสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเอทานอลและนอกจากนี้ยังใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไซลิทอลซึ่งเป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาลโดยมีรายละเอียดดังนี้

2.4.2.1 การหมักเอทานอลออกจากน้ำตาลไซโลส (Bioethanol from xylose)

วิธีการหมักไซโลส

แบคทีเรีย ยีสต์และราบางสปีชีส์สามารถหมักไซโลส (Xylose) ไปเป็นเอทานอลได้โดยธรรมชาติ รูปที่ 2.6 แสดงกระบวนการเมตาบอลิซึมของการหมักไซโลสในแบคทีเรีย ยีสต์ และรา ไซโลสถูกเปลี่ยนไปเป็นไซลูโลส(Xylulose) และมีการเติมหมู่ฟอสเฟต (Phosphate) เร่งโดยเอนไซม์ไซลูโล-ไคเนส (Xylulokinase) ได้ไซลูโลส-5-ฟอสเฟต (xylulose-5-phosphate, X5P) หลังจากนั้น X5P จึงเข้าสู่วิถีเพนโทสฟอสเฟต (Pentose phosphate pathway, PPP) และถูกเมตาบอลิท์ต่อไปเป็นเอทานอล ในยีสต์ที่สามารถหมักไซโลสได้ส่วนใหญ่ เช่น *Pichiastipitis* และ *Candida shehatae* นั้น ไซโลสจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไซลูโลสโดยเอนไซม์ออกซิโดรีดักเตส (Oxidoreductase) 2 ชนิด นั่นคือ ไซโลสรีดักเตส (Xylose reductase, XR) และไซลิทอลดีไฮโดรจีเนส (Xylitol dehydrogenase, XDH) ซึ่งต้องใช้โคแฟกเตอร์ NAD(P)H และ NAD⁺ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ นั่นคือในขั้นตอนแรกไซโลสถูกรีดิวซ์ไปเป็นไซลิทอลโดยเอนไซม์ NAD(P)H-dependent XR ถัดจากนั้นไซลิทอลจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็นไซลูโลสด้วยเอนไซม์ NAD⁺ dependent XDH ดังรูปที่ 2.6 ในส่วนของแบคทีเรานั้นไซโลสถูกเมตาบอลิท์ไปเป็นไซลูโลสในหนึ่งขั้นตอนโดยเอนไซม์ ไอโซเมอเรส (isomerase) โดยไม่ต้องการโคแฟกเตอร์ ส่วนในเชื้อราเช่น *Piromyces* sp. นั้นมีรายงานว่าพบการทำงานของเอนไซม์ไอโซเมอเรส เอนไซม์ไอโซเมอเรสถูกทำบริสุทธิ์จากยีสต์ *Candida boidinii* ซึ่งสามารถเจริญโดยใช้เมทานอลได้



รูปที่ 2.6 วิธีการนำน้ำตาลไซโลสเข้าสู่เซลล์ และวิธีการหมักเอทานอลจากน้ำตาลไซโลส

การขนส่งไซโลส

การนำเข้าไซโลสโดยยีสต์ต้องการโปรตีนช่วยขนส่ง (Transport protein) การขนส่งนั้นแบ่งเป็น 2 แบบหลักๆ คือ แบบ Facilitated diffusion ซึ่งอาศัยหลักความต่างของความเข้มข้นของน้ำตาลเป็นแรงขับเคลื่อน และแบบ Proton symport ในเบเกอรี่ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* นั้น ไซโลสถูกนำเข้าสู่เซลล์โดยผ่านทาง Hexose transporter แบบ Facilitated diffusion ซึ่งมีความจำเพาะต่อไซโลสน้อยกว่ากลูโคส 10 ถึง 100 เท่า ดังนั้นการนำเข้าไซโลสโดยเซลล์จึงเกิดหลังจากกลูโคสถูกใช้หมดแล้ว ดังที่มีรายงานในรีคอมบิแนนท์ (*S. cerevisiae*)

ในยีสต์ที่หมักไซโลสได้โดยธรรมชาตินั้น ไซโลสสามารถที่จะถูกนำเข้าสู่โดยใช้ High affinity xylose transporter แบบ active transport อย่างไรก็ตามการนำเข้าไซโลสแบบนี้ต้องใช้ ATP 1 โมเลกุลสำหรับการนำเข้าไซโลส 1 โมเลกุล ดังนั้นภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนนั้น ATP จึงอาจไม่เพียงพอและหมดได้ ซึ่งจะมีผลต่อการเจริญด้วย ในยีสต์ที่หมักไซโลสได้โดยธรรมชาตินั้น ระบบการนำเข้าไซโลสจะแตกต่างกันตามสภาวะ อาทิเช่น *Kluyveromyces marxianus* จะใช้ระบบการนำเข้าของไซโลสทั้งสองแบบ คือ Facilitated และ Active transport ในสภาวะที่มีออกซิเจน แต่จะใช้แบบ Facilitated diffusion เพียงอย่างเดียวในสภาวะที่มีออกซิเจนน้อย *Candida succiphila* ใช้เพียง High-affinity transporter เมื่อเจริญในอาหารที่มีแค่ไซโลส ขณะที่ Low-affinity transporter จะถูกใช้ใน

อาหารที่มีกลูโคส *Spathasporapassalidarum* ก็มีการใช้ระบบการนำเข้าไซโลสแตกต่างกันเมื่อเจริญภายใต้สภาวะที่มีหรือไร้ออกซิเจน

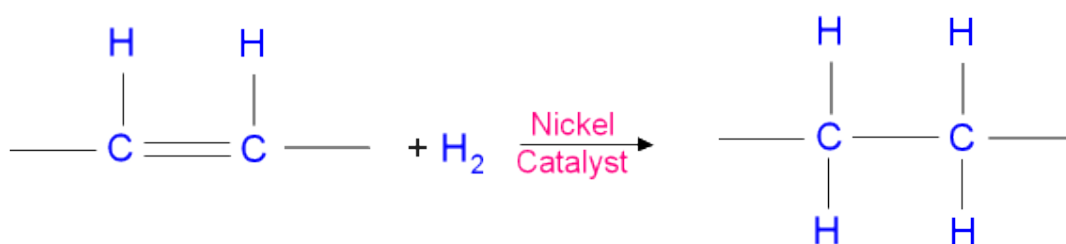
2.4.2.2 ยีสต์ที่หมักจากไซโลสด้วยวิธีธรรมชาติ

ยีสต์จำนวนมากสามารถเมตาบอลไลท์ไซโลสได้ แต่แค่ประมาณ 1% เท่านั้นที่สามารถหมักไซโลสไปเป็นเอทานอลได้ ยีสต์ที่มีความสามารถในการหมักไซโลสได้ เป็นที่รู้จักกันดีและทำการศึกษากันมาหลายทศวรรษก็คือ *Pichiastipites*, *Candida shehatae* และ *Pachysolentannophilus* ยีสต์เหล่านี้หมักไซโลสโดยวิถี XR-XDH ซึ่ง XR ส่วนใหญ่ใช้ NADPH เป็นโคแฟกเตอร์ แต่ XR จาก *P. stipitis* หรือ *P. tannophilus* สามารถใช้ได้ทั้ง NADPH และ NADH โดยมีความจำเพาะต่อ NADPH มากกว่า ตัวอย่างเช่น Van Vleet และ Jeffries (2009) ได้ทำการศึกษา XR ใน *P. stipitis* และพบว่าค่า K_m ของไซโลสต่อ NADH นั้นสูงกว่าต่อ NADPH ประมาณ 3-15 เท่า XDH โดยปกติใช้ NAD⁺ เป็นโคแฟกเตอร์ ดังนั้นปริมาณของ NAD⁺ ที่จำเป็นสำหรับกิจกรรมของเอนไซม์ XDH อาจไม่เพียงพอและเหมาะสมเนื่องจากว่า XR ชอบรีออกซิไดซ์ NADPH มากกว่า NADH ซึ่งการขาดแคลนของ NAD⁺ นั้นจะทำให้วิถี XR-XDH หยุดลง จึงส่งผลให้เกิดการสะสมของไซลิตอล (xylitol) ในสภาวะที่มีออกซิเจน NADH ที่เกิดจากเอนไซม์ XDH สามารถที่จะถูกรีออกซิไดซ์ได้โดยผ่านทางห่วงโซ่ของการหายใจโดยมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย การสะสมของไซลิตอลในสภาวะไร้ออกซิเจนนั้น สามารถลดได้โดยการควบคุมปริมาณการให้ออกซิเจนอย่างมีประสิทธิภาพ ถ้าออกซิเจนน้อยเกินไป ก็จะส่งผลยับยั้งการเจริญของยีสต์ และมีการสะสมไซลิตอล ถ้าให้ออกซิเจนมากเกินไป ปริมาณเอทานอลที่ได้ก็จะลดลง อย่างไรก็ตาม การกระทำดังกล่าวให้มีความแม่นยำนั้นต้องใช้ต้นทุนสูง และเป็นการยากในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

ในปี ค.ศ. 2006 นักวิจัยจากมหาวิทยาลัย Louisiana และ Oregon ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ค้นพบยีสต์สายพันธุ์ใหม่ *Spathasporapassalidarum* ซึ่งมีความสามารถในการหมักไซโลสได้ทั้งในสภาวะที่มีอากาศและไร้อากาศ เนื่องจากว่ามันมีเอนไซม์ XR ที่ชอบใช้ NADH เป็นโคแฟกเตอร์นั่นเอง จึงทำให้เกิดความสมดุลของรีดอกซ์ระหว่างเอนไซม์ XR และ XDH กล่าวคือ NADH ที่ได้จากการออกซิไดซ์ไซลิตอลของเอนไซม์ XDH ก็จะถูกนำกลับมาใช้ต่อโดยเอนไซม์ XR นั่นเอง ดังนั้น *S. passalidarum* จึงเป็นความหวังหนึ่งสำหรับการผลิตเอทานอลจากไซโลสในระดับอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม *S. passalidarum* นั้นไม่ค่อยทนทานต่อสารพิษต่างๆ ที่อาจจะได้ในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร หรือหลังจากการย่อยสลายให้กลายเป็นองค์ประกอบย่อย (aps.plastic,2560)

2.5 ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน

ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) บางครั้งเรียกว่า การยับยั้งการสลายตัว โดยการเพิ่มไฮโดรเจนให้กับโมเลกุล เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในโมเลกุลที่ไม่อิ่มตัวในสารอินทรีย์ คือมีพันธะคู่ที่อะตอมของคาร์บอน โดยอะตอมของไฮโดรเจน จะเข้าไปทำพันธะกับอะตอมของคาร์บอนจนเกิดพันธะเดี่ยวรอบๆ คาร์บอนครบ 4 พันธะ ดังแสดงปฏิกิริยาเคมีในรูปที่ 2.7 กระบวนการนี้มีประโยชน์ในด้านเภสัชศาสตร์และในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี นอกจากนี้กระบวนการไฮโดรจิเนชันยังสามารถเปลี่ยนกรดไขมันไม่อิ่มตัวให้กลายเป็นกรดไขมันอิ่มตัว ได้อีกด้วย แต่ในความเป็นจริงแล้ว กระบวนการนี้ก็ไม่ได้ทำได้อย่างสมบูรณ์มากนัก เนื่องจากในน้ำมันพืชมักมีกรดไขมันที่มีพันธะคู่มากกว่า 1 พันธะ แต่ก็สามารถลดจำนวนของพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนในกรดไขมันนั้นได้ เช่น ในการผลิตเนยเทียม สามารถนำน้ำมันพืชซึ่งเป็นของเหลวให้กลายเป็นของแข็งหรือกึ่งของแข็งได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพความอิ่มตัวของกรดไขมันนี้ มีผลทางกายภาพต่อกรดไขมัน เช่น ลดจุดหลอมเหลว เป็นต้น น้ำมันพืชที่ถูกทำให้อิ่มตัวนี้ได้ถูกใช้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในการอบขนมปัง เนื่องจากมีราคาไม่สูงมากนัก และยังมีคุณสมบัติที่ดีอื่นๆ อีก เช่น ทนต่อกระบวนการออกซิเดชัน ทำให้ไม่เน่าเสียง่าย อย่างไรก็ตาม กระบวนการไฮโดรจิเนชันที่ไม่สมบูรณ์นี้ก่อให้เกิดความแตกต่างของอะตอมคาร์บอนที่ยังเหลือพันธะคู่อยู่ โดยในธรรมชาติ อะตอมของไฮโดรเจนที่อยู่บริเวณพันธะคู่ของคาร์บอนมักจะอยู่ด้านเดียวกัน แต่กระบวนการนี้มักทำให้เกิดอะตอมของไฮโดรเจนอยู่ตรงกันข้ามกัน โดยจำนวนไฮโดรเจนที่อยู่ตรงข้ามกันนั้นมีโอกาสเกิดขึ้นมากถึงสองเท่าของการที่ไฮโดรเจนสองอะตอมอยู่ข้างเดียวกันเลยทีเดียว ซึ่งนำไปสู่ความเสี่ยงต่อการเป็นโรคหัวใจได้ ทำให้สหรัฐและยุโรปได้มีกฎหมายให้แสดงจำนวนไฮโดรเจนที่อยู่ตรงข้ามกันในรายละเอียดของอาหารด้วย (wikipedia)



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบนพันธะคู่โดยใช้โลหะนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.5.1 ประโยชน์ของการทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน

ในอุตสาหกรรมอาหารมักใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยาโดยมีตัวเร่งเป็นโลหะ เช่น นิกเกิล ทองคำขาว หรือแพลเลเดียม โดยที่ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 150 - 180 องศาเซลเซียสภายใต้ความดันสูง กระบวนการไฮโดรจิเนชันเป็นกระบวนการที่คายพลังงาน ออกมา มาก ไฮโดรจิเนชันในน้ำมันพืชสามารถให้ความร้อนได้ถึง 25 กิโลแคลอรีต่อโมล เพียงพอที่จะเพิ่ม อุณหภูมิของน้ำมันได้หยาบละ 1.6 ถึง 1.7 องศาเซลเซียสเลยทีเดียว ซึ่งนิยมใช้ในอุตสาหกรรม อาหารประเภทไขมัน เช่น การทำเนยเทียม เนื่องจากสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตให้กับผู้ผลิต และช่วยยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์(wikipedia)

2.6 คาร์บอนทรงกลม



คาร์บอนทรงกลม (carbon sphere) เป็นวัสดุ 3 มิติ มีลักษณะเป็นผนังอะตอมสีดำ ดังแสดงในรูป ที่ 2.8 เป็นทรงกลมภายในตัน มีขนาดของอนุภาคอยู่ที่ 1-80 ไมครอน ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.3- 2.2 มีความแข็งแรง และมีน้ำหนักเบา มักมีการนำมาใช้งานในรูปแบบของวัสดุคอมโพสิต (composite material) เนื่องจากมีข้อดีในด้านการนำไฟฟ้า การนำความร้อน และปัจจัยอื่นๆ หรือ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถเตรียมคาร์บอน ทรงกลมได้โดยวิธีการให้ความร้อนและความดันสูงในสภาวะไร้อากาศ (hydrothermal) ความนิยมใน การใช้คาร์บอนเป็นองค์ประกอบในการทำตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจาก มีเสถียรภาพที่ดี มีขั้นตอนในการ เตรียมง่าย และมีความเป็นพิษต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น คาร์บอนทรงกลมมีหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl) และ หมู่แอลคีนิล(alkenyl) (Tran et al., 2016)



รูปที่ 2.8 คาร์บอนทรงกลม

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากในปัจจุบันมีปริมาณประชากรที่เพิ่มมากขึ้นทุกวัน เกี่ยวเนื่องในความต้องการใช้พลังงานและเชื้อเพลิงมากขึ้น อีกทั้งเชื้อเพลิงที่ได้จากฟอสซิลยังมีปริมาณที่ลดลงจนไม่เพียงพอที่จะรองรับตามปริมาณประชากร จึงได้มีพลังงานทางเลือกอื่น ๆ เพิ่มขึ้นมาอีกหลายทาง หนึ่งในทางเลือกที่ได้รับความนิยมใช้มาก เพื่อทดแทนหรือลดปริมาณการใช้งานของน้ำมันดีเซล คือ ไบโอดีเซล เนื่องจากสามารถผลิตได้จากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ และ สาหร่าย อีกทั้งไบโอดีเซลยังมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันไบโอดีเซล แต่เมื่อเปรียบเทียบการปลดปล่อยมลพิษ ไบโอดีเซลจะมีการปลดปล่อยมลพิษได้น้อยกว่าน้ำมันดีเซล ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยเพื่อพัฒนาและปรับปรุงข้อด้อยของไบโอดีเซลจำนวนมาก เนื่องด้วยแม้ว่าไบโอดีเซลจะมีข้อดีที่มากมายเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซล แต่ขณะเดียวกันก็มีสมบัติที่ด้อย ด้านการไหลเท ณ อุณหภูมิต่ำ (cold flow property) เพราะมักจะเกิดการอุดตันที่หัวฉีดจากการเกิดเป็นผลึกของน้ำมัน และความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (oxidative stability) ที่จะส่งผลเสียต่อสมบัติที่ดีอื่น ๆ ของไบโอดีเซล ณ ขณะการเก็บรักษา สาเหตุปัญหาด้านการไหลเท ณ อุณหภูมิต่ำ และค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยาออกซิเจน (Rasimoglu and Temur, 2014) เนื่องจากแหล่งที่ผลิตไบโอดีเซลนั้นก็คือน้ำมันจากพืชและไขมันจากสัตว์ จึงทำให้มีพันธะคู่อยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งปริมาณของพันธะคู่จะส่งผลกระทบต่อให้เกิดปัญหาหลักของไบโอดีเซลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

งานวิจัยมากมายจึงได้ทำการลดปริมาณพันธะคู่ให้อยู่ในรูปพันธะเดี่ยวหรืออิ่มตัว (Boonrod et al., 2016) แต่หากมีปริมาณอิ่มตัวมากเกินไป ก็ส่งผลไม่ดีต่อสมบัติไบโอดีเซลเช่นเดียวกัน จึงควรทำให้มีปริมาณของพันธะคู่และพันธะเดี่ยวในปริมาณที่เหมาะสม (Fernandez et al., 2007) โดยพบว่าปริมาณพันธะเดี่ยวหรืออิ่มตัวที่สูงในไบโอดีเซลจะทำให้สมบัติการไหลเท ณ อุณหภูมิต่ำไม่ดี คือจะเกิดเป็นผลึกไปอุดตันในเครื่องยนต์ได้ (Makareviciene et al., 2015) จึงมีงานวิจัยพบว่าการทำลดปริมาณของพันธะคู่ลงและเหลือพันธะคู่ 1 ตำแหน่งที่เป็นพันธะคู่แบบซิสในสายโซ่ (Thunyaratchatanon et al., 2016a) จะทำให้มีสมบัติทางด้านไหลเท ณ อุณหภูมิต่ำที่ดีขึ้น และทำให้ค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนดีขึ้น (Kumar, 2017) การทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลจึงเป็นทางเลือกในการปรับปรุงสมบัติที่ดีที่สุด

พบว่าหลังการทำไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลจะทำให้พันธะคู่ที่เหลืออยู่เปลี่ยนแปลงจากคาร์บอน 18 อะตอมที่มีพันธะคู่แบบซิส (*cis-isomer*) กลายเป็นพันธะคู่แบบทรานส์ (*trans-isomer*) เนื่องจากกลไกทางเทอร์โมไดนามิกส์เมื่อไบโอดีเซลได้รับความดันและอุณหภูมิที่สูงขึ้นจึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้า จึงเปลี่ยนพันธะคู่แบบซิสกลายเป็นแบบทรานส์เพราะพันธะคู่แบบทรานส์มีความเสถียรมากกว่าแบบซิส (Shin et al., 2013) งานวิจัยอื่น ก็เห็นพ้องไปทางเดียวกันว่า

ปัจจัยที่สำคัญในการทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วนและการเลือกเกิดพันธะคู่แบบซิสและแบบทรานส์คือสภาวะของการทดลอง ปฏิกิริยาที่ใช้อุณหภูมิสูงจะกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วนได้ดี และเกิดพันธะคู่แบบทรานส์ได้มากขึ้นอีกด้วย ซึ่งปริมาณคาร์บอน 18 อะตอมที่มีพันธะคู่แบบทรานส์ 1 ตำแหน่ง ที่เพิ่มมากขึ้น เป็นสิ่งที่ส่งผลให้การใช้งานที่อุณหภูมิต่ำไม่ดี เนื่องจากจุดหลอมเหลวของคาร์บอน 18 อะตอมที่มีพันธะคู่แบบทรานส์ 1 ตำแหน่ง มีจุดหลอมเหลวที่สูง อยู่ที่ 9.9 องศาเซลเซียส ในขณะที่จุดหลอมเหลวของคาร์บอน 18 อะตอมที่มีพันธะคู่แบบซิส 1 ตำแหน่ง อยู่ที่ -20.2 องศาเซลเซียส (Iida et al., 2015) ดังนั้นหลังจากทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วนแล้ว จะเกิดพันธะคู่ที่เหลืออยู่เป็นแบบทรานส์มากขึ้นในไบโอดีเซล แต่ก็สามารถลดปริมาณพันธะคู่แบบทรานส์ได้โดยใช้สภาวะความดันที่ 10 บาร์ และใช้อุณหภูมิต่ำที่ 100 องศาเซลเซียส (McArdle et al., 2011)

อีกทั้งยังมีงานวิจัยอีกหลายงาน รายงานว่าการใช้โลหะอัลคาไลน์เพื่อเป็นตัวเร่งสนับสนุน อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยส่วนน้อยที่ใช้ตัวเร่งสนับสนุนเพื่อลดปริมาณพันธะคู่แบบทรานส์ลง ซึ่งรายงานว่าการใช้ตัวเร่งสนับสนุนเพื่อปรับปรุงให้ความเป็นกรดของตั้งเร่งปฏิกิริยา โดยเมื่อหลายปีก่อน Tonetto และคณะ ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลที่ได้ น้ำมันดอกทานตะวันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลลาเดียมบนแกรมมาอะลูมินา และใช้ตัวเร่งสนับสนุนสองชนิด คือ เอทิลเบนโซเอต (ethyl benzoate) และ แมกนีเซียมไกลซิเนต (magnesium glycinate) พบว่าการใช้เอทิลเบนโซเอต (ethyl benzoate) เป็นตัวเร่งสนับสนุน จะทำให้การเกิดพันธะคู่แบบทรานส์มากขึ้น ในขณะที่การใช้ แมกนีเซียมไกลซิเนต (magnesium glycinate) เป็นตัวเร่งสนับสนุน จะทำให้ลดปริมาณการเกิดพันธะคู่แบบทรานส์ (Tonetto et al., 2009)

งานวิจัยเกี่ยวกับสมบัติของไบโอดีเซลที่เปลี่ยนไปหลังการเก็บรักษา เนื่องจากค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ (oxidative stability) ของไบโอดีเซลเมื่อยังไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพนั้นต่ำ เนื่องจากมีปริมาณของพันธะคู่อยู่มาก จึงทำให้ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Saluja et al., 2016) อีกทั้งพบว่า การมีโครงสร้างพันธะคู่แบบซิสจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายกว่าพันธะคู่แบบทรานส์ แต่การคอนจูเกตพันธะคู่แบบทรานส์จะง่ายต่อการถูกออกซิเดชันได้มากกว่าพันธะคู่คอนจูเกตแบบซิส (Kumar, 2017)

การศึกษการเลือกเกิดพันธะคู่แบบซิสและพันธะคู่แบบทรานส์ด้วยการเติมโลหะแมกนีเซียมเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสันับสนุน พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะที่ไม่ได้เติมโลหะแมกนีเซียม จะให้ปริมาณของคาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่งแบบทรานส์ และให้ปริมาณของคาร์บอน 18 อะตอม แบบอิมตัวสูง ซึ่งส่งผลไม่ดีต่อสมบัติการใช้งานด้านการไหลเท ณ อุณหภูมิต่ำ (Rasimoglu and Temur, 2014) แต่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเติมโลหะแมกนีเซียมเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

สนับสนุน พบว่าจะให้ปริมาณของคาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่งแบบซิส ซึ่งส่งผลดีต่อสมบัติการไหลเท ณ อุณหภูมิต่ำได้ดึ้นเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถลดปริมาณในการเกิดเป็นคาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่งแบบทรานส์ได้อีกด้วย (Thunyaratchatanon et al., 2016a)

การเพิ่มสมบัติความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนของไบโอดีเซล สามารถทำได้โดยเติมสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ เช่น 3,5-di-butyl-4-hydroxytoluene (BHT), butyl hydroxideamisol (BHA), pyrogallol (PY), tertbutylhydroxyquinone (TBHQ) และ propyl gallate (PG) เป็นต้น และพบว่าสารเติมแต่ง pyrogallol (PY) จะทำให้มีประสิทธิภาพด้านความเสถียรต่อสมบัติของไบโอดีเซลชนิดต่าง ๆ ได้ดีที่สุดในขณะที่ไบโอดีเซลดีเซลที่ได้จากน้ำมันปาล์ม การใช้สารเติมแต่ง tertbutylhydroxyquinone (TBHQ) จะทำให้สามารถป้องกันการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลได้ดีที่สุด อีกทั้งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในระหว่างการเก็บรักษาไบโอดีเซล สามารถทำได้โดยควบคุมความชื้น ปริมาณออกซิเจน และป้องกันการสัมผัสกับแสงแดด ซึ่งสิ่งเหล่านี้สามารถควบคุมได้ยาก หรือใช้สารเติมแต่งที่ต้านทานการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันผสมลงในไบโอดีเซลก็ได้ (Fabian Sierra-Cantor and Alberto Guerrero-Fajardo, 2017)

อีกหนึ่งทางเลือกในการปรับปรุงสมบัติด้านความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนของไบโอดีเซล สามารถใช้หลักการไฮโดรจิเนชันบางส่วนไบโอดีเซล เพื่อให้ได้กรดไขมันอิสระแบบมีพันธะคู่ 1 ตำแหน่งบนสายโซ่ (C18:1) จากกรดไขมันอิสระที่มีพันธะคู่หลายตำแหน่งบนสายโซ่ (C18:2 และ C18:3) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโลหะทรานสิชัน เช่น แพลเลเดียม (Pd), ทองแดง (Cu), โรเดียม (Rh) และนิกเกิล (Ni) (Fabian Sierra-Cantor and Alberto Guerrero-Fajardo, 2017)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้โดยทั่วไปของไฮโดรจิเนชันบางส่วนคือ โลหะนิกเกิล (Nickel) บนตัวรองรับซิลิกา (Silica) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะนิกเกิลมักใช้กันโดยทั่วไปในปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วนของน้ำมันพืช เนื่องจากราคาที่ถูกลงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตามการใช้โลหะนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก็ยังต้องใช้ในการควบคุมสภาวะต่าง ๆ มากมาย (Numwong et al., 2012a) เนื่องจากการใช้โลหะนิกเกิลนั้นทำให้ง่ายต่อการจัดเรียงตัวใหม่ของพันธะคู่แบบซิส ไปเป็นแบบทรานส์ได้ง่ายในระหว่างการดำเนินปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน (Wright et al., 2003) จากนั้นได้มีการใช้โลหะอื่น ๆ เช่น แพลเลเดียม (Palladium) และ แพลทินัม (Platinum) ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายแทนการใช้นิกเกิล (Nickel) เพราะมีความว่องไวมากกว่า (Thunyaratchatanon et al., 2016b) และใช้ในสภาวะที่ไม่รุนแรงนั่นเอง (Vasilioiu et al., 2014) มีงานวิจัยบางส่วนการใช้โลหะแพลทินัมแล้วพบว่าให้ปริมาณพันธะคู่แบบทรานส์ลดลง (McArdle et al., 2011)

มีการใช้ตัวรองรับเป็นซิลิกาไดออกไซด์ (Silica dioxide) ในหลากหลายปฏิกิริยารวมทั้งเพื่อไฮโดรจิเนชันบางส่วน เพราะมีพื้นที่ผิวสูง มีรูพรุนภายในที่ขนาดสม่ำเสมอจึงง่ายต่อการดูดซับและกระจายตัวของโลหะจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการรีดักชัน (reduction) สูง (Yang et al., 2013)

มีการศึกษาขนาดของรูพรุนของตัวรองรับซิลิกาไดออกไซด์ (Silica dioxide) ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นาโนเมตร, 5 นาโนเมตร, 30 นาโนเมตร และ 50 นาโนเมตร โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะแพลเลเดียม (Palladium) พบว่าขนาดรูพรุนของซิลิกาไดออกไซด์ (Silica dioxide) มีผลต่อการกระจายตัวและความสามารถในการสัมผัสกับตำแหน่งกัมมันต์ (active site) ของตัวเร่งปฏิกิริยากับไบโอดีเซล ผลคือขนาดรูพรุนที่มีขนาดที่พอดีกับอนุภาคของไบโอดีเซล ซึ่งก็คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเท่ากับ 10 นาโนเมตร จะทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างตำแหน่งกัมมันต์กับไบโอดีเซลเป็นเวลานานกว่า จึงเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนผัน (conversion) จากพันธะคู่แบบซิสไปเป็นแบบทรานส์ในระหว่างปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน นอกจากนั้นพบว่ารูพรุนที่มีขนาดใหญ่ เช่น เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 และ 50 นาโนเมตร มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่เกินไปที่จะทำให้ไบโอดีเซลจะสัมผัสกับตำแหน่งกัมมันต์ (active site) ได้น้อยลง จึงเป็นผลให้มีปริมาณพันธะคู่ 1 ตำแหน่งที่เป็นแบบทรานส์ได้ลดลง ดังนั้นขนาดรูพรุนของตัวรองรับที่มีขนาดเล็กที่สุดในงานนี้คือ 3 นาโนเมตร มีขนาดที่เล็กเกินไป จึงทำให้น้ำมันเข้าไปสัมผัสภายในรูพรุนได้ยากขึ้น จึงเป็นขนาดที่ให้ปริมาณคาร์บอน 18 คาร์บอนที่มีพันธะคู่แบบทรานส์ 1 ตำแหน่ง ได้น้อยที่สุด เรียงตามลำดับการให้ปริมาณคาร์บอน 18 คาร์บอนที่มีพันธะคู่แบบทรานส์ 1 ตำแหน่ง ได้ดังนี้ ขนาดรูพรุนของตัวรองรับ $10 > 30 > 50 > 3$ นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับจุดหลอมเหลวตั้งที่กล่าวไว้เบื้องต้น ว่า คาร์บอน 18 คาร์บอนที่มีพันธะคู่แบบทรานส์ 1 ตำแหน่ง มีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า คาร์บอน 18 อะตอมที่มีพันธะคู่แบบซิส 1 ตำแหน่ง (Numwong et al., 2012a, Numwong et al., 2012b)

กรณีศึกษาการใช้เตาปฏิกรณ์ที่ต่างชนิดกันในปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของไบโอดีเซล ได้แก่ เตาปฏิกรณ์ชนิดกะ (batch reactor) และเตาปฏิกรณ์ชนิดต่อเนื่อง (continuous reactor) โดยใช้โลหะแพลเลเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับคาร์บอน (Pd/C) พบว่าการใช้เตาปฏิกรณ์ชนิดต่อเนื่องจะให้อัตราการถูกไฮโดรจิเนชันมากกว่าเตาปฏิกรณ์ชนิดกะ 4-5 เท่า อย่างไรก็ตามการใช้เตาปฏิกรณ์ชนิดกะ จะให้การเปลี่ยนผันเป็นคาร์บอน 18 อะตอมและมีพันธะคู่ 1 ตำแหน่งในปริมาณที่สูงกว่า ในปริมาณการเปลี่ยนผันที่สูง ซึ่งถือว่าเป็นองค์ประกอบที่ส่งผลต่อคุณภาพของไบโอดีเซลที่ดี ได้มากกว่าเนื่องจากการใช้เตาปฏิกรณ์ชนิดกะ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกสัมผัสกับไบโอดีเซลได้น้อยกว่าการใช้เตาปฏิกรณ์ชนิดต่อเนื่อง ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้การเปลี่ยนผันจาก คาร์บอน 18 อะตอมและมีพันธะคู่ 1 ตำแหน่ง ไปเป็น คาร์บอน 18 อะตอมแบบอิ่มตัว (ให้ผลเสียกับคุณภาพไบโอดีเซล) ได้น้อยลง ในส่วนที่ปริมาณการเปลี่ยนผันที่ต่ำ ๆ จะพบปริมาณของคาร์บอน 18 อะตอมและมีพันธะคู่ 1 ตำแหน่ง ที่

ปริมาณต่ำ ๆ ทั้งสองชนิดเตาปฏิกรณ์ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วพบว่าที่ปริมาณการเปลี่ยนผันที่สูงๆจะพบปริมาณคาร์บอน 18 อะตอมและมีพันธะคู่ 1 ตำแหน่ง ที่สูงจากการใช้ปฏิกรณ์ชนิดกะได้มากกว่า จึงสรุปได้ว่าการใช้ ปฏิกรณ์ชนิดกะดีกว่าการใช้เตาปฏิกรณ์ชนิดต่อเนื่อง (Numwong et al.,2012)

กรณีศึกษาผลของอุณหภูมิของปฏิกิริยา โดยใช้โลหะนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน อุณหภูมิที่เลือกศึกษาคือ 99 ,130,137 และ 149 องศาเซลเซียส ขณะทำการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ นั้น สภาวะอื่น ๆ จะไม่ถูกเปลี่ยนเพื่อให้เห็นผลจากอุณหภูมิอย่างชัดเจน จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 99 และ 130 องศาเซลเซียส ถือว่าเป็นการทดลองที่อุณหภูมิต่ำจะให้ค่าการเปลี่ยนผันที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับทำการทดลองที่อุณหภูมิ 137 และ 149 องศาเซลเซียส ที่ให้ค่าการเปลี่ยนผันที่สูงกว่า โดยเฉพาะปริมาณของกรดไขมันอิสระที่มีพันธะคู่แบบทรานส์ (*trans-isomer*) การทดลองที่อุณหภูมิช่วง 130-137 องศาเซลเซียส พบว่าให้ปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีพันธะคู่แบบทรานส์ (*trans-isomer*) ที่ 0.197 ในขณะที่ การทดลองในช่วงอุณหภูมิ 137-149 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีพันธะคู่แบบทรานส์ (*trans-isomer*) ที่ 0.186 ซึ่งลดลงเล็กน้อย ผลของอุณหภูมิจะมีผลต่อค่าความต้านทานการถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer resistance) จากโมเลกุลก๊าซไฮโดรเจนไปยังพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และยังพบอีกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสาร (volumetric mass transfer coefficient) เพิ่มขึ้น 140% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 99 ไปเป็น 130 องศาเซลเซียส (Alsobaai et al., 2012)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการวิจัย

3.1.1 ศึกษา ค้นคว้าทฤษฎี และสืบค้นข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1.2 วางแผนการดำเนินงานวิจัย กำหนดขั้นตอนและวิธีการทดลอง

3.1.3 จัดหาวัสดุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์การทดลอง

3.1.4 ศึกษาการใช้เครื่องมือทำปฏิกิริยาและเครื่องมือพิสูจน์เอกลักษณ์

3.1.5 สังเคราะห์ตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมจากอนุพันธ์ไซโลสด้วยวิธีสังเคราะห์ผลึก

สารประกอบด้วยสารละลายน้ำร้อนภายใต้ที่อุณหภูมิและความดันสูง (hydrothermal)

3.1.6 เตรียมโลหะนิกเกิลจากสารประกอบนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และโลหะตัวสนับสนุนตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แมกนีเซียมจากสารประกอบแมกนีเซียมไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ละลายในน้ำที่ปราศจากไอออน (DI) เพื่อทำการจุ่มแบบเปียกสารประกอบของโลหะลงบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปทำให้แห้งโดยการไล่น้ำออกนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงและทำการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาการนำไปทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน

3.1.7 ทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม (Ni/CS) และโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมโดยมีโลหะแมกนีเซียมเป็นโลหะสนับสนุนตัวเร่งปฏิกิริยา (Ni-Mg/CS) ที่ผ่านการรีดิวซ์แล้ว

3.1.8 พิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาและวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา สมบัติพื้นที่ผิว สมบัติความสามารถในการรีดิวซ์โดยแก๊สไฮโดรเจน และสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1.9 พิสูจน์เอกลักษณ์และวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของไบโอดีเซลที่ได้หลังจากทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วนที่สภาวะต่าง ๆ

3.1.10 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

3.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบ/สารเคมี	เกรด	บริษัทผู้ผลิต/ประเทศ
สารอนุพันธ์ไซโลส (xylose)	เกรดวิเคราะห์	TCl/ประเทศญี่ปุ่น
นิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Nickel nitrate hexahydrate, $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$)	เกรดวิเคราะห์	QReC/ ประเทศนิวซีแลนด์
แมกนีเซียมไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Magnesium nitrate hexahydrate, $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$)	เกรดวิเคราะห์	QReC/ ประเทศนิวซีแลนด์
อะซิโตน (Acetone, C_3H_6O)	เกรดวิเคราะห์	MERCK/ประเทศเยอรมัน
กรดอะซิติก (Acetic acid)	เกรดวิเคราะห์	QReC/ ประเทศนิวซีแลนด์
ไซโคลเฮกเซน (cyclohexane)	เกรดวิเคราะห์	QReC/ ประเทศนิวซีแลนด์
โพแทสเซียมไอโอดีน (potassium iodine, KI)	เกรดวิเคราะห์	UNIVAR/ ประเทศ ออสเตรเลีย
โซเดียมไทโอซัลเฟต (sodium thiosulfate, $Na_2S_2O_3$)	เกรดวิเคราะห์	QReC/ ประเทศนิวซีแลนด์
โพแทสเซียมไดโครเมต (potassium dichromate, $K_2Cr_2O_7$)	เกรดวิเคราะห์	QReC/ ประเทศนิวซีแลนด์
กรดไฮโดรคลอริก (hydro chloric acid, HCl)	เกรดวิเคราะห์	QReC/ ประเทศนิวซีแลนด์
สารละลายวิจส์ (Wijs solution)	เกรดวิเคราะห์	Panreac/ประเทศเยอรมัน
ไดคลอโรมีเทน (dichloro methane, CH_2Cl_2)	เกรดวิเคราะห์	QReC/ ประเทศนิวซีแลนด์
สารละลายแป้ง ($C_6H_{10}O_5$) _n	เกรดวิเคราะห์	QReC/ ประเทศนิวซีแลนด์
แก๊สไนโตรเจน 99.99%	เกรดวิเคราะห์	Praxair/ ประเทศไทย
แก๊สไฮโดรเจน 99.999%	เกรดวิเคราะห์	Praxair/ ประเทศไทย
แก๊สฮีเลียม 99%	เกรดวิเคราะห์	Praxair/ ประเทศไทย
แก๊สไนโตรเจน 98% ออกซิเจน 2%	เกรดวิเคราะห์	Praxair/ ประเทศไทย
แก๊สฮีเลียม 99%	เกรดวิเคราะห์	Praxair/ ประเทศไทย
แก๊สอากาศ	เกรดวิเคราะห์	BIG/ ประเทศไทย

วัตถุดิบ/สารเคมี	เกรด	บริษัทผู้ผลิต/ประเทศ
ไบโอดีเซล	เกรดวิเคราะห์	บางจาก/ประเทศไทย
น้ำปราศจากไอออน	เกรดวิเคราะห์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อเครื่องมือ/อุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิต/รุ่น
เครื่องวัดการไหลของแก๊ส (mass flow controller)	BROOKS รุ่น SLA5850
เครื่องอ่านค่าและตั้งค่าอัตราการไหลของแก๊สและของเหลวทุติยภูมิ (gas and liquid mass flow secondary electronics)	BROOKS รุ่น 0254
เครื่องควบคุมและให้ความร้อนต่อสายรัดความร้อน (heat controller)	T.W.T รุ่น 9A-962
เครื่องควบคุมความเร็วรอบในการปั่นกวน (speed control motor)	OM oriental motor รุ่น 5RK90RGO-CFP
เตาเพิ่มความดัน (autoclave)	
เตาปฏิกรณ์ชนิดกะ (batch reactor)	M.SUS รุ่น 316 LLRO 00
เครื่องอัดความดันด้านกลับ (back pressure)	South Carolina USA รุ่น BP3-1A11Q5W111
เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (rotary evaporator)	IKA รุ่น RV10 digital
อ่างน้ำร้อน (water bath)	IKA รุ่น HB10 digital
เครื่องทำความเย็นให้กับคอนเดนเซอร์ (cooling)	Gongyi city yuxiang instrument รุ่น DLSB 10/20
ตู้อบสารเคมี (oven)	MEMMERT รุ่น UNB 400
เครื่องชั่งดิจิทัล (digital balance) ทศนิยมสองตำแหน่ง	METTLER TOLEDO รุ่น PB3002-S
เครื่องชั่งดิจิทัล (digital balance) ทศนิยมสี่ตำแหน่ง	METTLER TOLEDO รุ่น AB204-S
เครื่องดูดสุญญากาศ (vacuum pump)	Ilmvac รุ่น MPC 105T

ชื่อเครื่องมือ/อุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิต/รุ่น
อ่างส่งคลื่นความถี่สูง (portable ultrasonic cleanser)	Tech and time รุ่น NXP 2010
เครื่องให้ความร้อนและปั่นกวน (heater and stirrer)	IKA รุ่น C-MAG HS7
ก๊าซโครมาโตกราฟี (gas chromatography,GC)	Agilent Technologies รุ่น 7693A
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)	Bruker รุ่น D8 advance
เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของอนุภาคด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซ (surface area and pore size analysis by gas adsorption technique)	Micromeritics รุ่น ASAP 2460
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)	Hitachi รุ่น S-3500N
เครื่องตรวจสอบพฤติกรรมเกิดการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (temperature programmed reduction by hydrogen gas, H ₂ -TPR)	Lenton

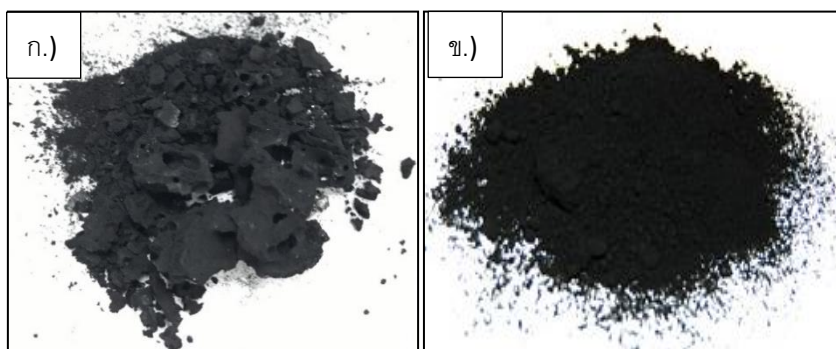
3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การสังเคราะห์ตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมจากอนุพันธ์ไซโลส

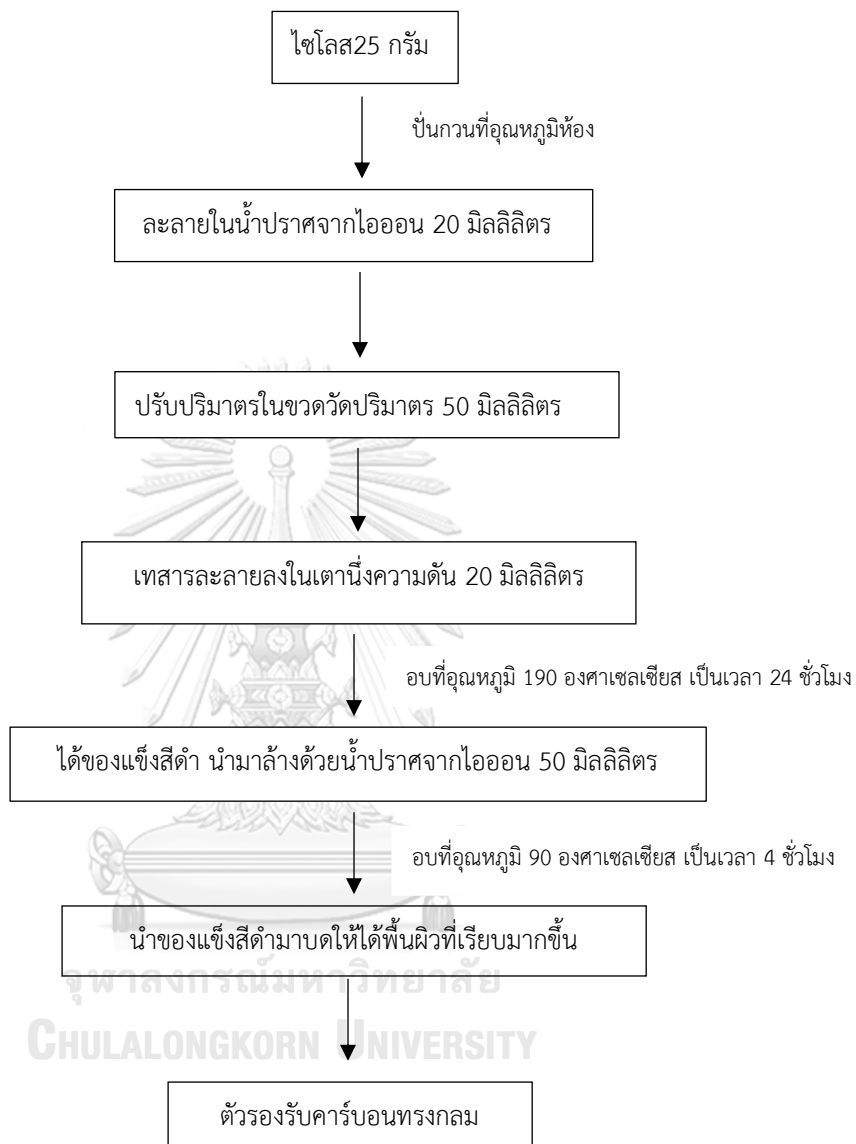
การสังเคราะห์ตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมจากอนุพันธ์ไซโลส (xylose) ด้วยวิธีการให้ความดันและอุณหภูมิที่สูงกับสารละลาย (hydrothermal method) โดยซังอนุพันธ์ไซโลส (xylose) ที่เป็นผงสีขาวมา 25 กรัม มาละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และปั่นจนจนได้เป็นสารละลายสีใส นำมาปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วนำสารละลายที่ได้ใส่ลงในเตาเพิ่มความดัน (autoclave) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และปิดให้สนิทไม่ให้อากาศเข้า แล้วนำเตาเพิ่มความดันเข้าตู้อบ ให้ความร้อนที่ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะได้เป็นผลึกของแข็งสีดำ นำของของแข็งสีดำมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปอบต่อที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ของแข็งสีดำ นำของแข็งสีดำที่ได้มาบดเพื่อให้มีพื้นผิวที่เรียบขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.2 จะได้คาร์บอนทรงกลมเป็นตัวรองรับ วิธีการสังเคราะห์ตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.1 เตาเพิ่มความดัน (autoclave)



รูปที่ 3.2 ตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมก่อนบด (ก.) และหลังบด (ข.)



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม

3.4.2 การเติมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม

3.4.2.1 การเติมโลหะนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม (Ni/CS)

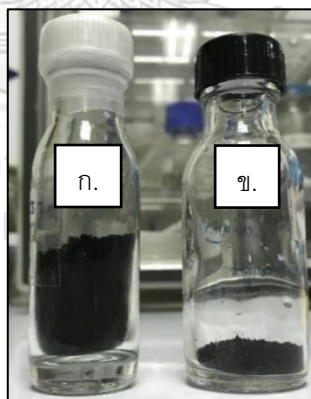
ชั่งนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรตมา 5 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันโดยการปั่นกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำสารที่ได้ไปทำให้แห้งด้วยการระเหยน้ำออกโดยเครื่องกลั่นระเหยแบบหมุน (rotary evaporation) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 แล้วนำสารที่ทำให้แห้งไปทำการเผาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 เครื่องกลั่นระเหยแบบหมุน (rotary evaporation)

3.4.2.2 การเติมโลหะนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมโดยมีการเติมโลหะแมกนีเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสับสนุน (Ni-Mg/CS)

ขั้นตอนในการสังเคราะห์โลหะนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมโดยมีการเติมโลหะแมกนีเซียมเป็นตัวเร่งสับสนุนใช้ขั้นตอนเช่นเดียวกันกับโลหะนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม หลังจากนำโลหะนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วชั่งสารประกอบแมกนีเซียมไนเตรตเฮกซะไฮเดรตมา 4.3 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร แล้วก็นำมาผสมให้เข้ากันกับโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงแล้วและปั่นกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และระเหยน้ำออกโดยเครื่องกลั่นระเหยแบบหมุน (rotary evaporation) หลังจากนั้นก็นำสารที่ได้ไปเผาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อีกครั้ง ก็จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลลงบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมโดยมีการเติมโลหะแมกนีเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสับสนุน ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม (ก.) และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมโดยมีการเติมโลหะแมกนีเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสับสนุน (ข.)

3.4.3. ทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน (partial hydrogenation)

หลังจากเตรียมตั้งเร่งปฏิกิริยาได้ทั้ง 2 ชนิดแล้ว คือตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลกับแมกนีเซียมบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม ก่อนการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกนำไปรีดิวซ์ (reduce) ด้วยก๊าซไฮโดรเจน ด้วยอัตราการไหลของก๊าซ 50 มิลลิลิตร/นาที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และ 570 องศาเซลเซียส สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนคาร์บอนทรงกลมและนิกเกิลกับแมกนีเซียมบนคาร์บอนทรงกลม ตามลำดับเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและผ่านการเคลือบผิวหน้าของตัวเร่งด้วยออกซิเจน (passivate) ด้วยก๊าซไนโตรเจน 98 เปอร์เซ็นต์ เจือจางด้วยออกซิเจน 2 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ก่อนการใช้ทดสอบไฮโดรจิเนชันบางส่วน จากนั้นจึงนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มาทดสอบการไฮโดรจิเนชัน โดยเครื่องมือที่ใช้ทดสอบไฮโดรจิเนชันบางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซล

3.4.4. สภาพที่ใช้ทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน

สภาพที่ใช้ในการทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน มีการเตรียมสถานะต่าง ๆ ด้วยการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยก๊าซไฮโดรเจนและผ่านการเคลือบผิวหน้าของตัวเร่งด้วยออกซิเจน (passivate) แล้ว นำตัวเร่งที่ได้มาชั่งน้ำหนัก 1,3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต่อน้ำหนักไปโอติเซล 50 มิลลิลิตร ใส่ลงไปในเตาปฏิกรณ์ชนิดกะ ขนาด 85 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จากนั้นเติมไปโอติเซล 50 มิลลิลิตรลงไปในเตาปฏิกรณ์ชนิดกะ สวมเตาปฏิกรณ์เข้ากับใบพัดปั่นกวน มีท่อปล่อยก๊าซไฮโดรเจนและแท่งเทอร์มอคัปเปิล แล้วไขเตาปฏิกรณ์เข้าให้สนิท จากนั้นสวมสายรัดให้ความร้อน (heater band) รอบ ๆ เตาปฏิกรณ์ แล้วเปิดก๊าซไฮโดรเจน โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซที่ 70 มิลลิลิตร/นาที เมื่อมั่นใจว่าก๊าซไฮโดรเจนได้ไหลผ่านเข้าสู่เตาปฏิกรณ์โดยต่อท่อสายยางจุ่มลงในน้ำแล้วเกิดฟองอากาศออกมา ให้ปิดวาล์วทางออกก๊าซไฮโดรเจนในระบบ และเปิดวาล์วให้ก๊าซเข้าไปในระบบของเครื่องอัดความดันด้านกลับ (back pressure) โดยใช้ความดัน 1,3 และ 5 บาร์ เมื่อพบว่าได้ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนที่ต้องการแล้ว และไม่มีการรั่วไหลของก๊าซแล้ว จึงเริ่มทำปฏิกิริยา ใช้อัตราในการปั่นกวน 300 รอบต่อนาที ทั้งนี้ น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไปโอติเซล อุณหภูมิ และความดัน จะทยอยทำทีละขั้นตอน ดังอธิบายในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.7 เตาปฏิกรณ์ชนิดกะ ขนาด 85 มิลลิลิตร

ตารางที่ 3.3 สภาวะในการทดสอบไฮโดรเจนชั้นบางส่วน

ชื่อตัวอย่าง	โลหะนิกเกิลบนตัว รองรับคาร์บอนทรง กลม (Ni/CS) (น้ำหนัก : ไบโอดีเซล)	โลหะนิกเกิลบนตัว รองรับคาร์บอนทรงกลม เติมโลหะแมกนีเซียม (Ni-Mg /CS) (น้ำหนัก : ไบโอดีเซล)	ความดัน (บาร์)	อุณหภูมิ (เซลเซียส)
1% 1b-80	1%	-	1	80
1% 3b-80	1%	-	3	80
1% 3b-100	1%	-	3	100
1% 3b-120	1%	-	3	120
1% 5b-80	1%	-	5	80
1% 5b-100	1%	-	5	100
1% 5b-120	1%	-	5	120
3% 1b-80	3%	-	1	80
3% 1b-100	3%	-	1	100
3% 1b-120	3%	-	1	120
3% 3b-80	3%	-	3	80
3% 3b-100	3%	-	3	100
3% 3b-120	3%	-	3	120
3% 5b-80	3%	-	5	80
3% 5b-100	3%	-	5	100
3% 5b-120	3%	-	5	120
5% 3b-80	5%	-	3	80
5% 3b-100	5%	-	3	100
5% 3b-120	5%	-	3	120
5% 5b-80	5%	-	5	80
5% 5b-100	5%	-	5	100
5% 5b-120	5%	-	5	120
Mg 1% 3b-80	-	1%	3	80

ชื่อตัวอย่าง	โลหะ निकเกิลบนตัว รองรับคาร์บอนทรง กลม (Ni/CS) (น้ำหนัก : ไบโอดีเซล)	โลหะ निकเกิลบนตัว รองรับคาร์บอนทรงกลม เติมโลหะแมกนีเซียม (Ni-Mg /CS) (น้ำหนัก : ไบโอดีเซล)	ความดัน (บาร์)	อุณหภูมิ (เซลเซียส)
Mg 1% 3b-100	-	1%	3	100
Mg 1% 3b-120	-	1%	3	120
Mg 1% 5b-80	-	1%	5	80
Mg 1% 5b-100	-	1%	5	100
Mg 1% 5b-120	-	1%	5	120
Mg 3% 3b-80	-	3%	3	80
Mg 3% 3b-100	-	3%	3	100
Mg 3% 3b-120	-	3%	3	120
Mg 3% 5b-80	-	3%	5	80
Mg 3% 5b-100	-	3%	5	100
Mg 3% 5b-120	-	3%	5	120
Mg 5% 3b-80	-	5%	3	80
Mg 5% 3b-100	-	5%	3	100
Mg 5% 3b-120	-	5%	3	120
Mg 5% 5b-80	-	5%	5	80
Mg 5% 5b-100	-	5%	5	100
Mg 5% 5b-120	-	5%	5	120

3.4.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์และวิเคราะห์ผล

3.4.5.1 การวิเคราะห์ไบโอดีเซลที่ได้หลังไฮโดรจิเนชันบางส่วน

(1.) การวิเคราะห์องค์ประกอบในไบโอดีเซลหลังไฮโดรจิเนชันบางส่วน

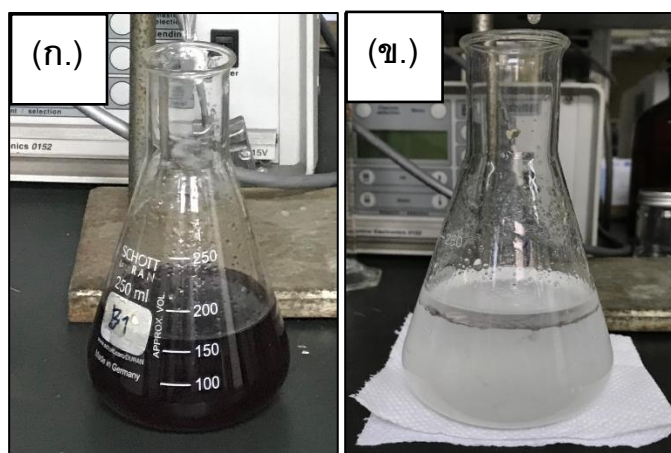
ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบในไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (gas chromatography, GC) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์กลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ระเหยได้ง่าย (volatile organic compounds) และกลุ่มสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถระเหยได้ปานกลาง (semi-volatile organic compounds) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยใช้คอลัมน์ในการวิเคราะห์คือ HP-88 เป็นคอลัมน์ขนาดเล็กแบบซิลิกา (HP-88 fused-silica capillary column) ใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สตัวพา (carrier gas) อัตราในการไหล 2.4 มิลลิลิตร/นาที, อุณหภูมิของหัวฉีด (injector) 200 องศาเซลเซียส และใช้อัตราในการฉีดสาร (split ratio) 75:1 ในขณะที่อุณหภูมิของตัวตรวจวัด (detector) เท่ากับ 230 องศาเซลเซียส ปริมาณของสารที่ฉีดคือ 0.2 ไมครอน จะถูกฉีดเข้าตู้อบที่อุณหภูมิเริ่มต้น 130 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที จากนั้นจะเพิ่มอุณหภูมิเป็น 220 องศาเซลเซียส ในอัตรา 2 องศาเซลเซียส/นาที นาน 15 นาที



รูปที่ 3.8 เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (gas chromatography, GC) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7890A

(2.) การวิเคราะห์ปริมาณพันธะคู่โดยวิธีทดสอบไอโอดีน

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 5768-02 ไอโอดีนเป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอนกับคาร์บอน เมื่อทำการไทเทรตจนได้สารละลายไม่มีสี ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ข) หาปริมาณสารที่ไทเทรตไป และคำนวณออกมาจะได้ปริมาณของไอโอดีนที่ใช้ไป จึงสามารถบอกปริมาณพันธะคู่ได้



รูปที่ 3.9 ทดสอบค่าไอโอดีน ก่อนไทเทรต(ก.) และหลังไทเทรต ณ จุดสมมูล(ข.)

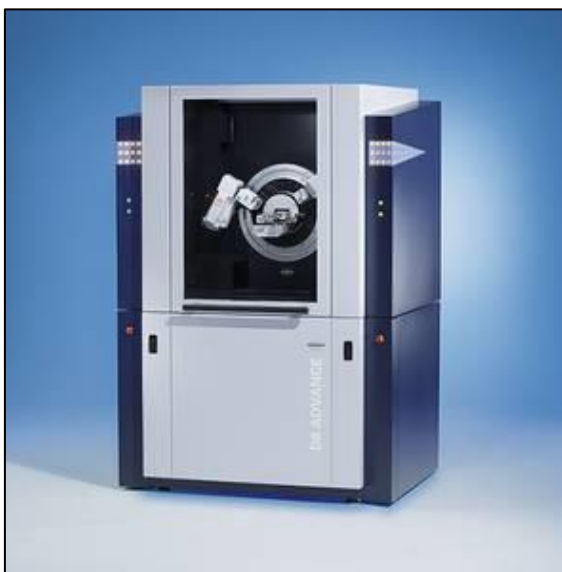
(3.) การวิเคราะห์สมบัติของไบโอดีเซล

วิเคราะห์สมบัติด้านความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (oxidative stability) ตามมาตรฐาน EN 14112 ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ Metrohm 743 Rancimat โดยในระหว่างที่ตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์ภายใต้อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ภายใต้อากาศและให้อัตราการไหลของอากาศ 10 ลิตร/ชั่วโมง ซึ่งผลที่ได้จะถูกรายงานระหว่าง ค่าความสามารถในการถูกเหนี่ยวนำ (conductivity) กับเวลา (time) และรายงานค่าออกเป็น Induction Period (IP) หน่วยเป็นชั่วโมง และวิเคราะห์สมบัติด้านการใช้งาน ณ อุณหภูมิต่ำ (cold flow properties) ซึ่งแบ่งออกเป็นการวิเคราะห์ค่าจุดขุ่นมัว (cloud point) และจุดไหลเท (pour point) โดยวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM 2500 และมาตรฐาน D97 ตามลำดับ

3.4.5.2 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

(1.) การวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของผลึก

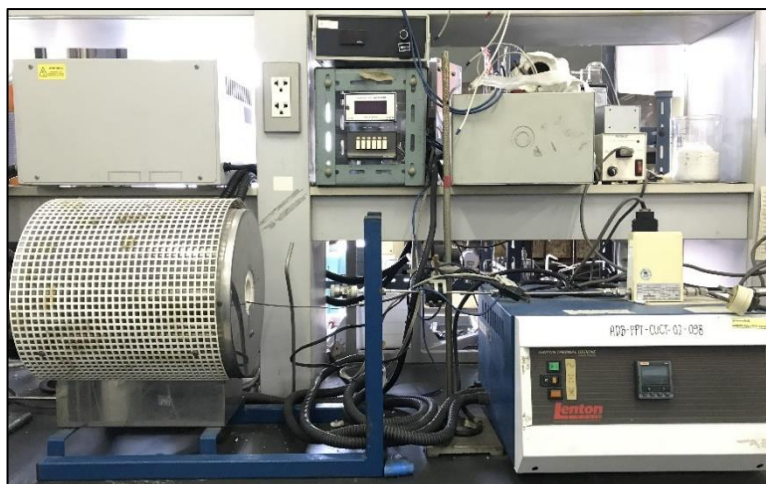
การวิเคราะห์ลักษณะของผลึกของโลหะที่ใส่ลงไป ด้วยเทคนิคเอกซเรย์-ดิฟแฟรกชัน แสดงดังรูปที่ 3.10 โดยแสกนในช่วง $2\theta = 5-60$ องศา



รูปที่ 3.10 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance

(2.) การตรวจสอบพฤติกรรมเกิดการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน

เทคนิคการตรวจสอบพฤติกรรมเกิดการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (H_2 -TPR) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการวัดความยากง่ายในการรีดิวซ์สารประกอบโลหะออกไซด์ ซึ่งอาจบ่งบอกถึงอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างสารประกอบโลหะออกไซด์ที่เป็นตำแหน่งกัมมันต์ (active species) กับตัวรองรับ (support) แสดงดังรูปที่ 3.11 โดยทดสอบสารที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100-900 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้ก๊าซไฮโดรเจนเจือจางไนโตรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ อัตราการให้ก๊าซ 25 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 3.11 เครื่องมือการตรวจสอบพฤติกรรมเกิดการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (H_2 -TPR)

(3.) วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซ

เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.12 เป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อนำวัสดุนั้นเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีคุณภาพตามที่ต้องการหรือตามที่มาตรฐานกำหนดโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนในการดูดซับในรูพรุน อุณหภูมิของอ่างแช่ไนโตรเจนเท่ากับ -195.877 องศาเซลเซียส ปริมาตรว่างของพื้นที่ร้อนเท่ากับ 28.5138 ลูกบาศก์เซนติเมตร และปริมาตรว่างของพื้นที่เย็นเท่ากับ 88.3535 ลูกบาศก์เซนติเมตร และอุณหภูมิโดยรอบการทดลองเท่ากับ 22 องศาเซลเซียส บรูเนอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett and Edward Teller) ได้ศึกษาการดูดซับแก๊สไนโตรเจนทั้งบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ พบว่าแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมี ส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุล ชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ผิว ก่อน จากนั้นแก๊สไนโตรเจนที่เหลือ แพร่กระจายไปเคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้น ซึ่งจากผลการศึกษานี้สามารถ เขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับ (W) กับความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) ของวัสดุที่เพิ่มขึ้น เป็นสมการที่ เรียกว่า “สมการของ BET” ได้ตั้งสมการที่ 3.1 (สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล)

$$\frac{1}{W \left[\left(\frac{P_0}{P} \right) - 1 \right]} = \frac{1}{W_m C} - \frac{C-1}{W_m C} \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

โดย W = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ P/P₀

W_m = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ เคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็น
โมเลกุลชั้นเดียว

P = ความดันของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในขณะ ทำการทดลอง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร
ปรอท)

P₀ = ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน (หน่วย เป็นมิลลิเมตรปรอท)



รูปที่ 3.12 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของอนุภาคด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซ
ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP 2460

(4.) การทดสอบลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยา

การทดสอบลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดง ดังรูปที่ 3.13 โดยใช้ตัวอย่างที่ผ่านการหักหลังจุ่มในไนโตรเจนเหลว ซึ่งตัวอย่างก่อนนำมาวิเคราะห์ ต้องเคลือบด้วยทองผ่านเครื่อง sputter-coater การวิเคราะห์ใช้ศักย์ไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ โดยใช้ กำลังขยาย 2,000 เท่า 5,000 เท่า และ 10,000 เท่า



รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Hitachi รุ่น S-3500N

บทที่ 4

ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอน โดยไบโอดีเซลที่ใช้ในงานนี้ได้จากน้ำมันปาล์ม เพื่อเป็นการลดปริมาณของพันธะที่ไม่อิ่มตัวลง เนื่องจากปริมาณของพันธะที่ไม่อิ่มตัวในไบโอดีเซลจะทำให้เกิดผลเสีย ณ ขณะการเก็บรักษา อันเป็นผลมาจากความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนในอากาศต่ำ (Kumar, 2017) อีกทั้งโครงสร้างพันธะที่ไม่อิ่มตัวของพันธะคู่ ทั้งพันธะคู่แบบซิส และพันธะคู่แบบทรานส์ ล้วนมีผลต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซล แล้วยังพบว่าองค์ประกอบของไบโอดีเซลที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันคือ องค์ประกอบของคาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่งแบบซิส (*cis*-C18:1) (Thunyaratchatanon et al., 2016a) สาเหตุเพราะหากทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันอย่างเต็มที่ จะทำให้เกิดเป็นสายโซ่อิ่มตัว เป็นผลให้เกิดผลึกของกรดสเตียริก อุดตันในเครื่องยนต์ได้ และที่เป็นแบบซิสจะให้ผลดีกว่าแบบทรานส์ เนื่องจากจุดหลอมเหลวของคาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่งแบบซิส (*cis*-C18:1) อยู่ที่ -20.2 องศาเซลเซียส แต่จุดหลอมเหลวของ คาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่งแบบทรานส์ (*trans*-C18:1) เท่ากับ 9.9 องศาเซลเซียส (Iida et al., 2015) จึงทำให้สรุปได้ว่าพันธะคู่ที่คงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลหลังจากทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วนนั้น ควรเป็นพันธะที่ไม่อิ่มตัวแบบพันธะคู่แบบซิส เนื่องจากจุดหลอมเหลวที่ต่ำ ๆ จะทำให้สามารถใช้งานได้ดีกว่าในสภาวะอากาศเย็น ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติของไบโอดีเซลอีกประการหนึ่งคือ การเลือกให้พันธะคู่ที่เหลือในไบโอดีเซลเป็นแบบพันธะคู่แบบซิส สามารถทำได้โดยใช้ตัวสนับสนุนในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลคือ โลหะแมกนีเซียม โดยมีการพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก การศึกษาสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด การศึกษาอัตราการรีดักชันโดยแก๊สไฮโดรเจน และพิสูจน์เอกลักษณ์ของไบโอดีเซลหลังการไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยศึกษาและวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ การทดสอบจุดขุ่นมัว และทดสอบค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน

เพื่อความง่ายต่อความเข้าใจ ขออธิบายสัญลักษณ์ที่จะใช้ดังต่อไปนี้

H-FAME	หมายถึง	ไบโอดีเซลที่ผ่านการทำไฮโดรจิซันบางส่วน
1% 3b-80	หมายถึง	ไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลที่ใช้น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักไบโอดีเซล ที่ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
1% 3b-100	หมายถึง	ไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลที่ใช้น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักไบโอดีเซล ที่ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ และอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
1% 3b-120	หมายถึง	ไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลที่ใช้น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักไบโอดีเซล ที่ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ และอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส
1% 5b-80	หมายถึง	ไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลที่ใช้น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักไบโอดีเซล ที่ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
1% 5b-100	หมายถึง	ไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลที่ใช้น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักไบโอดีเซล ที่ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ และอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
1% 5b-120	หมายถึง	ไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลที่ใช้น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักไบโอดีเซล ที่ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ และอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส
3% 3b-80	หมายถึง	ไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลที่ใช้น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักไบโอดีเซล ที่ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
3% 3b-100	หมายถึง	ไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลที่ใช้น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักไบโอดีเซล ที่ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ และอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

Mg 5% 5b-100	หมายถึง ไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลใช้น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการเติมโลหะแมกนีเซียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักไบโอดีเซล ที่ ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ และอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
Mg 5% 5b-120	หมายถึง ไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลใช้น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการเติมโลหะแมกนีเซียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักไบโอดีเซล ที่ ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ และอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส
Ni/CS	หมายถึง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม
Ni-Mg/CS	หมายถึง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมโดยมีการเติม โลหะแมกนีเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสับสนุน
C18:0	หมายถึง คาร์บอน 18 อะตอม และเป็นพันธะแบบอิ่มตัว
<i>cis</i> -C18:1	หมายถึง คาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่ง แบบซิส
<i>trans</i> -C18:1	หมายถึง คาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่ง แบบทรานส์
<i>cis</i> -C18:2	หมายถึง คาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่ 2 ตำแหน่ง แบบซิส
<i>trans</i> -C18:2	หมายถึง คาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่ 2 ตำแหน่ง แบบทรานส์
C18:3	หมายถึง คาร์บอน 18 อะตอม และมีพันธะคู่ 3 ตำแหน่ง

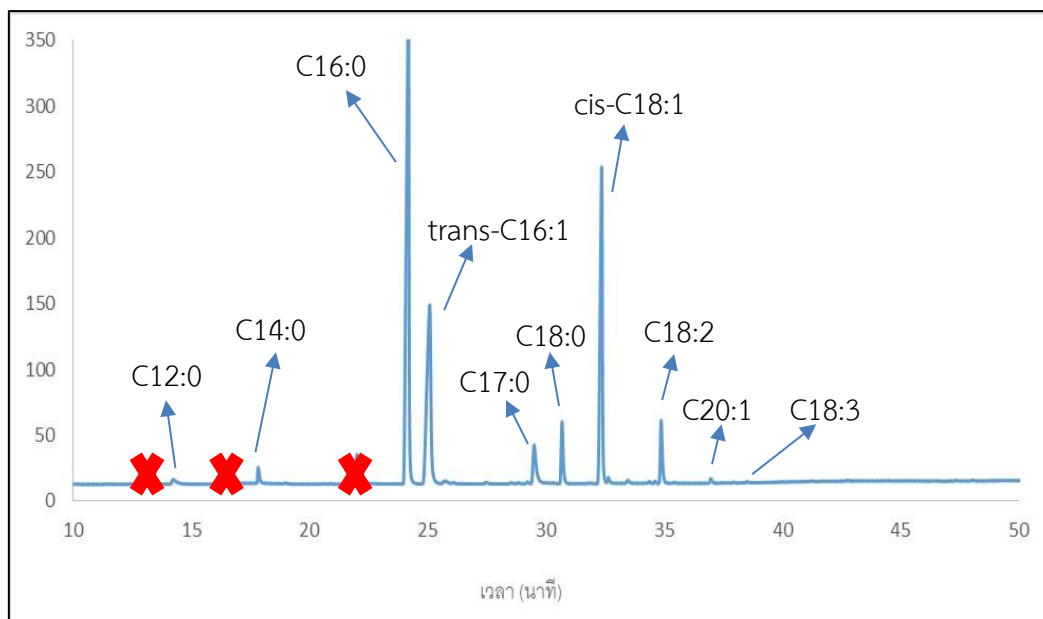
4.1 การวิเคราะห์ไบโอดีเซลที่เป็นสารตั้งต้น

การทดสอบองค์ประกอบของไบโอดีเซลที่ใช้เป็นสารตั้งต้นนั้น สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatograph) มีเครื่องตรวจวัดชนิดของสาร(Detector) คือ ตัวตรวจวัดชนิด Flame ionization detector หรือ FID และใช้คอลัมน์ (Column) ในการวิเคราะห์ชนิด HP-88 เพื่อตรวจวัดประเภทของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและพันธะคู่ชนิดซิสและทรานส์ (*cis-,trans-isomer*) ความยาว 100 เมตร x 0.25 มิลลิเมตร องค์ประกอบของไบโอดีเซลก่อนทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน ดังแสดงใน ตารางที่ 4.1 และโครมาโตแกรมจากการวิเคราะห์โดยก๊าซโครมาโทกราฟี (gas chromatography,GC) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 องค์ประกอบหลักของไบโอดีเซลประกอบไปด้วย เมทิลปาลมิเตต (Methyl palmitate) 55.92%, เมทิลโอเลเอต (Methyl oleate) 30.75%, เมทิลไลโนลิเอต (Methyl linoleate) 5.26% และ เมทิลสเตียเรต (Methyl stearate) 5.15% องค์ประกอบที่สำคัญ 5 องค์ประกอบ (C16:0, C18:0, C18:1, C18:2 และ C18:3) คือน้ำหนักเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของกรดไขมันทั้งหมด อยู่ที่ 97.11 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม การมีปริมาณของสายโซ่ที่มีพันธะไม่อิ่มตัวในปริมาณมากจะส่งผลเสียต่อสมบัติการไหลเท ณ อุณหภูมิต่ำ (Cold flow property) ดังนั้นการลดปริมาณของ เมทิลไลโนลิเนต (Methyl linolenate) หรือ C18:3 และลดปริมาณ เมทิลไลโนลิเอต (Methyl linoleate) หรือ C18:2 และเพิ่มปริมาณของ เมทิล โอเลเอต (*cis-Methyl oleate*) หรือ *cis*-C18:1 จะสามารถปรับปรุงสมบัติของไบโอดีเซลได้ (Yang *et al.*, 2010)

สำหรับไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันปาล์มจะมีปริมาณของพันธะคู่หรือพันธะไม่อิ่มตัวน้อยกว่าไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันชนิดอื่นๆ อีกทั้งน้ำมันปาล์มจะมีปริมาณของ เมทิลปาลมิเตต (Methyl palmitate) หรือ C16 มากที่สุด และหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลแล้วยังทำให้เกิดปริมาณของพันธะคู่แบบทรานส์ ซึ่งส่งผลให้สมบัติของไบโอดีเซลด้อยลง จึงทำให้นักวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มปริมาณพันธะคู่แบบซิส และลดปริมาณพันธะคู่แบบทรานส์ลงอีกด้วย

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบในไบโอดีเซลก่อนไฮโดรจีเนชันบางส่วน

องค์ประกอบในไบโอดีเซล	โครงสร้าง	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
เมทิล ลอเรต (Methyl laurate)	C12:0	0.27
เมทิล ไมริสเตต (Methyl myristate)	C14:0	1.19
เมทิล ปาไมเตต (Methyl palmitate)	C16:0	55.92
เมทิล ปาไมเทลิเดต (Methyl palmitelaidate)	<i>trans</i> -C16:1	0.01
เมทิล ปาไมโทลิเอต (Methyl palmitoleate)	<i>cis</i> -C16:1	0.13
เมทิล สเตียเรต (Methyl stearate)	C18:0	5.15
ทรานส์-เมทิล แอลลิเดต (<i>trans</i> - Methyl elaidate)	<i>trans</i> -C18:1	0.10
เมทิล โอลิเอต (<i>cis</i> -Methyl oleate)	<i>cis</i> -C18:1	30.75
เมทิล ไลโนลิเอต (Methyl linoleate)	C18:2	5.26
เมทิล ไลโนลิเนต (Methyl linolenate)	C18:3	0.03
เมทิล อะราคิเดต (Methyl arachidate)	C20:0	0.41
เมทิล ทรานส์-อีโคซิโนเอต (Methyl <i>trans</i> -eicosenoate)	<i>trans</i> -C20:1	0.08
เมทิล ซิส-อีโคซิโนเอต (Methyl <i>cis</i> -eicosenoate)	<i>cis</i> -C20:1	0.12
เมทิล บีฮีนเนต (Methyl behenate)	C22:0	0.07
เมทิล ลิกโนซีเรต (Methyl lignocerate)	C24:0	0.09



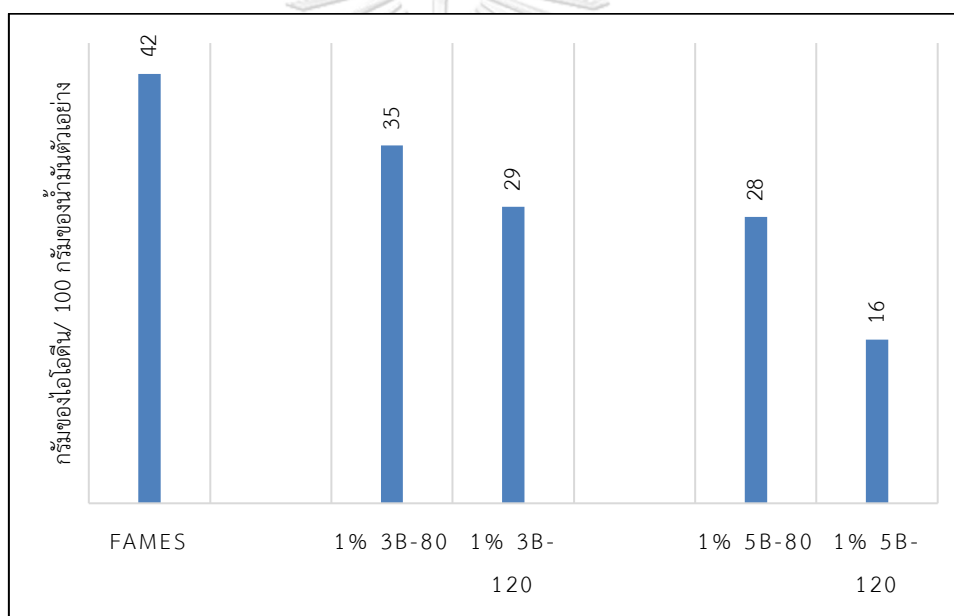
รูปที่ 4.1 โครมาโตแกรมของไบโอดีเซลจากการวิเคราะห์โดยก๊าซโครมาโตกราฟี (GC)

4.2 ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อไบโอดีเซลหลังการทำไฮโดรจีเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS

4.2.1 พันธะคู่ของไบโอดีเซล

ศึกษาพันธะคู่ต่อปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันปาล์มโดยปฏิกิริยาถูกทดลองด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด ได้แก่ Ni/CS และ Ni-Mg/CS ใช้อุณหภูมิในการทดลองถูกทำให้แตกต่างโดยใช้ที่ 80 องศาเซลเซียส ,100 องศาเซลเซียส และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความดันในการทดลองถูกทำให้แตกต่างโดยใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจนที่ 3 บาร์ และ 5 บาร์ ตามลำดับ และอีกหนึ่งปัจจัยในการทำให้แตกต่างคือน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักของไบโอดีเซลโดยน้ำหนักของไบโอดีเซลที่ใช้ทดลองต่อหนึ่งรอบคือ 42.80 กรัม (50 มิลลิลิตร) ที่ใช้ต่อหนึ่งการทดลองคือ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (0.428 กรัม), 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (1.284 กรัม) และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (2.14 กรัม) การควบคุมสถานะของเครื่องทำไฮโดรจีเนชันบางส่วนถูกควบคุมดังนี้ อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 70 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการปั่นกวาระหว่างทำปฏิกิริยา 300 รอบต่อนาที

การทดสอบค่าไอโอดีนโดยการไทเทรตเพื่อหาปริมาณพันธะคู่ในไบโอดีเซลในสภาวะหลังการทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน เปรียบเทียบในกรณีการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในอุณหภูมิ (80 และ 120 องศาเซลเซียส) และความดันที่แตกต่างกัน (3 บาร์ และ 5 บาร์) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อ เพิ่มอุณหภูมิและความดัน จะทำให้ปริมาณของพันธะคู่ลดลง จะเห็นได้จากจำนวนกรัมของไอโอดีน / 100 กรัมของน้ำมันตัวอย่างในแต่ละสภาวะการทดลองที่เพิ่มอุณหภูมิและความดัน จะให้ปริมาณที่ลดลง ซึ่งเป็นไปตามกลไกของอุณหพลศาสตร์ (Alsobaai et al., 2012) อีกทั้งการเพิ่มอุณหภูมิและความดันยังไปกระตุ้นการถูกไฮโดรจิเนตบนพันธะคู่ให้มากขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 4.2 กรัมของไอโอดีน/100 กรัมของน้ำมันตัวอย่างบ่งบอกถึงปริมาณของพันธะคู่ในไบโอดีเซลเมื่อผ่านไฮโดรจิเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS

4.2.2 องค์ประกอบของไบโอดีเซล

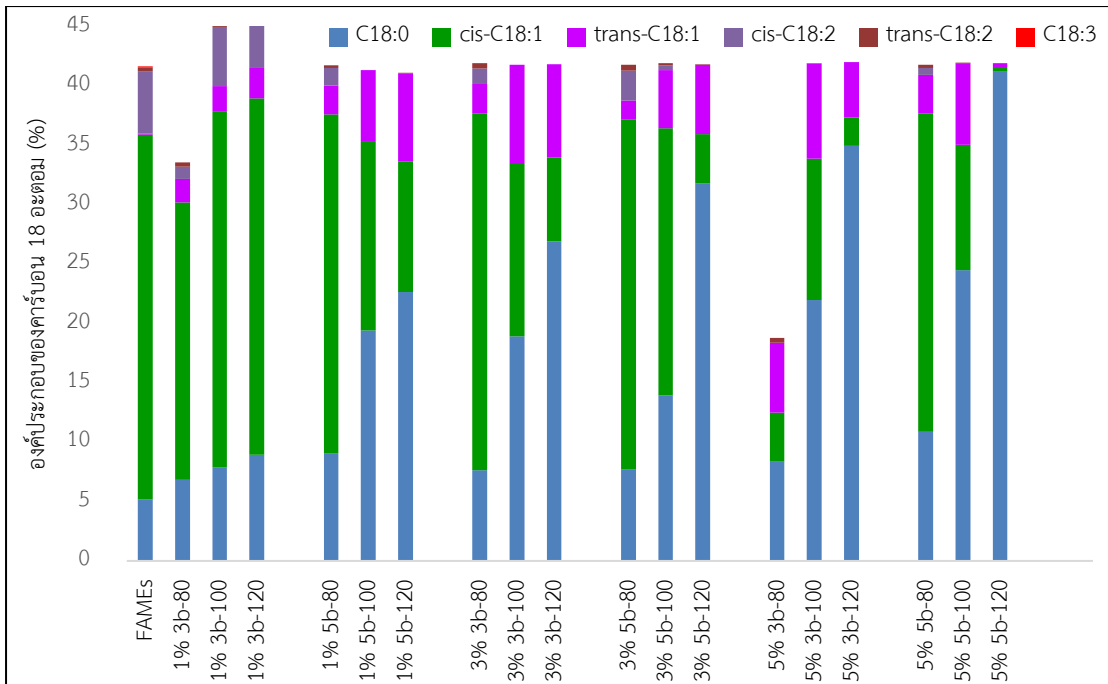
องค์ประกอบของไบโอดีเซลเมื่อผ่านปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS โดยในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่องค์ประกอบของ คาร์บอน 18 อะตอม ในสายโซ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 อธิบายที่สถานะการทดลองโดยเน้นที่ผลจากการเพิ่มอุณหภูมิและความดันเป็นหลักได้ดังนี้

ที่สถานะไฮโดรจิเนชันของไบโอดีเซลที่ 1% 3b-80 หลังทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า C18:3 มีการลดลง จาก 0.11 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 0 เปอร์เซ็นต์ ส่วน C18:2 ก็มี ปริมาณที่ลดลงจาก 5.58 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 1.38 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบของ *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้น จาก 0.10 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 1.99 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณ *cis*-C18:1 ลดลง จาก 30.75 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 23.37 เปอร์เซ็นต์ และ C18:0 เพิ่มขึ้นจาก 5.15 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 6.85 เปอร์เซ็นต์ สถานะไฮโดรจิเนชันของไบโอดีเซลที่ 1% 3b-100 หลังทำปฏิกิริยาเป็น เวลา 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ C18:3 จาก 0.11 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 0.12 เปอร์เซ็นต์ ส่วน C18:2 ก็มีปริมาณจาก 5.58 เปอร์เซ็นต์ เป็น 5.47 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบ ของ *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้น จาก 0.10 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 0.26 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณ *cis*-C18:1 ลดลง จาก 30.75 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 30.16 เปอร์เซ็นต์ และ C18:0 เพิ่มขึ้นจาก 5.15 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 5.41 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อสถานะไฮโดรจิเนชันของไบโอดีเซลที่ 1% 3b-120 หลังทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ C18:3 จาก 0.11 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 0.07 เปอร์เซ็นต์ ส่วน C18:2 ก็มีปริมาณจาก 5.58 เปอร์เซ็นต์ เป็น 5.09 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบของ *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้น จาก 0.10 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 0.40 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณ *cis*-C18:1 ลดลง จาก 30.75 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 30.03 เปอร์เซ็นต์ และ C18:0 เพิ่มขึ้นจาก 5.15 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 5.59 เปอร์เซ็นต์ ดังกล่าวเป็นการรายงานผล ของการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น จาก 80 องศาเซลเซียส ไปเป็น 100 องศาเซลเซียส และ 120 องศาเซลเซียส อีกทั้งเมื่อรายงานผลจากการเพิ่มความดันจาก 3 บาร์ ไปเป็น 5 บาร์ ที่อุณหภูมิ เดียวกัน พบว่า ที่ความดัน 5 บาร์ จะให้ปริมาณของ C18:0 และ *trans*-C18:1 เพิ่มมากขึ้นกว่าที่ ความดัน 3 บาร์ และลดปริมาณของ *cis*-C18:1, C18:2 และ C18:3 ลง แสดงให้เห็นว่า นอกเหนือจากอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยาจนทำให้องค์ประกอบในไบโอดีเซลเปลี่ยนไปแล้ว ความดันยังมีส่วนสำคัญในทั้งกลไกและอัตราการเกิดปฏิกิริยาอีกด้วย

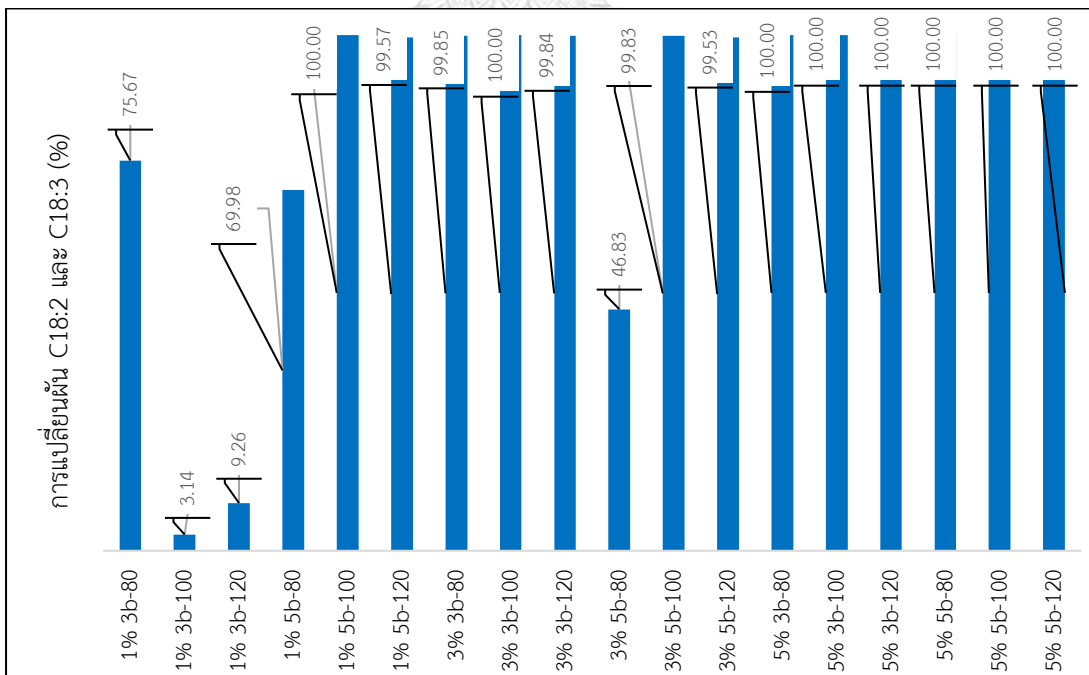
สาเหตุของปริมาณ C18:0 และ ปริมาณ *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้นหลังปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน บางส่วนของไบโอดีเซล สามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนในพันธะคู่จะเกิดการเคลื่อนย้าย (migration) และจัดเรียงตัวใหม่ (isomerization) จาก *cis*-C18:1 ไปเป็น *trans*-C18:1 (Tsuzuki, 2010) ซึ่งเป็นไปตามหลักการของกลไกจลนพลศาสตร์ (kinetic principle) อีกทั้งการเพิ่มความดันยังสามารถทำให้กลไกของปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้มากขึ้น ทำให้เกิดการแปลงผันจาก C18:3 ไปเป็น C18:2 จาก C18:2 ไปเป็น C18:1 และจาก C18:1 ไปเป็น C18:0 ดังนั้น จึงทำให้หลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันจึงทำให้มีปริมาณของ C18:0 เพิ่มขึ้น และ C18:3 ลดลง จากรูปที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบจากไบโอดีเซลก่อนการทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน นอกจากปัจจัยของอุณหภูมิที่มีผลต่อองค์ประกอบของไบโอดีเซลแล้ว ยังมีปัจจัยของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ต่อน้ำหนักของไบโอดีเซลที่มีผลในสภาวะการทดลอง จึงอธิบายในหัวข้อถัดไป

4.2.3 การเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3

รูปที่ 4.4 แสดงถึงการเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้การเปลี่ยนผัน ของ C18:2 และ C18:3 ได้มากขึ้น และเมื่อเพิ่มความดันก็ยิ่งส่งผลให้มีความแปลงผันได้สูงขึ้นอีกด้วย และเมื่อที่อุณหภูมิสูง (จาก 80 องศาเซลเซียส ไปเป็น 100 และ 120 องศาเซลเซียส) และความดันที่สูง (จาก 3 บาร์ ไปเป็น 5 บาร์) จะให้การเปลี่ยนผัน C18:2 และ C18:3 ได้มากขึ้นด้วย ซึ่งเป็นไปตามหลักการของกลไกจลนพลศาสตร์ (kinetic principle) (Alsobaai et al., 2012) โดยการเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 ที่มากขึ้นนั้น จะส่งผลดีต่อสมบัติของไบโอดีเซลด้านค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ (oxidative stability) คือทำให้มีค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่มากขึ้นเป็นผลให้สามารถเก็บรักษาไบโอดีเซลได้ในระยะเวลาที่นานมากขึ้นโดยที่สมบัติของไบโอดีเซลยังไม่เปลี่ยนแปลง (Jain and Sharma, 2014) (Saluja et al., 2016)



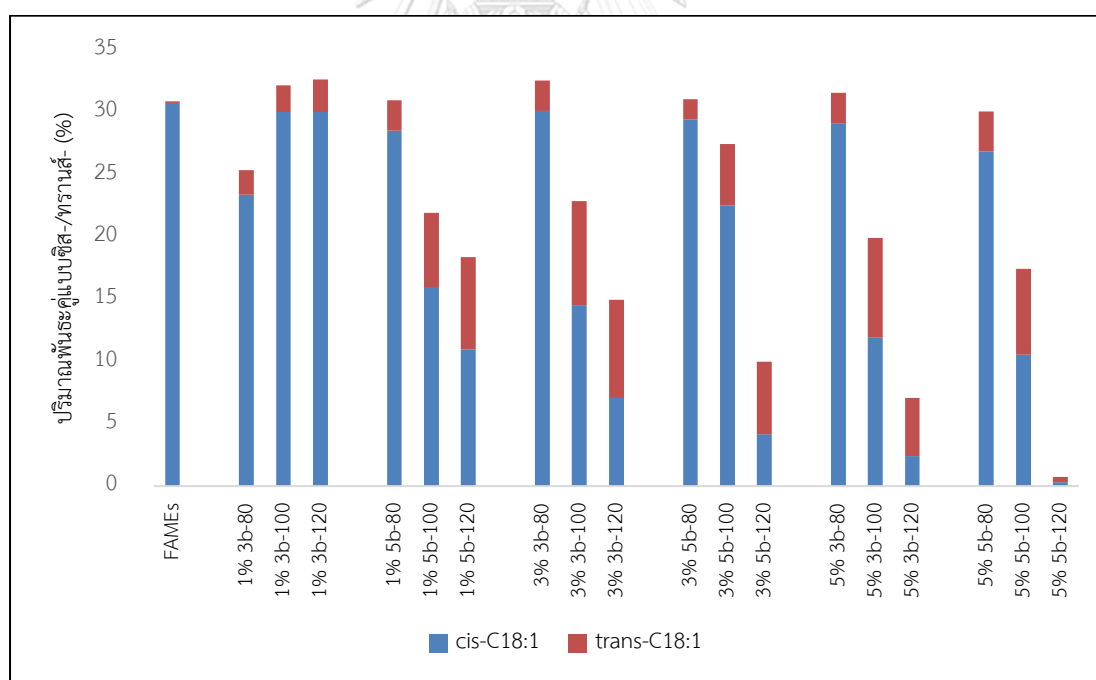
รูปที่ 4.3 องค์ประกอบของคาร์บอน 18 อะตอม ในไบโอดีเซลหลังปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน ในสภาวะต่าง ๆ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของ C18:2 และ C18:3 เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS

4.2.4 ปริมาณของ *cis*-C18:1 และ *trans*-C18:1

รูปที่ 4.5 แสดงปริมาณของ *cis*-C18:1 และ *trans*-C18:1 ทั้งก่อนและหลังไฮโดรจิเนชัน บางส่วนของไบโอดีเซล กล่าวถึงปัจจัยจากการเพิ่มอุณหภูมิและความดันพบว่า ก่อนไฮโดรจิเนชัน มีปริมาณของ *cis*-C18:1 อยู่ 30.75 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณ *trans*-C18:1 อยู่ 0.10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วนที่อุณหภูมิและความดันสูงขึ้นพบว่า จะมีปริมาณของ *trans*-C18:1 มากขึ้น และจะให้ปริมาณของ *cis*-C18:1 ที่ลดลงตามลำดับ สาเหตุเพราะเมื่ออุณหภูมิ เพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนในพันธะคู่จะเกิดการเคลื่อนย้าย (migration) และจัดเรียงตัวใหม่ (isomerization) ของ *cis*-C18:1 ไปเป็น *trans*-C18:1 และความดันที่เพิ่มขึ้นจะกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น เป็นไปตามหลักการของกลไกจลนพลศาสตร์ (kinetic principle) อย่างไร ก็ตามยังมีปัจจัยของความดันและน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักไบโอดีเซลที่มีผลต่อ ปริมาณดังกล่าว จึงอธิบายในหัวข้อถัดไป

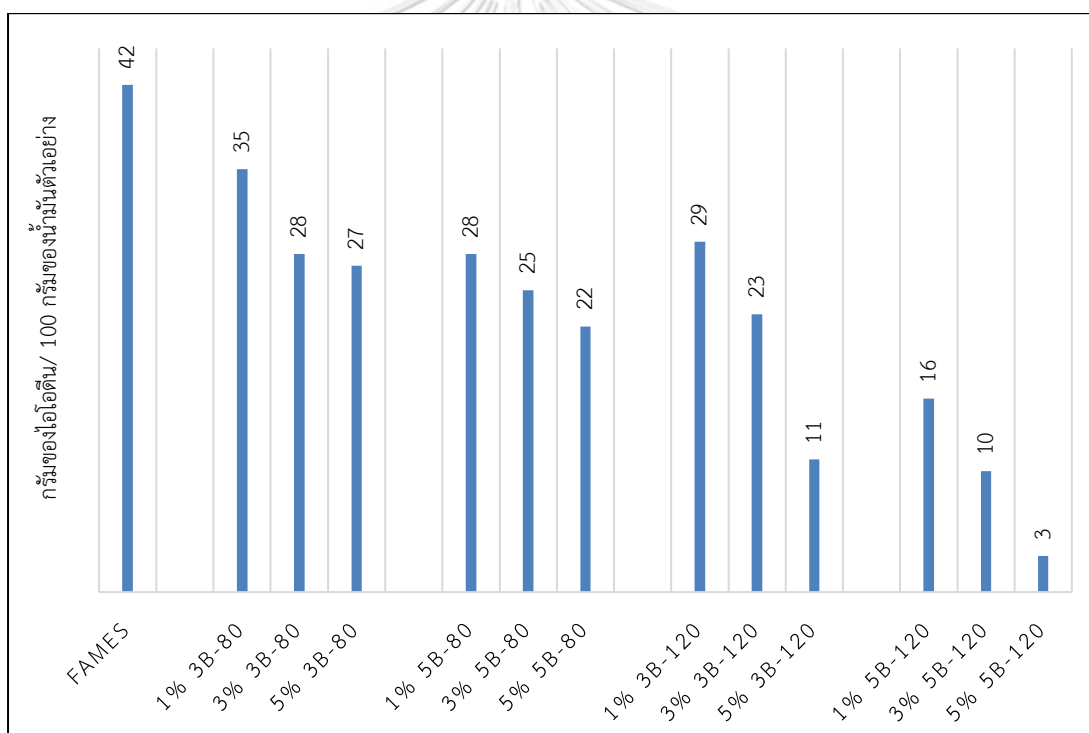


รูปที่ 4.5 ปริมาณของ *cis*-C18:1 และ *trans*-C18:1 หลังปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วนเปรียบเทียบ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS

4.3 ผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS

4.3.1 พันธะคู่ของไบโอดีเซล

การทดสอบค่าไอโอดีนโดยการไทเทรต เพื่อหาปริมาณพันธะคู่ในไบโอดีเซลในสภาวะหลังการทำไฮโดรจีเนชันบางส่วน เปรียบเทียบในกรณีการทดลองที่ใช้ น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนัก ไบโอดีเซล ที่ 1 เปอร์เซ็นต์ 3 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักของไบโอดีเซล ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อ เพิ่มน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักไบโอดีเซล จะทำให้ปริมาณของพันธะคู่ลดลง เนื่องจากปริมาณของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มมากขึ้นจากสามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันได้มากขึ้น จึงทำให้ปริมาณพันธะคู่ลดลงนั่นเอง



รูปที่ 4.6 กรัมของไอโอดีน/100 กรัมของน้ำมันตัวอย่างบ่งบอกถึงปริมาณของพันธะคู่ในไบโอดีเซลเมื่อผ่านไฮโดรจีเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS ต่อน้ำหนักของไบโอดีเซล

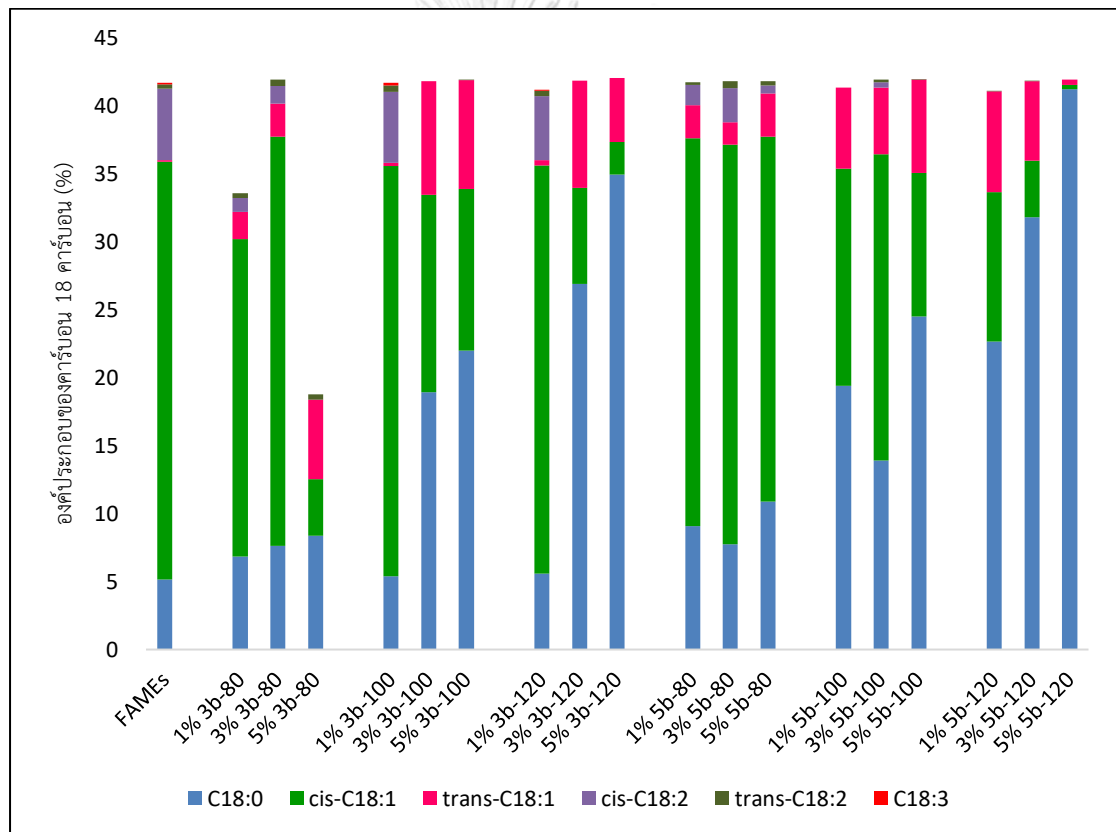
4.3.2 องค์ประกอบของไบโอดีเซล

องค์ประกอบของไบโอดีเซลหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน ในการทดลองใช้น้ำหนัก 1,3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักของไบโอดีเซล และที่สภาวะความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่องค์ประกอบของ คาร์บอน 18 อะตอม ในไบโอดีเซล ดังแสดงในรูปที่ 4.7

ที่สภาวะไฮโดรจิเนชันของไบโอดีเซล 1% 3b-80 หลังทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า C18:3 มีการลดลง จาก 0.11 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 0.00 เปอร์เซ็นต์ ส่วน C18:2 ก็มีปริมาณที่ลดลงจาก 5.58 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 1.38 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบของ *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้น จาก 0.10 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 1.99 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณ *cis*-C18:1 ลดลง จาก 30.75 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 23.37 เปอร์เซ็นต์ และ C18:0 เพิ่มขึ้นจาก 5.15 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 6.85 เปอร์เซ็นต์ สภาวะไฮโดรจิเนชันของไบโอดีเซล 3% 3b-80 หลังทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า C18:3 มีการลดลง จาก 0.11 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 0.00 เปอร์เซ็นต์ ส่วน C18:2 ก็มีปริมาณที่ลดลงจาก 5.58 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 1.74 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบของ *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้น จาก 0.10 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 2.46 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณ *cis*-C18:1 ลดลง จาก 30.75 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 30.09 เปอร์เซ็นต์ และ C18:0 เพิ่มขึ้นจาก 5.15 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 7.64 เปอร์เซ็นต์ ที่สภาวะไฮโดรจิเนชันของไบโอดีเซล 5% 3b-80 หลังทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า C18:3 มีการลดลง จาก 0.11 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 0.00 เปอร์เซ็นต์ ส่วน C18:2 ก็มีปริมาณที่ลดลง จาก 5.58 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.41 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบของ *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้น จาก 0.10 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 5.85 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณ *cis*-C18:1 ลดลง จาก 30.75 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 4.14 เปอร์เซ็นต์ และ C18:0 เพิ่มขึ้นจาก 5.15 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 8.38 เปอร์เซ็นต์ ดังกล่าวมานี้เป็นการควบคุมอุณหภูมิและความดันที่เท่ากัน แต่ต่างกันที่น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไบโอดีเซล จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้ปริมาณของ C18:0 และ *trans*-C18:1 เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ส่งผลเสียต่อสมบัติของไบโอดีเซล ในขณะที่ปริมาณการเพิ่มน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยายังทำให้ปริมาณของ *cis*-C18:1 ลดลงอีกด้วย ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ส่งผลดีต่อสมบัติไบโอดีเซลที่ช่วยปรับปรุงเรื่องของการไหลเท ณ อุณหภูมิต่ำ (cloud point) ให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (100 และ 120 องศาเซลเซียส) และความดัน (3 บาร์ และ 5 บาร์) ให้อยู่ในสภาวะคงที่ และใช้น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่ามีให้

ปริมาณ C18:0 และ *trans*-C18:1 เพิ่มมากขึ้น (เพิ่มมากกว่าที่ 1 เปอร์เซ็นต์) และให้ปริมาณ *cis*-C18:1 ลดลง (ลดลงมากกว่าที่ 1 เปอร์เซ็นต์)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การใช้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากขึ้น ให้ผลดีคือ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นและเกิดการเปลี่ยนผันของสายโซ่ที่ไม่อิ่มตัวได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียคือ จะเกิดการแปลงผันที่มากเกินไปจนเกิดเป็นสายโซ่ที่อิ่มตัว (C18:0) และ องค์ประกอบที่ไม่ดีต่อสมบัติไบโอดีเซล (*trans*-C18:1) มากเกินไปนั่นเอง



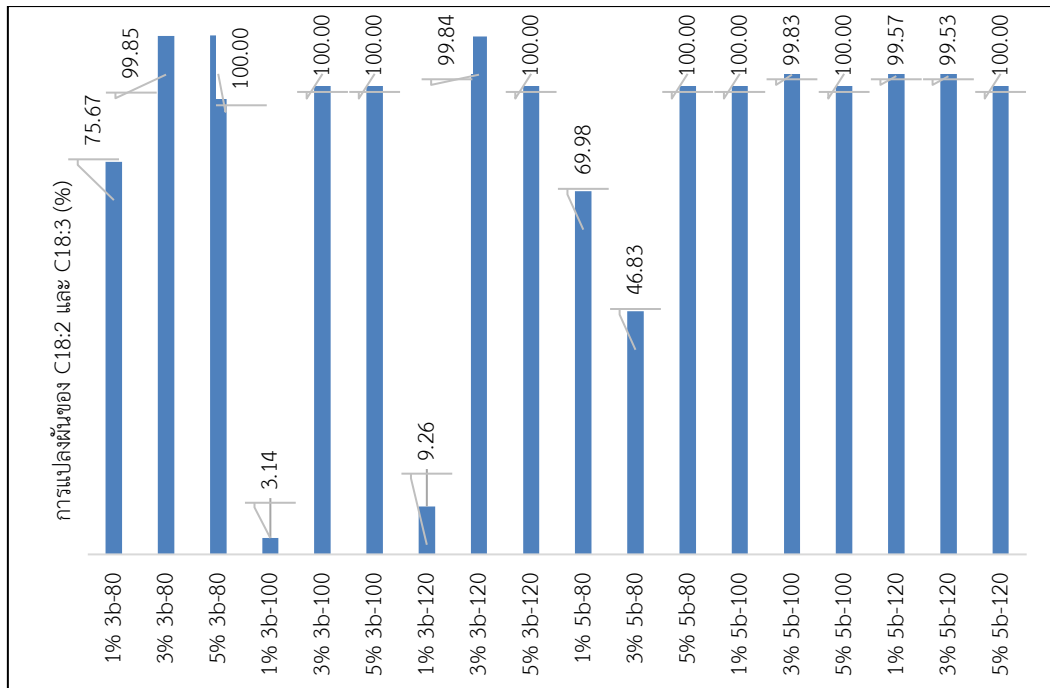
รูปที่ 4.7 องค์ประกอบของคาร์บอน 18 อะตอม ในไบโอดีเซลหลังปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มน้ำหนักร่างปฏิกิริยา Ni/CS ต่อน้ำหนักไบโอดีเซล

4.3.3 การเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS

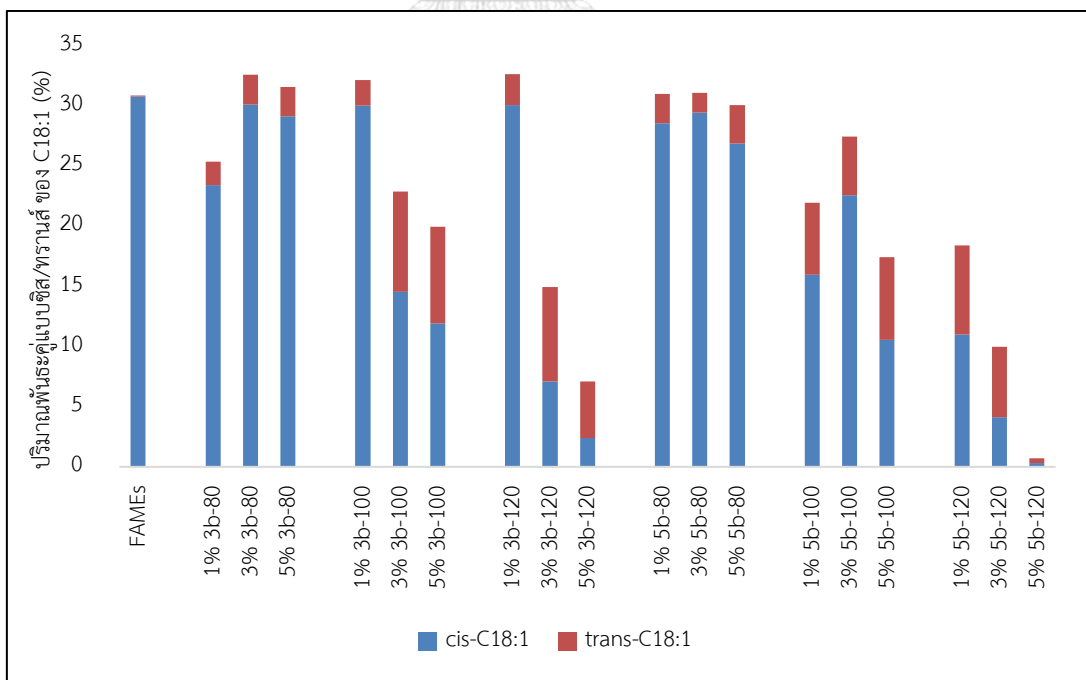
รูปที่ 4.8 แสดงถึงการเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไบโอดีเซล ทำให้การเปลี่ยนผัน ของ C18:2 และ C18:3 ได้มากขึ้น โดยเฉพาะที่น้ำหนักตัวเร่งมาก (3 และ 5 เปอร์เซ็นต์) และยิ่งร่วมกับ สภาวะที่อุณหภูมิสูง (100 และ 120 องศาเซลเซียส) จะยังสามารถให้การเปลี่ยนผันที่สูงถึง 100 % ได้ จึงสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาให้มากขึ้น จะสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาให้เกิดการเปลี่ยนผันได้มากขึ้น

4.3.4 ปริมาณของ *cis*-C18:1 และ *trans*-C18:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS

จากรูปที่ 4.9 แสดงปริมาณของ *cis*-C18:1 และ *trans*-C18:1 ทั้งก่อนและหลังไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซล กล่าวถึงปัจจัยเมื่อเพิ่มน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าก่อนไฮโดรจิเนชัน ปริมาณของ *cis*-C18:1 อยู่ 30.75 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณ *trans*-C18:1 อยู่ 0.10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วนที่เพิ่มน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า จะมีปริมาณของ *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้น และจะให้ปริมาณของ *cis*-C18:1 ที่ลดลง ลักษณะเดียวกันกับผลของอุณหภูมิและความดัน แต่เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิและความดันร่วมด้วย พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูง (100 และ 120 องศาเซลเซียส) และความดันสูง (5 บาร์) จะยิ่งให้ปริมาณของ C18:0 และ *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้นมาก โดยเฉพาะที่สภาวะ 5% 5b-120 จะเห็นได้ว่าเหลือปริมาณพันธะคู่แบบซิสและแบบทรานส์อยู่น้อยมาก เนื่องจากถูกเปลี่ยนผันไปเป็น C18:0 ซึ่งส่งผลเสียต่อการใช้งานในไบโอดีเซล ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลนั้น ยิ่งทำให้เพิ่มปริมาณของพันธะคู่แบบทรานส์ให้มากขึ้น ที่เป็นอีกหนึ่งสาเหตุของการใช้งานไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่ำไม่ดี และเหลือพันธะคู่แบบซิสซึ่งจะให้ผลดีต่อการใช้งานไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่ำได้ดีมากขึ้นนั่นเอง (Makareviciene et al., 2015)



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของ C18:2 และ C18:3 เมื่อเพิ่มน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS

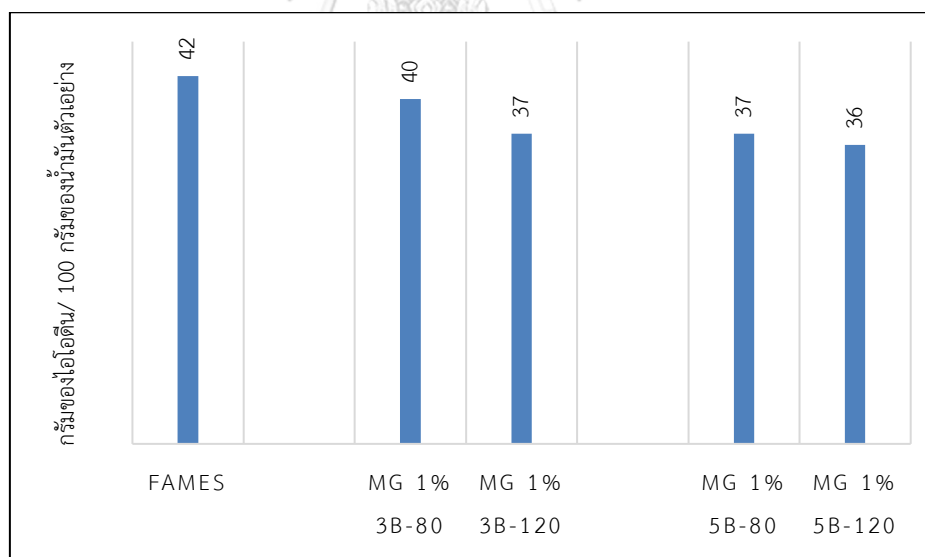


รูปที่ 4.9 ปริมาณของ cis-C18:1 และ trans-C18:1 หลังปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS

4.4 ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อไบโอดีเซลหลังการทำไฮโดรจิเนชันบางส่วนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS

4.4.1 พันธะคู่ของไบโอดีเซล

การทดสอบค่าไอโอดีนโดยการไทเทรต เพื่อหาปริมาณพันธะคู่ในไบโอดีเซลในสภาวะหลักการทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS ศึกษาผลของการเพิ่มอุณหภูมิและความดัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อ เพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ปริมาณพันธะคู่ลดลง และเมื่อเพิ่มความดันจาก 3 บาร์ เป็น 5 บาร์ พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณพันธะคู่มากนัก อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบที่สภาวะการทดลองเดียวกัน แต่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น Ni/CS พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น Ni-Mg/CS จะให้ปริมาณพันธะคู่ในไบโอดีเซลมากกว่า แม้ว่า会增加อุณหภูมิหรือความดัน เนื่องจากการเติมโลหะแมกนีเซียมจะทำให้มีการให้อิเล็กตรอนมากขึ้น (Thunyaratchanon et al., 2016a) จึงเกิดเป็นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมากขึ้น เป็นสาเหตุให้พันธะคู่ยังมีปริมาณเหลืออยู่ในไบโอดีเซลมากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS



รูปที่ 4.10 กรัมของไอโอดีน/100 กรัมของน้ำมันตัวอย่างบ่งบอกถึงปริมาณของพันธะคู่ในไบโอดีเซลเมื่อผ่านไฮโดรจิเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มความดันและอุณหภูมิโดยใช้ Ni-Mg/CS

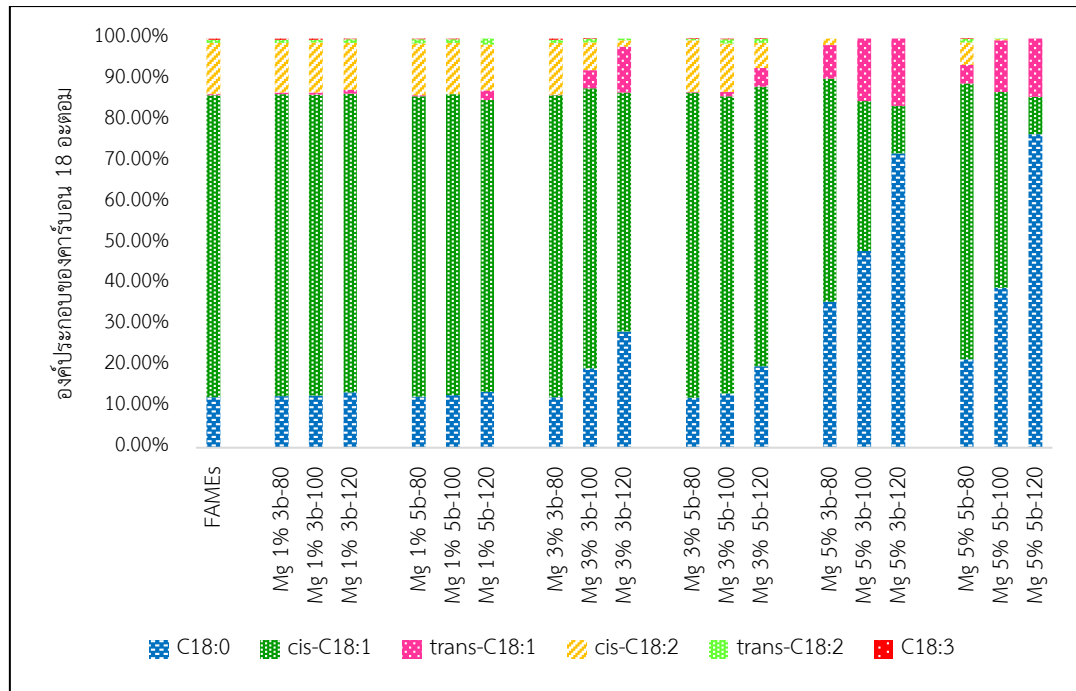
4.4.2 องค์ประกอบของไบโอดีเซล

องค์ประกอบของไบโอดีเซลเมื่อผ่านปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS โดยเน้นที่องค์ประกอบของ คาร์บอน 18 อะตอม ในสายโซ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 อธิบายที่สถานะการทดลองโดยอธิบายผลจากการเพิ่มอุณหภูมิและความดันได้ดังนี้

ที่สถานะไฮโดรจิเนชันของไบโอดีเซลที่ 1% 3b-80 หลังทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า C18:3 มีปริมาณเท่าเดิมคือ 0.11 เปอร์เซ็นต์ ส่วน C18:2 ก็มีปริมาณที่ลดลงจาก 5.58 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 5.36 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบของ *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้น จาก 0.10 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 0.14 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณ *cis*-C18:1 ลดลง จาก 30.75 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 30.60 เปอร์เซ็นต์ และ C18:0 เพิ่มขึ้นจาก 5.15 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 5.22 เปอร์เซ็นต์ ที่สถานะไฮโดรจิเนชันของไบโอดีเซลที่ 1% 3b-100 หลังทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า C18:3 มีปริมาณ 0.11 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.10 เปอร์เซ็นต์ ส่วน C18:2 ก็มีปริมาณที่ลดลงจาก 5.58 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 5.41 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบของ *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้น จาก 0.10 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 0.17 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณ *cis*-C18:1 ลดลง จาก 30.75 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 30.02 เปอร์เซ็นต์ และ C18:0 เพิ่มขึ้นจาก 5.15 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 5.59 เปอร์เซ็นต์

ที่สถานะไฮโดรจิเนชันของไบโอดีเซลที่ 1% 3b-120 หลังทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า C18:3 มีปริมาณเท่าเดิมคือ 0.11 เปอร์เซ็นต์ ส่วน C18:2 ก็มีปริมาณที่ลดลงจาก 5.58 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 5.36 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบของ *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้น จาก 0.10 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 0.14 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณ *cis*-C18:1 ลดลง จาก 30.75 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 30.60 เปอร์เซ็นต์ และ C18:0 เพิ่มขึ้นจาก 5.15 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 5.22 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มความดัน จาก 3 บาร์ ไปเป็น 5 บาร์ พบว่า ที่สถานะไฮโดรจิเนชันของไบโอดีเซลที่ 1% 5b-80 หลังทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า C18:3 มีปริมาณลดลง จาก 0.11 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 0.08 เปอร์เซ็นต์ ส่วน C18:2 ก็มีปริมาณที่ลดลงเล็กน้อยจาก 5.58 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 5.44 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบของ *trans*-C18:1 มีปริมาณคงที่ คือ 0.10 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณ *cis*-C18:1 ลดลง จาก 30.75 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 29.32 เปอร์เซ็นต์ แต่ปริมาณ C18:0 ลดลง จาก 5.15 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 4.96 เปอร์เซ็นต์ ที่สถานะไฮโดรจิเนชันของไบโอดีเซลที่ 1% 5b-100 หลังทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงให้

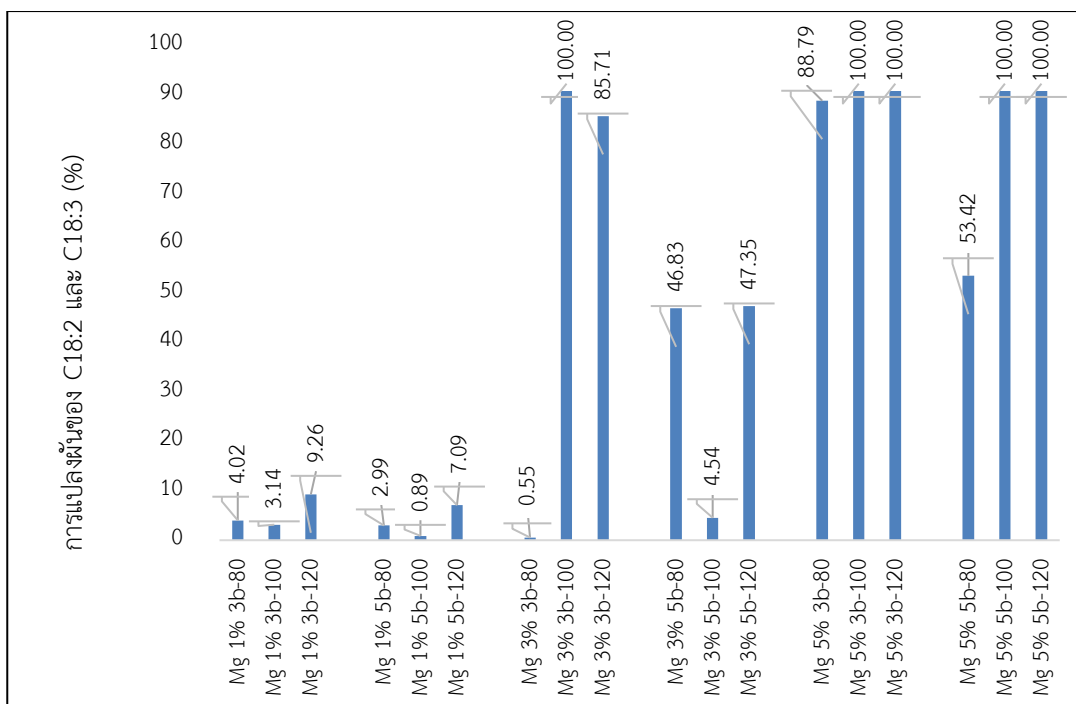
เห็นว่า C18:3 มีปริมาณลดลง จาก 0.11 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 0.07 เปอร์เซ็นต์ ส่วน C18:2 ก็มีปริมาณคงที่ คือ 5.57 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบของ *trans*-C18:1 มีปริมาณลดลง เหลือ 0.00 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณ *cis*-C18:1 ลดลง จาก 30.75 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 30.57 เปอร์เซ็นต์ แต่ปริมาณ C18:0 เพิ่มขึ้น จาก 5.15 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 5.33 เปอร์เซ็นต์ และที่สภาวะไฮโดรจิเนชันของไบโอดีเซลที่ 1% 5b-120 หลังทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า C18:3 มีปริมาณลดลง จาก 0.11 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 0.00 เปอร์เซ็นต์ ส่วน C18:2 ก็มีปริมาณลดลง จาก 5.57 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 5.33 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบของ *trans*-C18:1 มีปริมาณเพิ่มขึ้น จาก 0.10 เปอร์เซ็นต์ เป็น 0.96 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณ *cis*-C18:1 ลดลง จาก 30.75 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 29.74 เปอร์เซ็นต์ แต่ปริมาณ C18:0 เพิ่มขึ้น จาก 5.15 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 5.68 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิและความดัน เป็นผลให้มีปริมาณ C18:0 และ *trans*-C18:1 โดยเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิและเพิ่มความดันจะกระตุ้นให้เกิดไฮโดรจิเนชันที่พันธะคู่มากขึ้น จึงทำให้เกิดสายโซ่อิ่มตัวหรือ C18:0 และสามารถทำให้เกิดพันธะคู่แบบทรานส์ได้มากขึ้นเนื่องจากมีความเสถียรในการจัดเรียงตัวมากกว่าพันธะคู่แบบซิส (Tsuzuki, 2010) อย่างไรก็ตาม พบว่าการเติมโลหะแมกนีเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้แม้ว่าปฏิกิริยาจะเพิ่มความดันและอุณหภูมิ แต่ก็ทำให้ปริมาณองค์ประกอบที่ติดต่อกับไบโอดีเซล คือ *cis*-C18:1 ยังคงมีปริมาณที่สูงมากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เติมโลหะแมกนีเซียม ซึ่งถือเป็นผลดี สาเหตุที่ปริมาณของ *cis*-C18:1 สูง เนื่องมาจาก แมกนีเซียมออกไซด์ ทำให้มีความเป็นเบส (ให้อิเล็กตรอน)แก่ตัวรองรับและอนุภาคของโลหะนิกเกิลมากขึ้น จึงเป็นผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างการดูดซับและระหว่างการไฮโดรจิเนตของโมเลกุลไบโอดีเซลจึงทำให้ไบโอดีเซลที่ถูกคายออกมาจะอยู่ในรูปของพันธะคู่แบบซิสมากกว่าแบบทรานส์ จึงทำให้มีปริมาณของ *cis*-C18:1 มากกว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS (Thunyaratchatanon et al., 2016a) ทั้งนี้ องค์ประกอบของไบโอดีเซล ยังเกิดจากอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อองค์ประกอบเช่นเดียวกันคือน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักไบโอดีเซล ซึ่งจะขออธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.11 องค์ประกอบของคาร์บอน 18 อะตอม ในโพลีโอดีเซลหลังปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันบางส่วน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS

4.4.3 การเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS

รูปที่ 4.12 แสดงถึงการเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดัน ทำให้การเปลี่ยนผัน ของ C18:2 และ C18:3 ได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงยังมีผลเนื่องมาจากปัจจัยของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อโอดีเซล จึงอธิบายในหัวข้อถัดไป

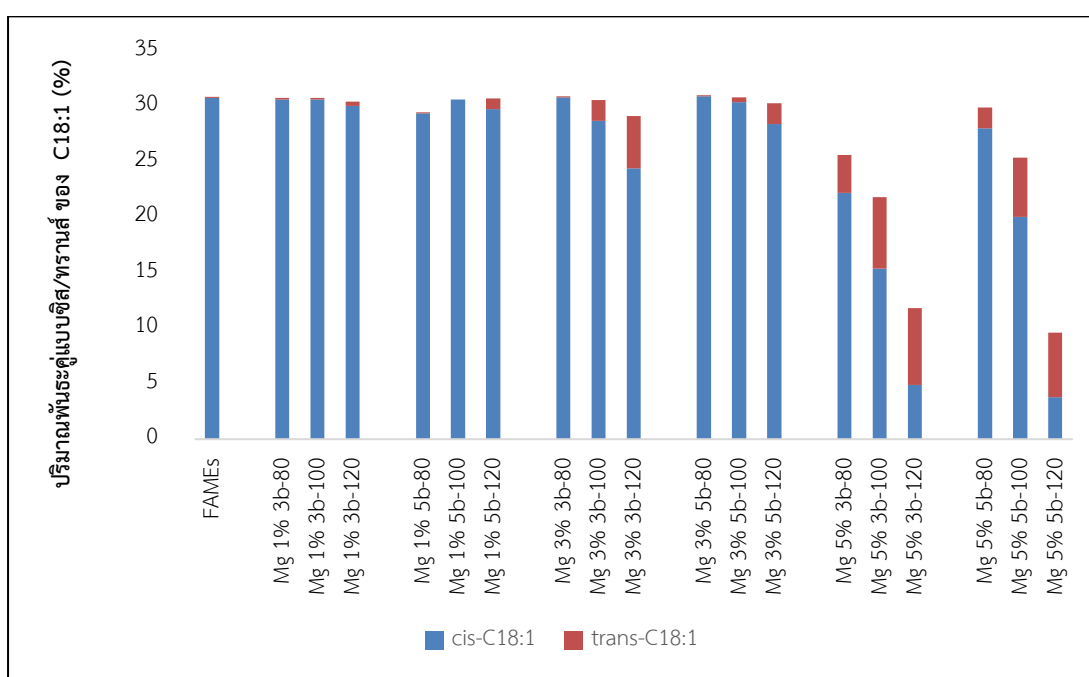


รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS

4.4.4 ปริมาณของ *cis*-C18:1 และ *trans*-C18:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS

จากรูปที่ 4.13 แสดงปริมาณของ *cis*-C18:1 และ *trans*-C18:1 ทั้งก่อนและหลังไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS พบว่า ก่อนไฮโดรจิเนชันมีปริมาณของ *cis*-C18:1 อยู่ 30.75 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณ *trans*-C18:1 อยู่ 0.10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วนที่เพิ่มอุณหภูมิ พบว่า จะมีปริมาณของ *trans*-C18:1 มากขึ้น และจะให้ปริมาณของ *cis*-C18:1 ลดลง จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 80 และ 100 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณของ *trans*-C18:1 ไม่มากนัก แต่เมื่อใช้อุณหภูมิสูง (120 องศาเซลเซียส) จะให้ปริมาณ *trans*-C18:1 เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ขณะเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลจากการเพิ่มความดันเป็น 5 บาร์ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS ก็มีการให้ปริมาณ *cis*-C18:1 ที่ลดลง เมื่อเทียบกับที่ให้ความดัน 3 บาร์ และเมื่อพิจารณาผลของความดัน 5 บาร์ ที่อุณหภูมิสูง (120 องศาเซลเซียส) จะให้ปริมาณ *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ซึ่งทำให้สรุปได้ว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

Ni-Mg/CS จะทำให้สามารถลดปริมาณองค์ประกอบของ *trans*-C18:1 ซึ่งไม่ติดต่อสมบัติไบโอดีเซล ได้จริง และให้ปริมาณ *cis*-C18:1 ที่ลดลงเพียงเล็กน้อยหลังปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ติดต่อไบโอดีเซล เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS อย่างไรก็ตามหากให้ความดันและอุณหภูมิที่มากขึ้น ก็สามารถทำให้เกิดปริมาณของ *trans*-C18:1 ได้มากขึ้นเช่นกัน และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไบโอดีเซล ก็มีผลต่อปริมาณของ *cis*-C18:1 และ *trans*-C18:1 เช่นเดียวกัน ดังอธิบายในหัวข้อถัดไป



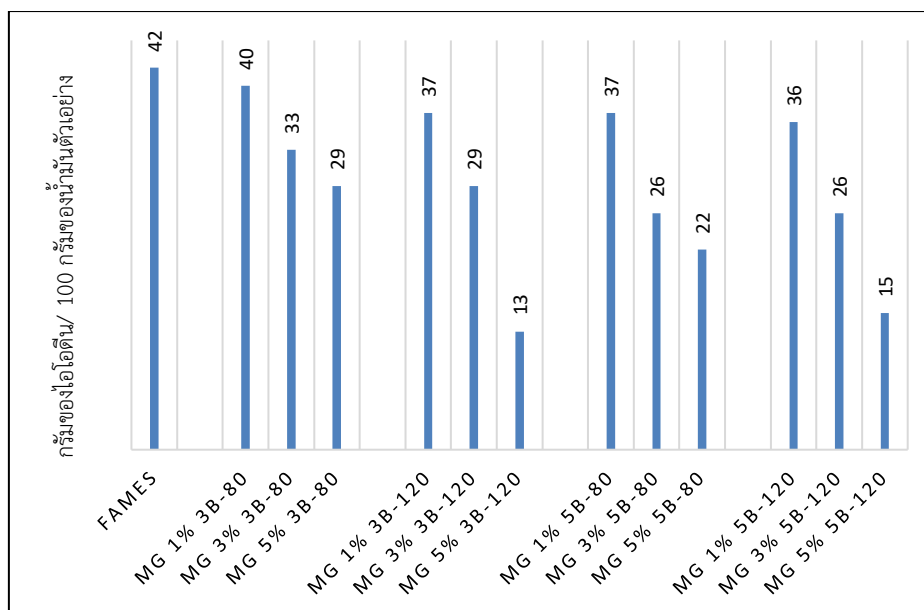
รูปที่ 4.13 ปริมาณของ *cis*-C18:1 และ *trans*-C18:1 หลังปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS

4.5 ผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS

4.5.1 พันธะคู่ของไบโอดีเซล

การทดสอบค่าไอโอดีนโดยการไทเทรต เพื่อหาปริมาณพันธะคู่ในไบโอดีเซลในสภาวะหลังการทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน ในกรณีการทดลองที่ใช้น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักไบโอดีเซลที่ 1 เปอร์เซ็นต์ 3 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อไบโอดีเซล ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อ เพิ่มน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักไบโอดีเซล จะทำให้ปริมาณของพันธะคู่ลดลง เนื่องจากปริมาณของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มมากขึ้นจากสามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันได้มากขึ้น จึงทำให้ปริมาณพันธะคู่ลดลงนั่นเอง แนวโน้มเช่นเดียวกันกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS จะทำให้มีปริมาณของพันธะคู่มากกว่าการใช้ Ni/CS เมื่อเปรียบเทียบที่สภาวะเดียวกัน

เนื่องจากเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS ที่มีน้ำหนักมากขึ้น ก็ต้องมีปริมาณของโลหะแมกนีเซียมออกไซด์มากขึ้น ซึ่งมีความเป็นเบส จึงสามารถให้อิเล็กตรอนแก่อนุภาคของโลหะและตัวรองรับได้มาก ทำให้มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนได้มากขึ้น (Thunyaratchatanon et al., 2016a) ดังนั้นการที่จะถูกไฮโดรจิเนตในพันธะคู่จึงน้อยลง เป็นผลให้ปริมาณของพันธะคู่จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS มากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS



รูปที่ 4.14 กรัมของไอโอดีน/100 กรัมของน้ำมันตัวอย่างบ่งบอกถึงปริมาณของพันธะคู่ในไบโอดีเซล เมื่อผ่านไฮโดรจีเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS ต่อน้ำหนักไบโอดีเซล

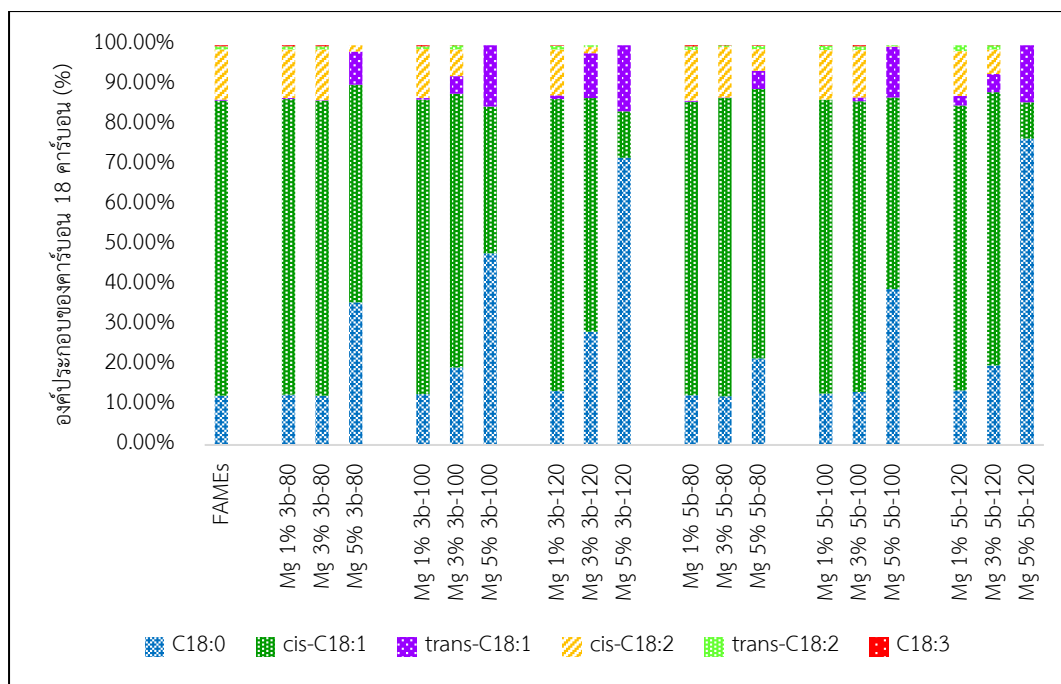
4.5.2 องค์ประกอบของไบโอดีเซล

องค์ประกอบของไบโอดีเซลเมื่อผ่านปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS โดยเน้นที่องค์ประกอบของ คาร์บอน 18 อะตอม ในสายโซ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 อธิบายที่สถานะการทดลองโดยอธิบายผลจากการเพิ่มอุณหภูมิและความดันได้ดังนี้

ที่สถานะไฮโดรจีเนชันของไบโอดีเซลที่ Mg 1% 3b-80 หลังทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า C18:3 มีปริมาณเท่าเดิมคือ 0.11 เปอร์เซ็นต์ ส่วน C18:2 ก็มีปริมาณที่ลดลงจาก 5.58 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 5.36 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบของ *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้น จาก 0.10 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 0.14 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณ *cis*-C18:1 ลดลง จาก 30.75 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 30.60 เปอร์เซ็นต์ และ C18:0 เพิ่มขึ้นจาก 5.15 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 5.22 เปอร์เซ็นต์ ที่สถานะไฮโดรจีเนชันของไบโอดีเซลที่ Mg 3% 3b-80 หลังทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า C18:3 มีปริมาณ 0.11 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.10 เปอร์เซ็นต์ ส่วน C18:2 ก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 5.58 เปอร์เซ็นต์ เป็น 5.62 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบของ *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้น จาก

0.10 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.09 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณ *cis*-C18:1 เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จาก 30.75 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 30.77 เปอร์เซ็นต์ และ C18:0 เท่าเดิมคือ 5.15 เปอร์เซ็นต์ ที่สภาวะไฮโดรจิเนชันของไบโอดีเซลที่ Mg 5% 3b-80 หลังทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า C18:3 มีปริมาณลดลง เหลือ 0.00 เปอร์เซ็นต์ ส่วน C18:2 ก็มีปริมาณที่ลดลงจาก 5.58 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.64 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบของ *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้น จาก 0.10 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 3.38 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณ *cis*-C18:1 ลดลง จาก 30.75 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 22.19 เปอร์เซ็นต์ และ C18:0 เพิ่มขึ้นจาก 5.15 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 14.55 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มอุณหภูมิและความดันเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิความดัน เปรียบเทียบที่สภาวะ 5% 5b-120 จะให้ปริมาณของ C18:0 มากที่สุด เท่ากับ 41.24 เปอร์เซ็นต์, *cis*-C18:1 ปริมาณ 0.31 เปอร์เซ็นต์ และ *trans*-C18:1 ปริมาณ 0.41 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Mg 5% 5b-120 ให้ปริมาณ C18:0 เท่ากับ 31.46 เปอร์เซ็นต์, *cis*-C18:1 ให้ปริมาณ 3.76 เปอร์เซ็นต์ และ *trans*-C18:1 ให้ปริมาณ 5.84 เปอร์เซ็นต์ ในสภาวะการเพิ่มอุณหภูมิ ความดัน และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS และ Ni-Mg/CS จะให้ปริมาณของ C18:0 เพิ่มขึ้น, *cis*-C18:1 ลดลง, *trans*-C18:1 เพิ่มขึ้น และ C18:3 ลดลงเช่นกัน แต่สำหรับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS พบว่าจะให้ C18:0 และ *trans*-C18:1 ในปริมาณที่น้อยกว่าการใช้ Ni/CS และให้ ปริมาณ *cis*-C18:1 และ C18:3 มากกว่าการใช้ Ni/CS ซึ่งเป็นข้อดี ถึงแม้ว่าการใช้ Ni-Mg/CS จะให้การเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 น้อยกว่า Ni/CS แต่ปริมาณพันธะคู่ที่เหลืออยู่ก็เป็น *cis*-C18:1 ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ดี ในไบโอดีเซล

จึงสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิ ความดัน และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้เกิดองค์ประกอบ C18:0 และ *trans*-C18:1 ในปริมาณมาก (Piqueras et al., 2006) และทำให้ปริมาณของ *cis*-18:1 และ C18:3 ลดลง ซึ่งไม่ติดต่อสมบัติไบโอดีเซล แต่อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS ในสภาวะอุณหภูมิ ความดัน และน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ก็สามารถปรับปรุงไบโอดีเซลให้มีสมบัติที่ดีขึ้น



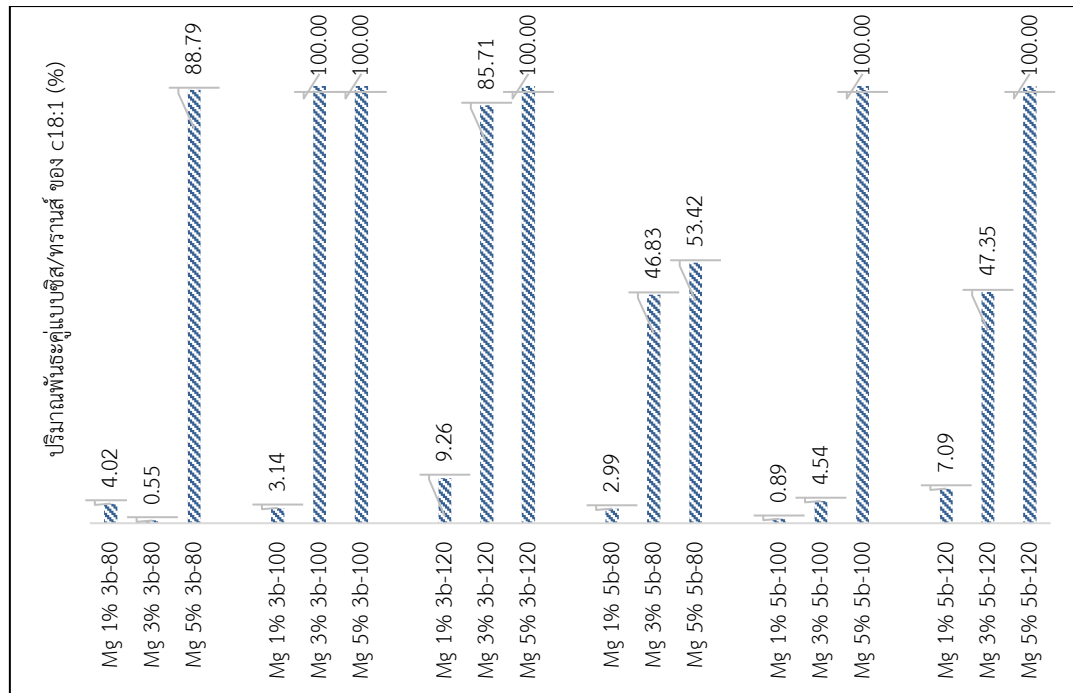
รูปที่ 4.15 แสดงถึงองค์ประกอบของคาร์บอน 18 อะตอม ในไปโอดีเซลหลังปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันบางส่วน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ, ความดันและน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS

4.5.3 การเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS

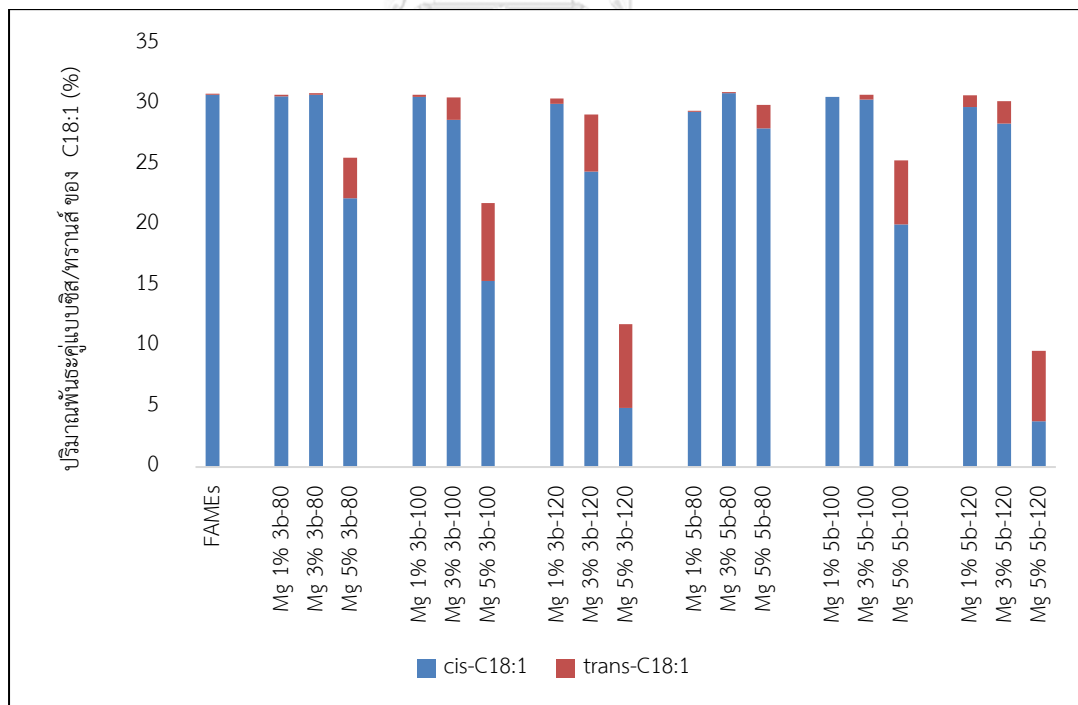
รูปที่ 4.16 แสดงถึงการเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 เมื่อน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ni-Mg/CS ที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ปริมาณการเปลี่ยนผันที่น้อย จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้การเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 ได้มากขึ้น โดยเฉพาะที่น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาสูง (5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตัวเร่งต่อน้ำหนักไปโอดีเซล) (Lin et al., 2013) และยิ่งที่สภาวะที่อุณหภูมิสูง (120 องศาเซลเซียส) จะให้ปริมาณการเปลี่ยนผันสูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์

4.5.4 ปริมาณของ *cis*-C18:1 และ *trans*-C18:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS

จากรูปที่ 4.17 แสดงปริมาณของ *cis*-C18:1 และ *trans*-C18:1 ทั้งก่อนและหลังไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซล ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS เมื่อเพิ่มน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไบโอดีเซล พบว่า ก่อนไฮโดรจิเนชันมีปริมาณของ *cis*-C18:1 อยู่ 30.75 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณ *trans*-C18:1 อยู่ 0.10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วนที่เพิ่มน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักไบโอดีเซล พบว่า จะมีปริมาณของ *trans*-C18:1 มากขึ้น และจะให้ปริมาณของ *cis*-C18:1 ลดลง โดยเฉพาะที่น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์, ความดัน 3 บาร์ และอุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณ *trans*-C18:1 สูงขึ้น ตามลำดับ แต่เมื่อการใช้น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดัน 5 บาร์ กลับพบว่ามีปริมาณ *trans*-C18:1 น้อยกว่าที่ความดัน 3 บาร์ อย่างไรก็ตามจากปฏิกิริยาทั้งหมดจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS และ Ni-Mg/CS จึงสามารถอธิบายได้ว่า การใช้น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากขึ้น, การเพิ่มอุณหภูมิ และการเพิ่มความดัน มักจะทำให้ปริมาณ *trans*-C18:1 สูงขึ้นเสมอ เนื่องจากสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาจนทำให้พันธะคู่แบบซิสที่มีความเสถียรน้อยกว่าแบบทรานส์ สามารถกลายเป็นแบบทรานส์ เป็นสาเหตุให้ปริมาณทรานส์เพิ่มสูงขึ้นด้วยปัจจัยดังกล่าว อีกทั้งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ni-Mg/CS ยังให้ปริมาณของ *cis*-C18:1 มากกว่าการใช้ Ni/CS และให้มีปริมาณ *trans*-C18:1 น้อยกว่าการใช้ Ni/CS เนื่องจากการเติมแมกนีเซียม ทำให้มีความเป็นเบส (ให้อิเล็กตรอน)แก่ตัวรองรับและอนุภาคของโลหะนิกเกิลมากขึ้นจึงเป็นผลให้เกิดอันตรกิริยาอย่างอ่อนในระหว่างการดูดซับและระหว่างการไฮโดรจิเนตของโมเลกุลไบโอดีเซลจึงทำให้ไบโอดีเซลที่ถูกคายออกมาจะอยู่ในรูปของพันธะคู่แบบซิสมากกว่าแบบทรานส์ (Thunyaratchatanon et al., 2016a) จึงทำให้มีปริมาณของ *cis*-C18:1 มากกว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนผันของ C18:2 และ C18:3 เมื่อเพิ่มน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS

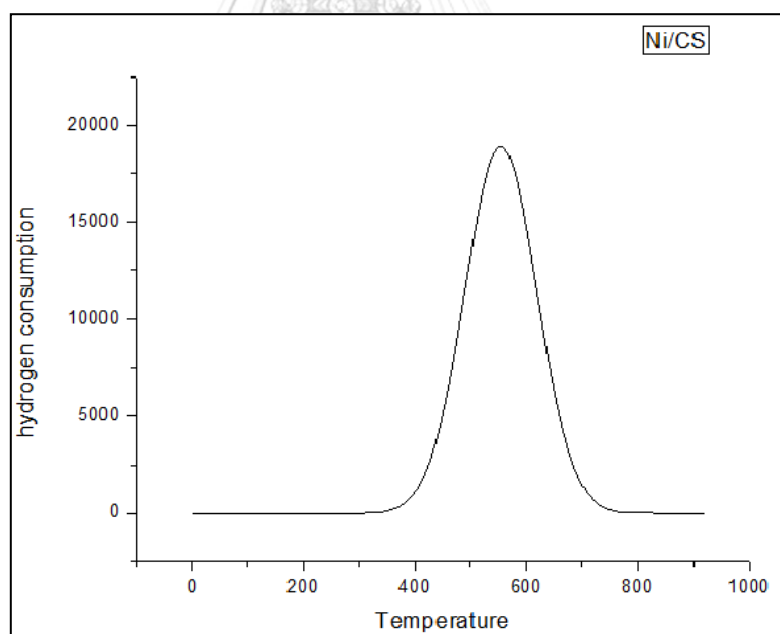


รูปที่ 4.17 ปริมาณของ cis-C18:1 และ trans-C18:1 หลังปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันบางส่วน เปรียบเทียบเมื่อเพิ่มน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS

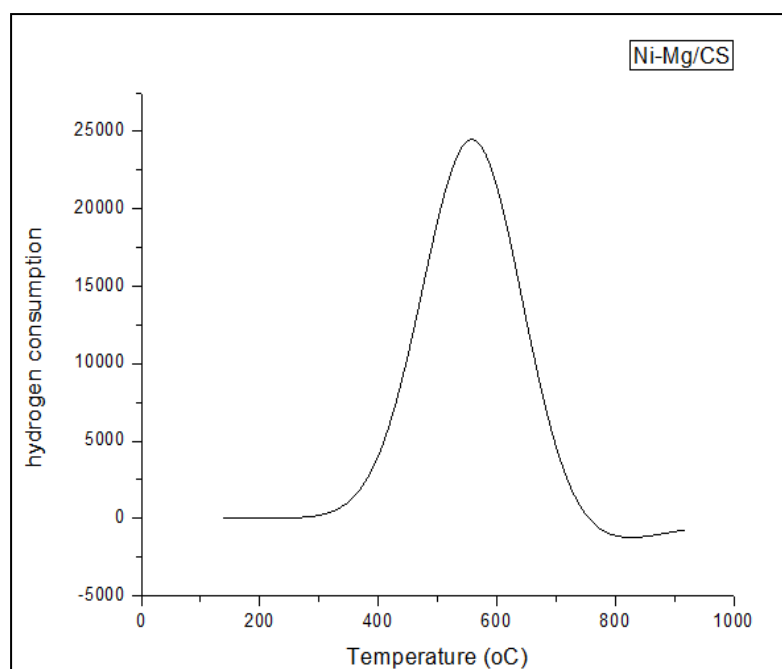
4.6 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

4.6.1 ตรวจสอบพฤติกรรมเกิดการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (temperature programmed reduction by hydrogen gas, H₂-TPR)

เพื่อศึกษาการใช้ปริมาณไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยารีดักชันตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ni/CS ดังแสดง ภาพที่ 4.18 จะพบว่าเกิดอุณหภูมิรีดักชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ในขณะที่ภาพที่ 4.19 แสดงการทำปฏิกิริยารีดักชันกับตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ni-Mg/CS จะให้อุณหภูมิรีดักชันที่ 570 องศาเซลเซียส การที่เติมโลหะแมกนีเซียมแล้วทำให้เกิดอุณหภูมิรีดักชันที่สูงขึ้น เนื่องจากโลหะแมกนีเซียมสามารถให้อิเล็กตรอนแก่อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลและให้อิเล็กตรอนแก่ตัวรองรับได้ จึงเป็นผลให้มีความแข็งแรงมากขึ้น จึงต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากขึ้นเพื่อให้เกิดรีดักชัน (Thunyaratchanon et al., 2016a)



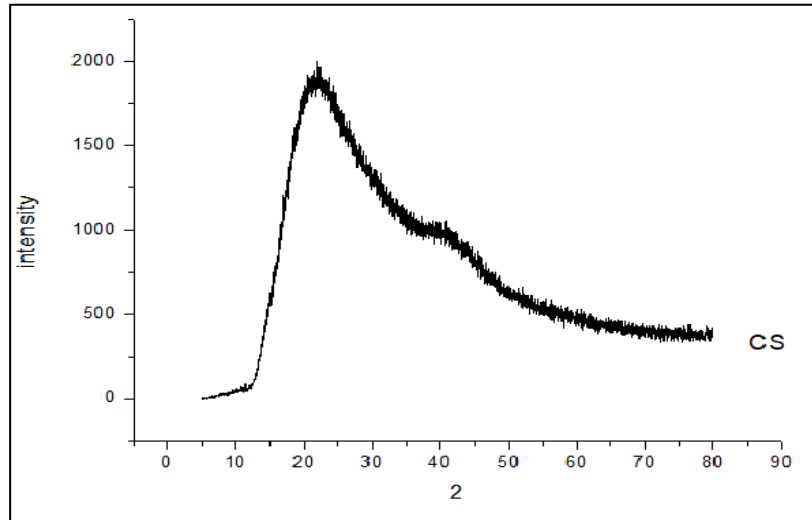
รูปที่ 4.18 อุณหภูมิการรีดักชัน ที่ 550 องศาเซลเซียส ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS



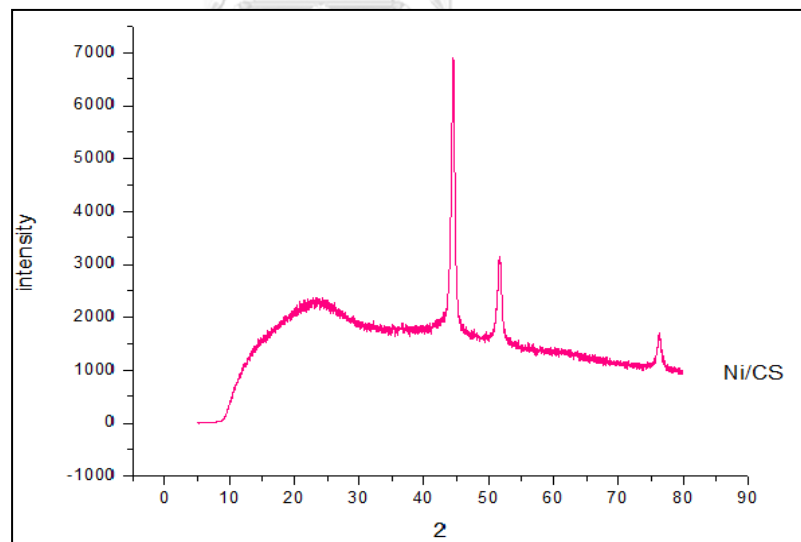
รูปที่ 4.19 อุณหภูมิการรีดักชัน ที่ 570 องศาเซลเซียส ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS

4.6.2 การวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของผลึก (X-ray diffraction)

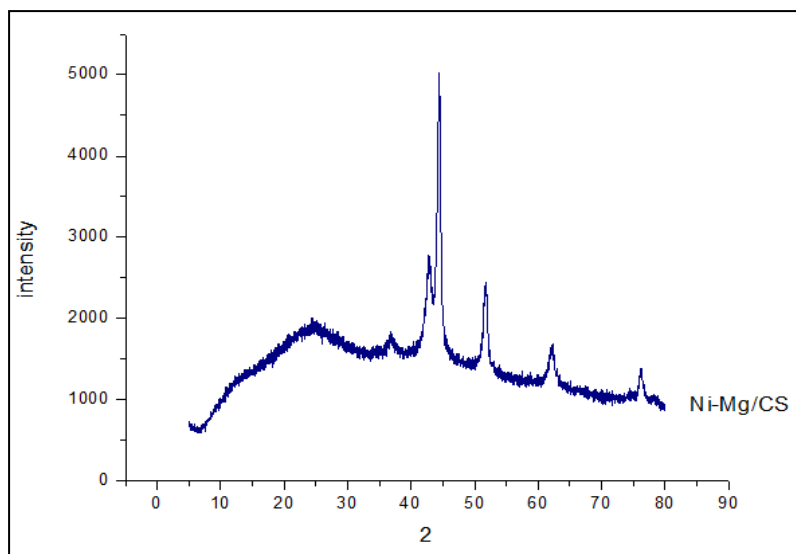
รูปที่ 4.20 แสดง ถึงสัญญาณของคาร์บอน ที่ 2θ ที่ 22 เป็นพีคขนาดกว้างแสดงถึงความ เป็นอสัณฐานของคาร์บอน รูปที่ 4.21 แสดงถึงรูปแบบของผลึกโลหะของนิกเกิลออกไซด์ ที่ 2θ ขึ้นที่ 44.52, 56.78 และ 77.98 และยังคงปรากฏพีคของอสัณฐานของคาร์บอนในช่วงแรก และ รูปที่ 4.22 แสดงถึงรูปแบบของผลึกโลหะของนิกเกิลออกไซด์เมื่อมีการเติมโลหะแมกนีเซียมลงไป พบว่าขึ้น 2θ ที่ 37.42, 44.56, 55.23, 67.24 และ 77.99



รูปที่ 4.20 สัญญาณของคาร์บอน



รูปที่ 4.21 รูปแบบของผลึกโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS



รูปที่ 4.22 รูปแบบของผลึกโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS

4.6.3 วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของอนุภาคด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซ (Nitrogen adsorption-desorption)

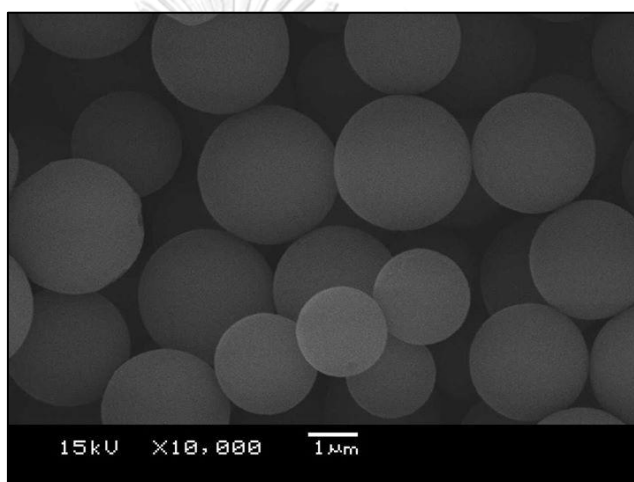
ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว(ตร.ม./ก.)	ปริมาตรรูพรุน (ลบ. ซม./ก.)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)
CS	2.4637	0.000418	20.128
Ni/CS	245.3501	0.085671	27.3612
Ni-Mg/CS	308.3334	0.103596	27.7748

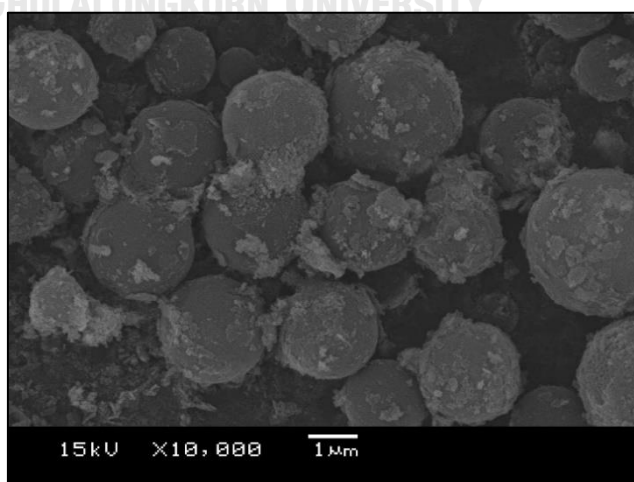
จะเห็นได้ว่าก่อนมีการเติมโลหะนิกเกิลและโลหะแมกนีเซียมลงบนตัวรองรับคาร์บอนตัวรองรับคาร์บอนมีพื้นที่ผิวที่ต่ำมาก แต่เมื่อเติมโลหะทั้งสองลงบนตัวรองรับคาร์บอนแล้ว จะเห็นได้ว่ามีขนาดพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นอย่างมาก สาเหตุเพราะ โลหะนอกจากจะเกาะบนตัวรองรับแล้วทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นแล้ว ยังเกิดพันธะระหว่างโลหะกับโลหะที่อยู่ต่างตัวรองรับระหว่างกันอีก จึงทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนก็มีขนาดใหญ่มากขึ้น เนื่องจากพันธะระหว่างโลหะกับโลหะก็สามารถทำให้เกิดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ได้

4.6.4 การทดสอบลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยา (Scanning electron microscope, SEM)

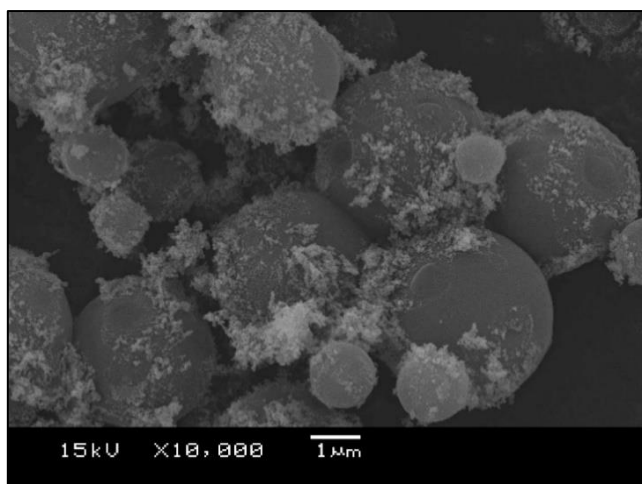
รูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นถึงสัณฐานของตัวรองรับคาร์บอนที่มีทรงกลม (CS) รูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นถึงตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ni/CS จะเห็นว่าโลหะนิกเกิลบนพื้นผิวคาร์บอนสามารถกระจายได้ทั่วบนตัวรองรับคาร์บอน และรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นถึงตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ni-Mg/CS ดังภาพจะเห็นว่าโลหะสีขาวที่เกิดขึ้นคือโลหะของแมกนีเซียมการกระจายตัวบนโลหะนิกเกิลที่อยู่บนตัวรองรับคาร์บอน



รูปที่ 4.23 SEM ของตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม (CS)



รูปที่ 4.24 SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS



รูปที่ 4.25 SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS

4.6.5 สมบัติของไบโอดีเซล

ตารางที่ 4.3 สมบัติของไบโอดีเซลก่อนและหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน

ตัวอย่าง	จำนวน กรัม ของไอโอดีน / 100 กรัม ของ น้ำมันตัวอย่าง	ค่าความเสถียรต่อ การทำปฏิกิริยากับ ออกซิเจน (Oxidative stability) (ชั่วโมง)	จุดขุ่นมัว (cloud point) (องศาเซลเซียส)	จุดไหลเท (pour point) (องศาเซลเซียส)
ไบโอดีเซล (FAME)	42	10.88	17	16
3% 3b-80	28	13.77	21	17
3% 3b-100	26	64.17	22	21
3% 5b-80	25	6.45	21	17
Mg 1% 3b-80	40	0.04	16	16
Mg 1% 5b-100	36	12.20	16	16
Mg 3% 3b-80	33	26.37	16	16
Mg 3% 5b-80	28	28.96	16	16

ค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ (Oxidative stability), จุดขุ่นมัว (cloud point : CP) และจุดจุดตันไส้กรองที่อุณหภูมิต่ำไหลเท (pour point : PP) ของไบโอดีเซล ก่อนและหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงถึงผลของไบโอดีเซล ก่อนไฮโดรจิเนชันบางส่วนอยู่ที่ 10.88 ชั่วโมง และหลังจากจากการไฮโดรจิเนชันบางส่วนไปแล้ว 4 ชั่วโมง พบว่าการทดลองที่สภาวะ 3% 5b-80 และ Mg 1% 3b-80 มีค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนต่ำกว่า ไบโอดีเซลก่อนไฮโดรจิเนชันบางส่วน เนื่องจากมีปริมาณของ C18:2 และ C18:3 มาก อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ความดัน และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักไบโอดีเซล พบว่าทำให้ค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากการเพิ่มปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้มีปริมาณของพันธะคู่ (C18:2 และ C18:3) ลดลง กลายเป็นพันธะเดี่ยว (C18:0) มากขึ้น ทำให้ค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนเพิ่มขึ้น อีกทั้งเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS จะให้ค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนสูงกว่าการที่ไม่มีโลหะแมกนีเซียม

ค่าจุดขุ่นมัว หรือ cloud point บอถึงอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่น้ำมันเริ่มเป็นไข และทำให้จุดตันการไหลของน้ำมัน และค่าการไหลเท หรือ pour point บออุณหภูมิที่ต่ำที่สุด ที่น้ำมันเริ่มไม่ไหล แต่ยังไม่เกิดเป็นไขมาขัดขวาง ซึ่งค่า pour point จะต่ำกว่าค่า cloud point เสมอ ปริมาณของ C18:0 มีผลต่อค่าจุดขุ่นมัว (cloud point : CP) และค่าจุดจุดตันไส้กรองที่อุณหภูมิต่ำไหลเท (pour point : PP) เนื่องจาก หากมีปริมาณของ C18:0 สูง ค่าจุดขุ่นมัวและค่าจุดจุดตันไส้กรองที่อุณหภูมิต่ำไหลเทก็จะสูง ทำให้เกิดเป็นผลึกจุดตันในไส้กรองของเครื่องยนต์ได้ง่ายและทำให้ค่าการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำไม่ดี จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS ให้ค่าจุดขุ่นมัวและค่าจุดจุดตันไส้กรองที่อุณหภูมิต่ำไหลเทต่ำลง มากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS จึงเป็นผลดีต่อการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ (Fabian Sierra-Cantor and Alberto Guerrero-Fajardo, 2017)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อสังเคราะห์คาร์บอนทรงกลมเป็นตัวรองรับและโลหะนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีการเติมโลหะแมกนีเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสนับสนุน เพื่อนำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซล มีการศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้และสมบัติของไบโอดีเซลหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน ทั้งนี้สมบัติที่ศึกษาประกอบไปด้วย วิเคราะห์องค์ประกอบโดยก๊าซโครมาโตกราฟี พฤติกรรมการรีดักชัน และสัณฐานวิทยา ซึ่งมีการศึกษาความแตกต่างของตัวเร่งปฏิกิริยาและสภาวะต่างๆจากการทดลอง คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS และ Ni-Mg/CS ถูกนำมาทดลองปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลด้วยความแตกต่างในสภาวะ ดังนี้ สภาวะที่ 1 กำหนดการใช้อุณหภูมิในการทำไฮโดรจิเนชัน 80, 100 และ 120 องศาเซลเซียส สภาวะที่ 2 กำหนดการใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 และ 5 บาร์ และสภาวะที่ 3 กำหนดการใช้น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักไบโอดีเซลเป็น 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก จากนั้นทำวิเคราะห์และสรุปผลของตัวเร่งปฏิกิริยาและไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วนได้ดังนี้

1) การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบไปด้วย ตัวรองรับคาร์บอนทรงกลม โลหะนิกเกิลเร่งปฏิกิริยา และโลหะแมกนีเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสนับสนุน พบว่ามีรูปแบบของผลึกโลหะตามต้องการ คือ รูปแบบผลึกของนิกเกิลออกไซด์ อีกทั้งการเติมโลหะแมกนีเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสนับสนุน ยังสามารถทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความแข็งแรงระหว่างอนุภาคโลหะและตัวรองรับได้มากขึ้นจากการตรวจสอบพฤติกรรมการรีดักชัน

2) สมบัติและองค์ประกอบของไบโอดีเซล

การเพิ่มอุณหภูมิ ความดัน และน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักไบโอดีเซล ทำให้มีปริมาณของพันธะคู่ได้ลดลง และมีองค์ประกอบที่ไม่ดีต่อสมบัติไบโอดีเซลเพิ่มมากขึ้น และลดปริมาณองค์ประกอบที่ดี แต่อย่างไรก็ตามการเติมโลหะแมกนีเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสนับสนุน พบว่าสามารถเพิ่มองค์ประกอบที่ดี และลดองค์ประกอบที่ไม่ดีต่อไบโอดีเซลได้ อีกทั้งเมื่อปริมาณของพันธะคู่ (C18:2 และ C18:3) น้อยลง ทำให้ค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนสูงขึ้น และหาก

ปริมาณของพันธะเดี่ยว หรือพันธะอิมตัว (C18:0) น้อยลง จะทำให้ค่าจุดขุ่นมัวและจุดไหลเท เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย โดยพบว่าการเติมโลหะแมกนีเซียม จะทำให้ไบโอดีเซลที่ได้มีค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนสูงขึ้น

3) สันฐานวิทยา

มีการกระจายตัวของโลหะนิกเกิล และโลหะแมกนีเซียมบนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมสามารถเห็นได้จากสันฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา และยังพบได้ว่าเมื่อเติมโลหะนิกเกิล และแมกนีเซียมลงไปแล้ว สามารถทำให้พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้นได้สูง เนื่องจากเกิดพันธะของโลหะระหว่างตัวรองรับจึงทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น และรูพรุนระหว่างพันธะก็สามารถเกิดได้มากเช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาปริมาณของโลหะที่เติมลงในตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วนของไบโอดีเซลที่สภาวะต่างๆ
- 2) ศึกษาตัวรองรับชนิดอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบปริมาณขององค์ประกอบที่ดีต่อสมบัติไบโอดีเซล
- 3) ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสับสนุนชนิดอื่น เพื่อพัฒนาและปรับปรุงสมบัติไบโอดีเซล

รายการอ้างอิง

- ALSOBAAI, A. M., SHAIBANI, A. M. M., MOUSTAFA, T. & DERHEM, A. 2012. Effect of hydrogenation temperature on the palm mid-fraction fatty acids composition and conversion. *Journal of King Saud University*, 24, 45-51.
- BOONROD, B., PRAPAINAINAR C., NARATAARUKSA, P., KANTAMA, A., SAIBAUTONG, W., SUDSAKORN, K., MUNGCHAROEN, T. & PRAPAINAINAR, P. 2016. Evaluating the environmental impacts of bio-hydrogenated diesel production from palm oil and fatty acid methyl ester through life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, -, 1-12.
- FABIAN SIERRA-CANTOR, J. & ALBERTO GUERRERO-FAJARDO, C. 2017. Methods for improving the cold flow properties of biodiesel with high saturated fatty acids content : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 774-790.
- FARIED, M., SAMER, M., ABDELSALAM, E., YOUSEF, R. S., ATTIA, Y. A. & ALI, A. S. 2017. Biodiesel production from microalgae: Processes, technologies and recent advancements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 893-913.
- FERNANDEZ, M. B., TONETTO, G. M., CRAPISTE, G. H. & DAMIANI, D. E. 2007. Revisiting the hydrogenation of sunflower oil over a Ni catalyst. *Journal of food engineering*, 82, 199-208.
- IIDA, H., ITOH, D., MINOWA, S., YANAGISAWA, A. & IGARASHI, A. 2015. Hydrogenation of soybean oil over various platinum catalysts: Effect of support materials on trans fatty acid levels. *Catalysis communications*, 62, 1-5.
- JAIN, S. & SHARMA, M. P. 2014. Effect of metal contents on oxidation stability of biodiesel/diesel blends. *Fuel* 116, 14-18.
- KUMAR, N. 2017. Oxidative stability of biodiesel: Causes effects and prevention. *Fuel*, 190, 328-350.
- LIN, R., ZHU, Y. & TAVLARIDES, L. L. 2013. Mechanism and kinetics of thermal decomposition of biodiesel fuel. *Fuel*, 106, 593-604.

- MAKAREVICIENE, V., KAZANCEV, K. & KAZANCEVA, I. 2015. Possibilities for improving the cold flow properties of biodiesel fuel by blending with butanol. *Renewable Energy*, 75, 805-807.
- MCARDLE, S., GIRISH, S., LEAHY, L. L. & CURTIN, T. 2011. Selective hydrogenation of sunflower oil over noble metal catalysts. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 351, 179-187.
- NUMWONG, N., LUENGNARUEMITCHAI, A., CHOLLACOOP, N. & YOSHIMURA, Y. 2012a. Effect of silica dioxide pore size on partial hydrogenation of rapeseed oil-derived FAMES. *Applied Catalysis A : General*, 441-442, 72-78.
- NUMWONG, N., LUENGNARUEMITCHAI, A., CHOLLACOOP, N. & YOSHIMURA, Y. 2012b. Partial hydrogenation of polyunsaturated fatty acid methyl esters over Pd/activated carbon: Effect of type of reactor. *Chemical Engineering Journal*, 210, 173-181.
- PIQUERAS, C. M., FERNANDEZ, M. B., TONETTO, G. M., BOTTINI, B. & DAMIANI, D. E. 2006. Hydrogenation of sunflower oil on Pd catalysts in supercritical conditions: Effect of particle size. *Catalysis communications*, 7, 344-347.
- RASIMOGLU, N. & TEMUR, H. 2014. Cold flow properties of biodiesel obtained from corn oil. *Energy*, 68, 57-60.
- SALUJA, R. K., KUMAR, V. & SHAM, R. 2016. Stability of biodiesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 866-881.
- SHIN, H. Y., RYU, J. H., BAE, S. Y. & KIM, Y. C. 2013. Biodiesel production from highly unsaturated feedstock via simultaneous transesterification and partial hydrogenation in supercritical methanol. *The journal of supercritical fluids*, 82, 251-255.
- THUNYARATCHATANON, C., JITJUMNONG, J., LUENGNARUEMITCHAI, A., NUMWONG, N., CHOLLACOOP, N. & YOSHIMURA, Y. 2016a. Influence of Mg modifier on cis-trans selectivity in partial hydrogenation of biodiesel using different metal types. *Applied Catalysis A : General*, 520, 170-177.
- THUNYARATCHATANON, C., LUENGNARUEMITCHAI, A., CHOLLACOOP, N. & YOSHIMURA, Y. 2016b. Catalytic upgrading of soybean oil methyl esters by partial hydrogenation using Pd catalysts. *Fuel*, 163, 8-16.

- TONETTO, G. M., SANCHEZ, J. F., FERREIRA, M. L. & DAMIANI, D. D. 2009. Partial hydrogenation of sunflower oil: Use of edible modifiers of the cis/trans-selectivity. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 299, 88-92.
- TRAN, T. T. V., KAIPROMMARAT, S., KONGPARAKUL, S., REUBROYCHAROEN, P., GUAN, G., NGUYEN, M. H. & SAMART, C. 2016. Green biodiesel production from waste cooking oil using an environmental benign acid catalyst. *Waste Management*, 52, 367-374.
- TSUZUKI, W. 2010. cis-trans isomerization of carbon double bonds in monounsaturated triacylglycerols via generation of free radicals. *Chemistry and Physics of Lipids*, 163, 741-745.
- VASILIOU, C., BOURIAZOS, A., TSICHLA, A. & PAPAIOGIANAKIS, G. 2014. Production of hydrogenated methyl esters of palm kernel and sunflower oils by employing rhodium and ruthenium catalytic complexes of hydrolysis stable monodentate sulfonated triphenylphosphite ligands. *Applied Catalysis B: Environmental*, 158-159, 373-381.
- WRIGHT, A. J., WONG, A. & DIOSADY, L. L. 2003. Ni catalyst promotion of a cis-selective Pd catalyst for canola oil hydrogenation. *Food research international*, 36, 1069-1072.
- YANG, Q., ZHANG, J., ZHANG, L., FU, H., ZHENG, X., YUAN, M., CHEN, H. & LI, R. 2013. Ruthenium nanoparticles on colloidal carbon spheres: An efficient catalyst for hydrogenation of ethyl lactate in aqueous phase. *Catalysis communications*, 40, 37-41.



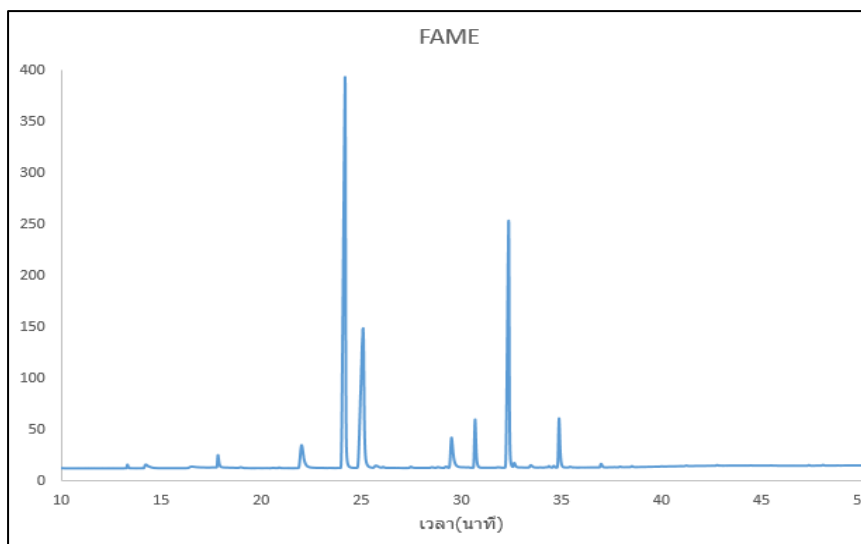
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

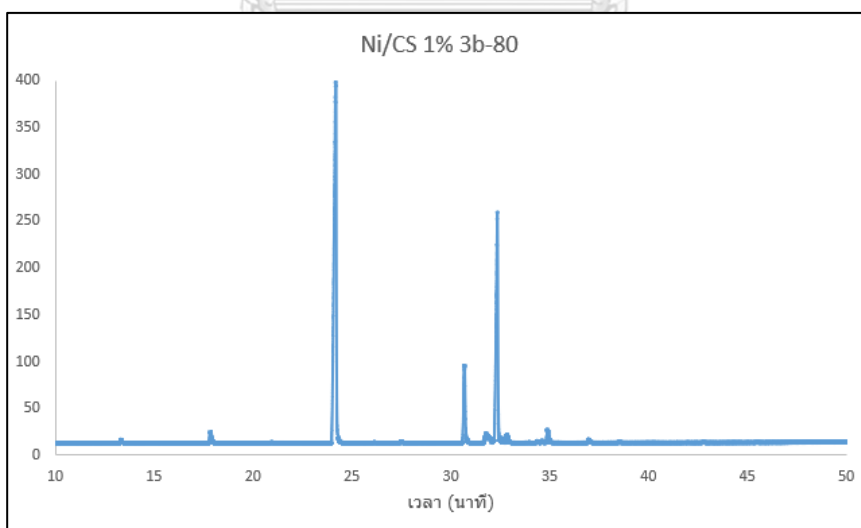
GC โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลก่อนและหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน

ก-1 GC โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลก่อนทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน

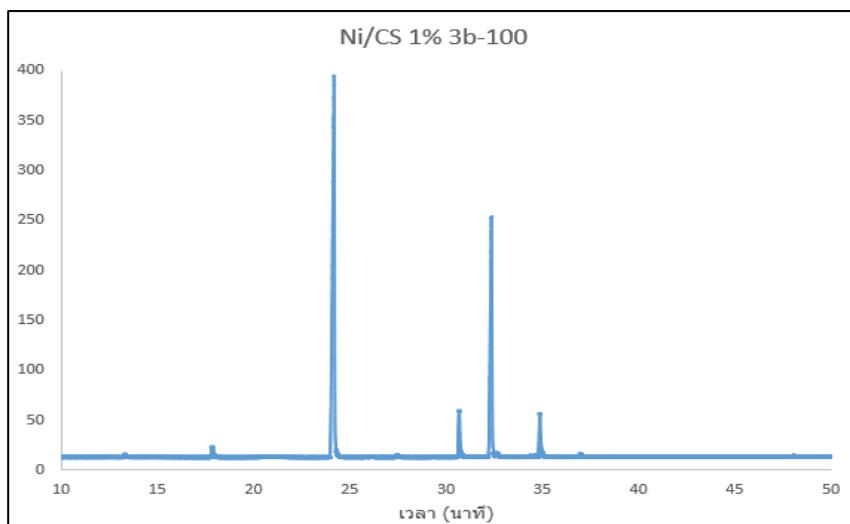


รูปที่ ก-1.1 GC โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลก่อนทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน

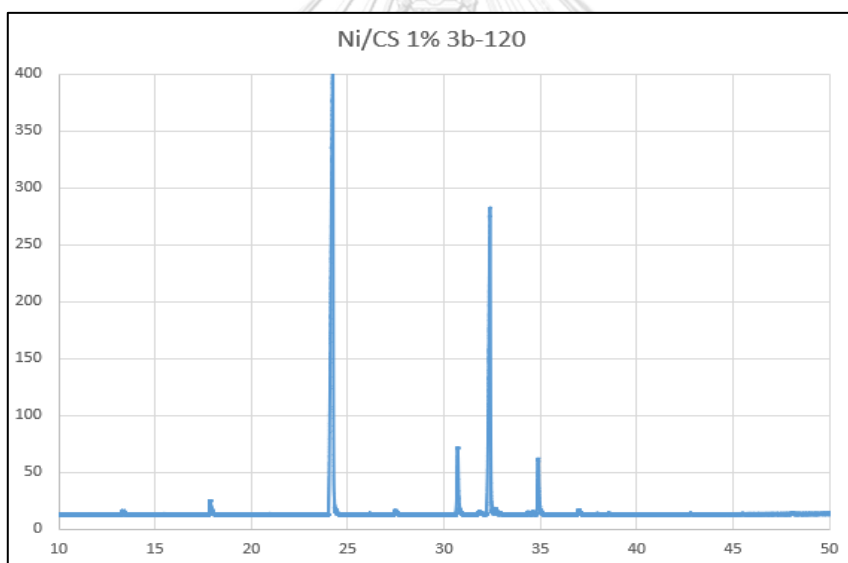
ก-2 GC โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS



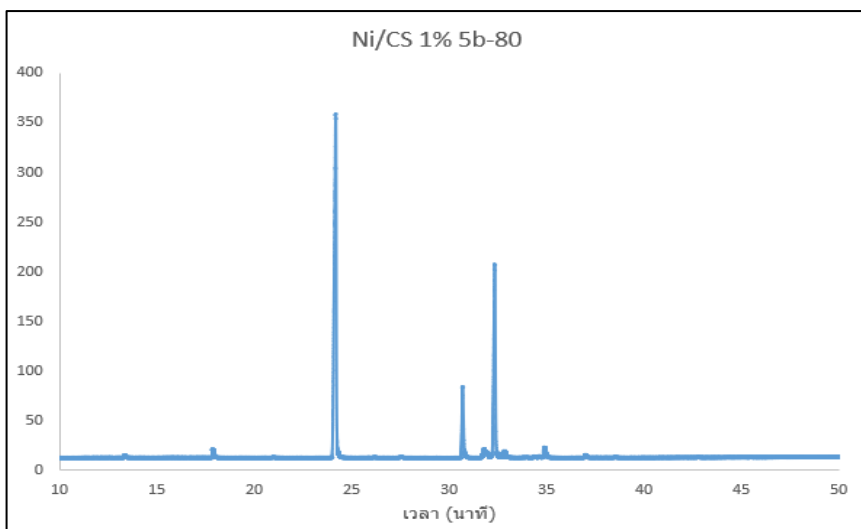
รูปที่ ก-2.1 GC โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



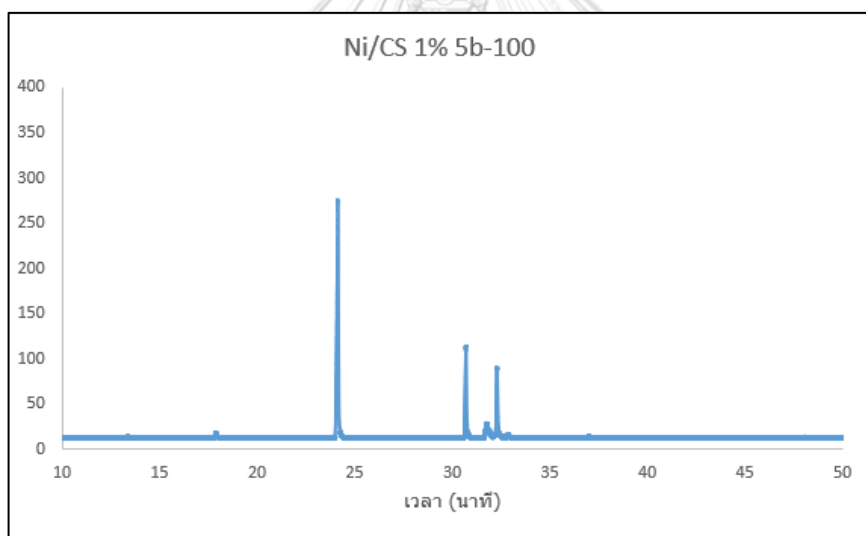
รูปที่ ก-2.2 GC โครมาโทแกรมของไปโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



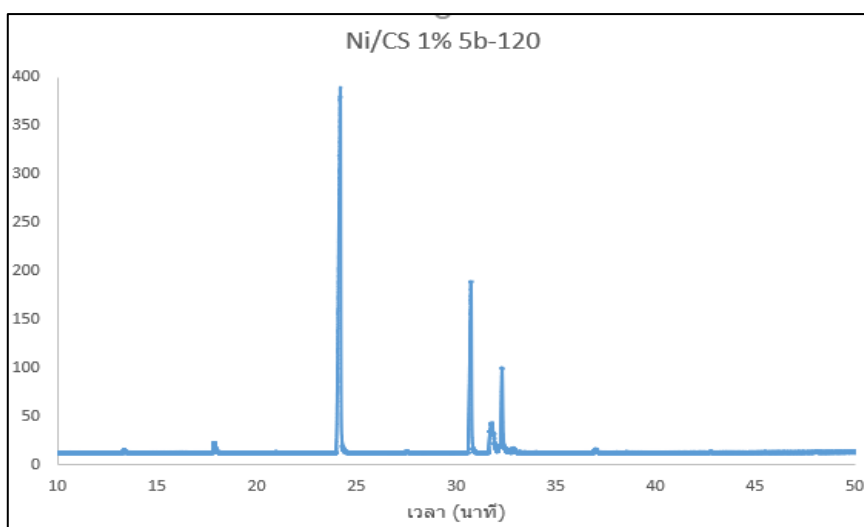
รูปที่ ก-2.3 GC โครมาโทแกรมของไปโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส



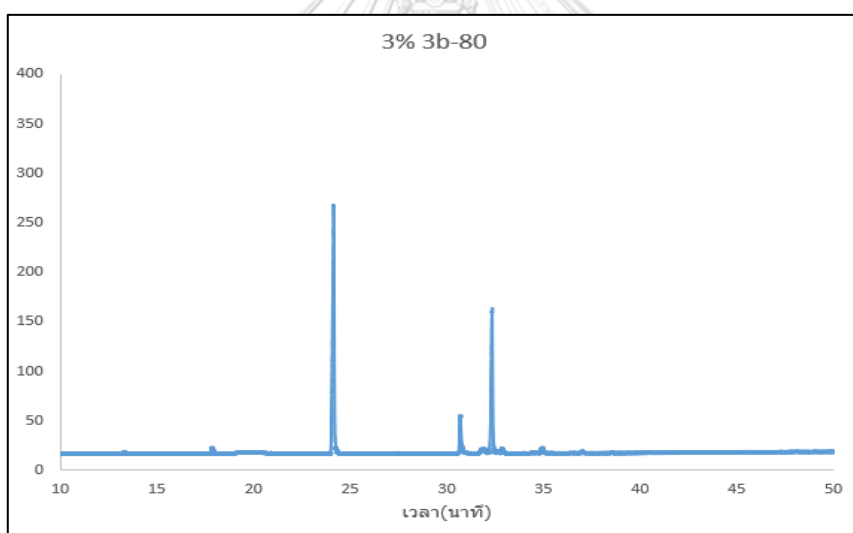
รูปที่ ก-2.4 GC โครมาโทแกรมของไปโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



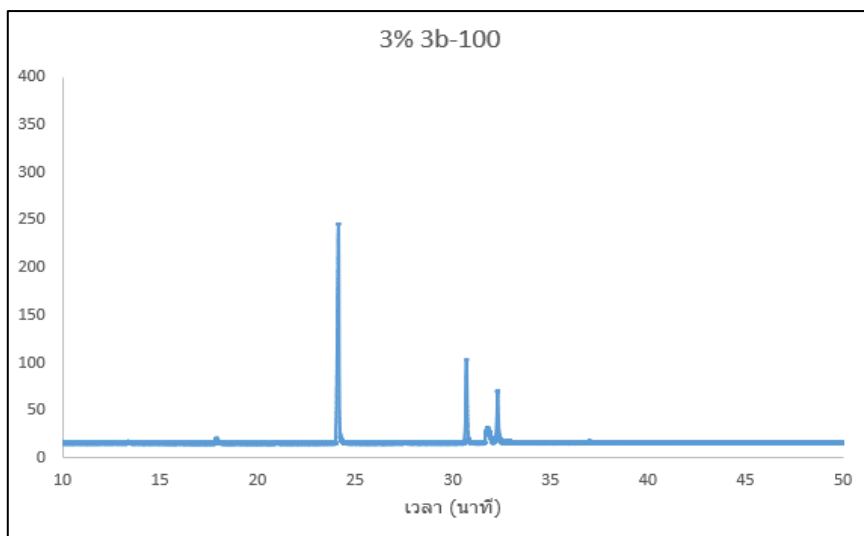
รูปที่ ก-2.5 GC โครมาโทแกรมของไปโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



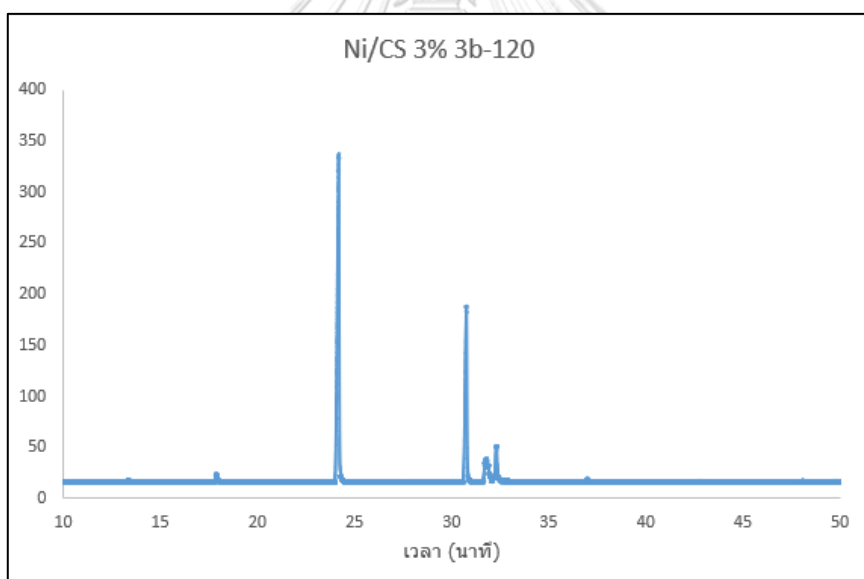
รูปที่ ก-2.6 GC โครมาโทแกรมของไปโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส



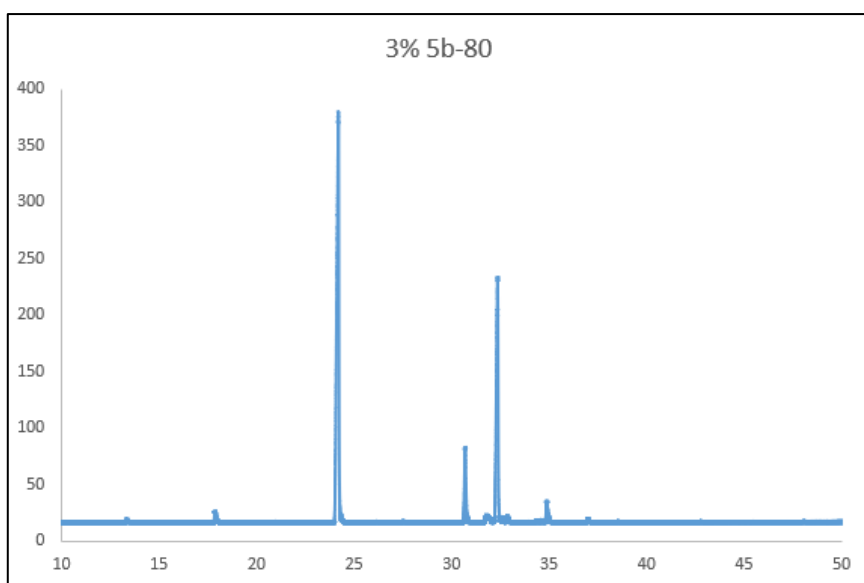
รูปที่ ก-2.7 GC โครมาโทแกรมของไปโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



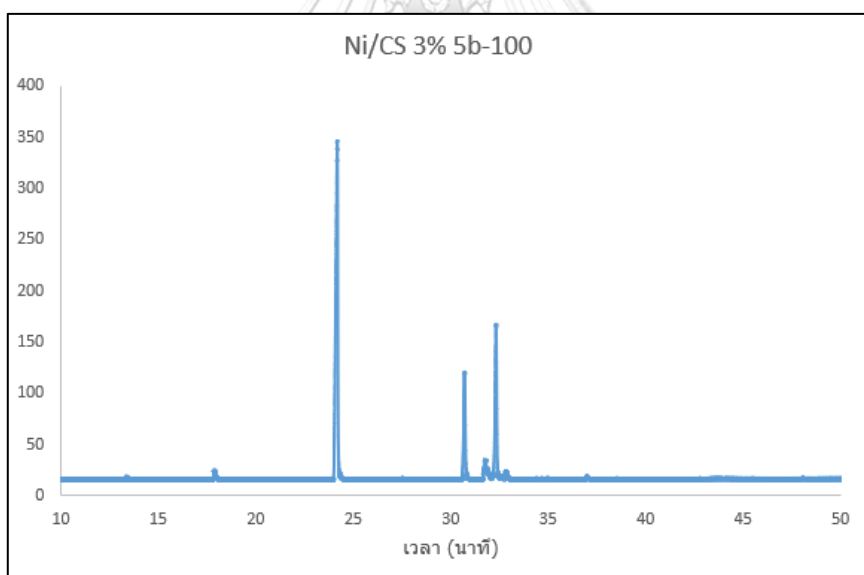
รูปที่ ก-2.8 GC โครมาโทแกรมของไปโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



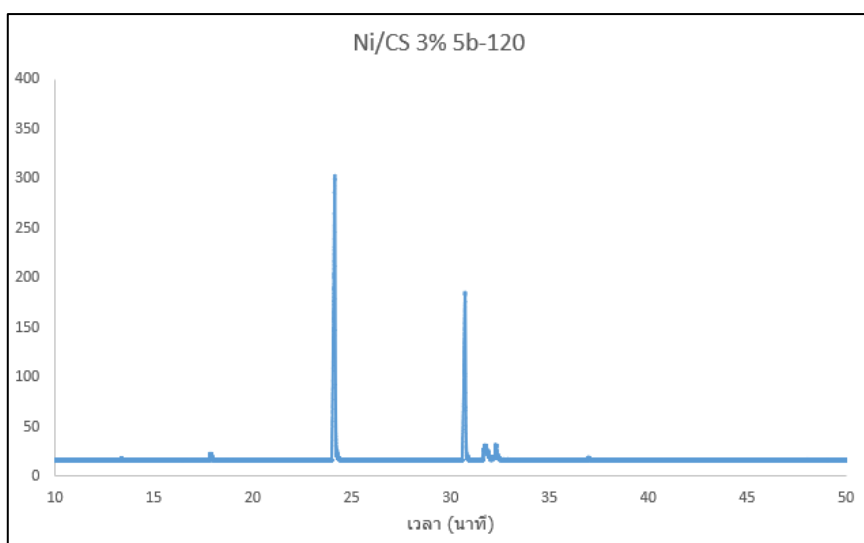
รูปที่ ก-2.9 GC โครมาโทแกรมของไปโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส



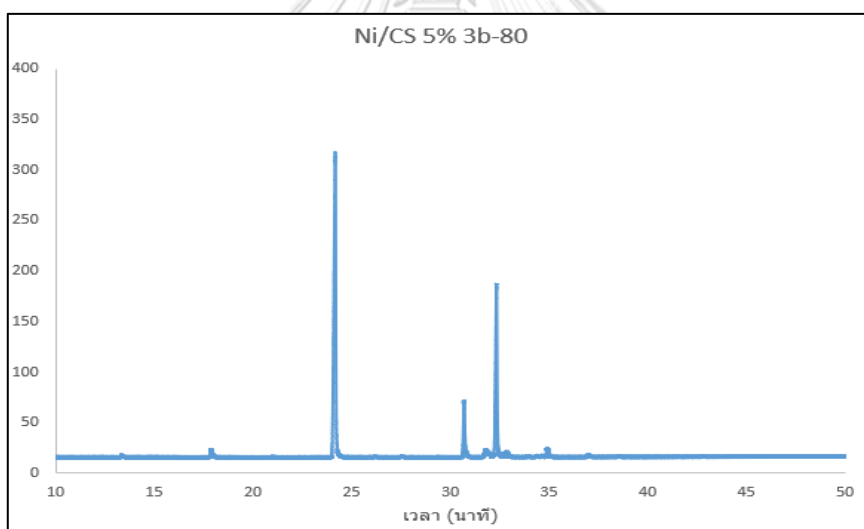
รูปที่ ก-2.10 GC โครมาโทแกรมของไปโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



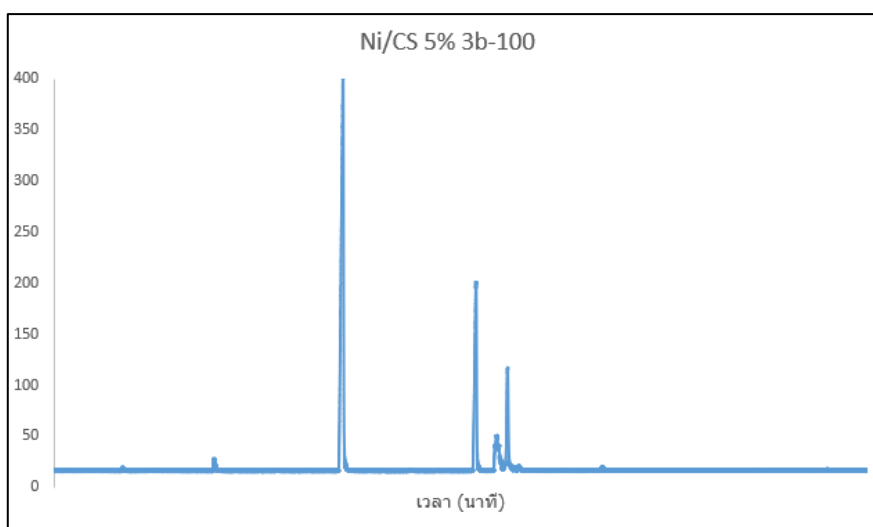
รูปที่ ก-2.11 GC โครมาโทแกรมของไปโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



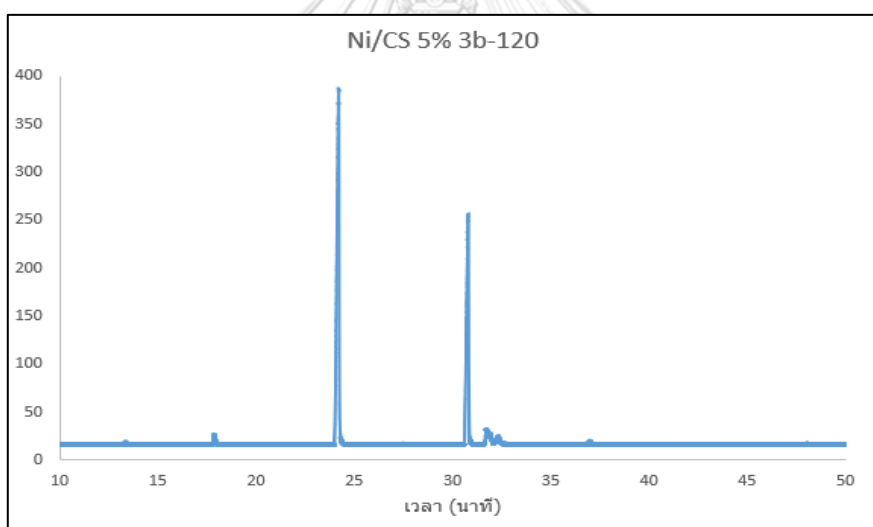
รูปที่ ก-2.12 GC โครมาโทแกรมของไปโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส



รูปที่ ก-2.13 GC โครมาโทแกรมของไปโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

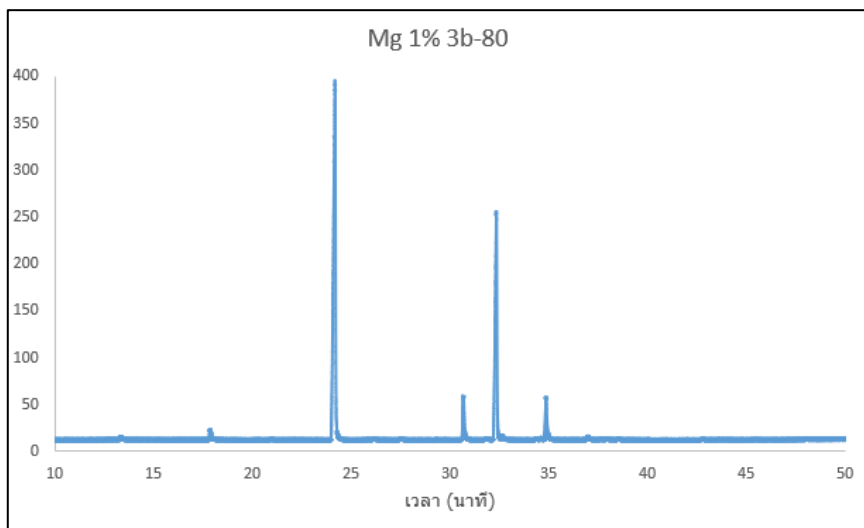


รูปที่ ก-2.14 GC โครมาโทแกรมของไปโอติเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

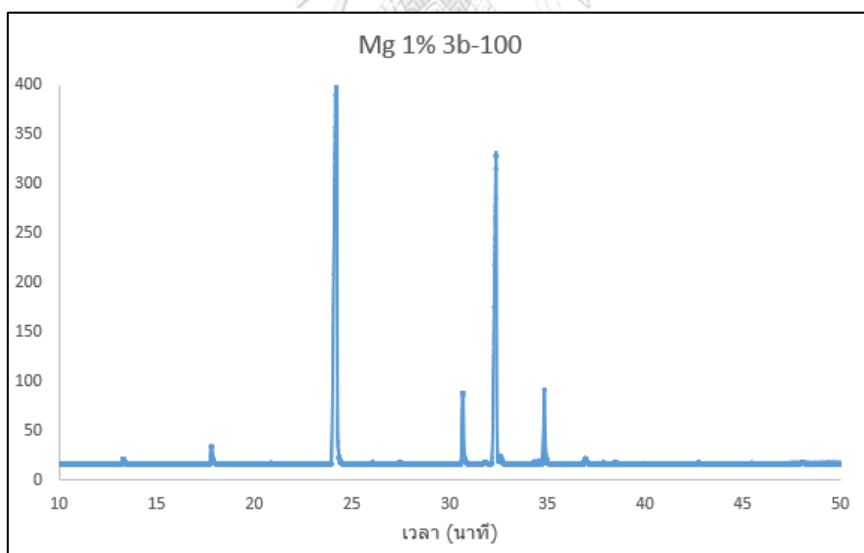


รูปที่ ก-2.15 GC โครมาโทแกรมของไปโอติเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

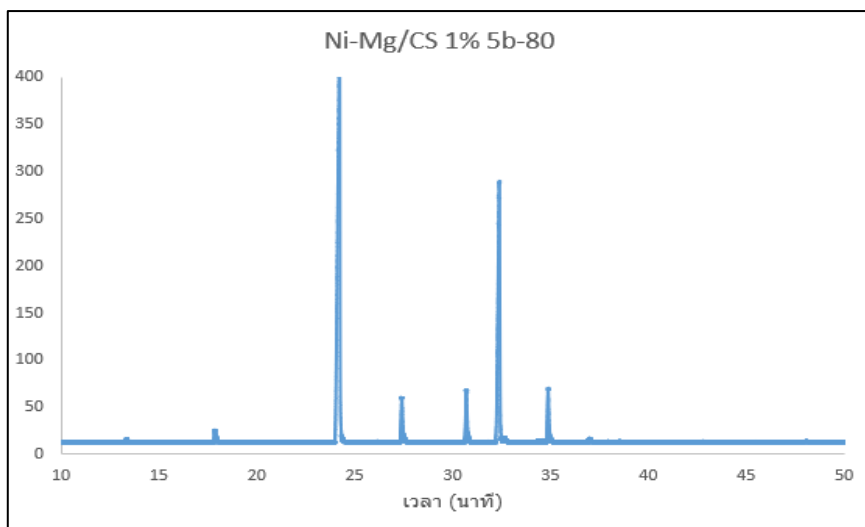
ก-3 GC โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
Ni-Mg/CS



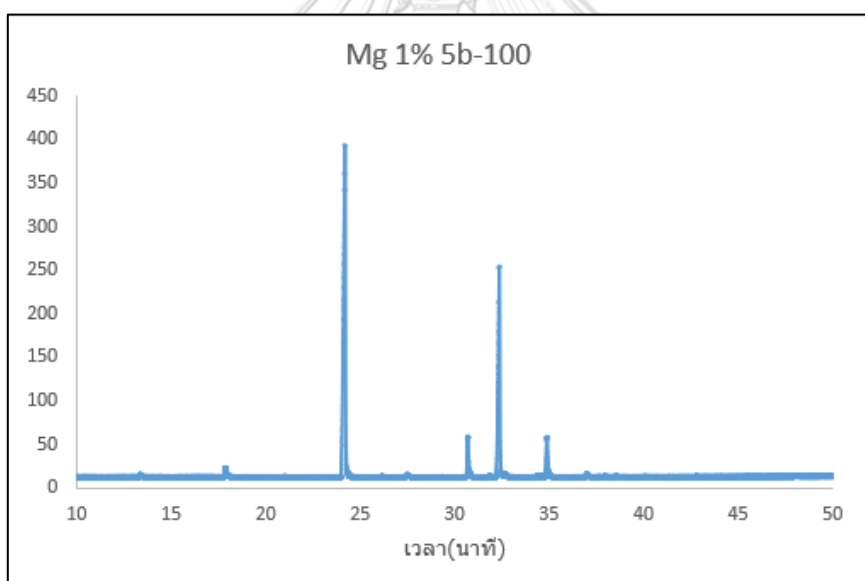
รูปที่ ก-3.1 GC โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
Ni-Mg/CS 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



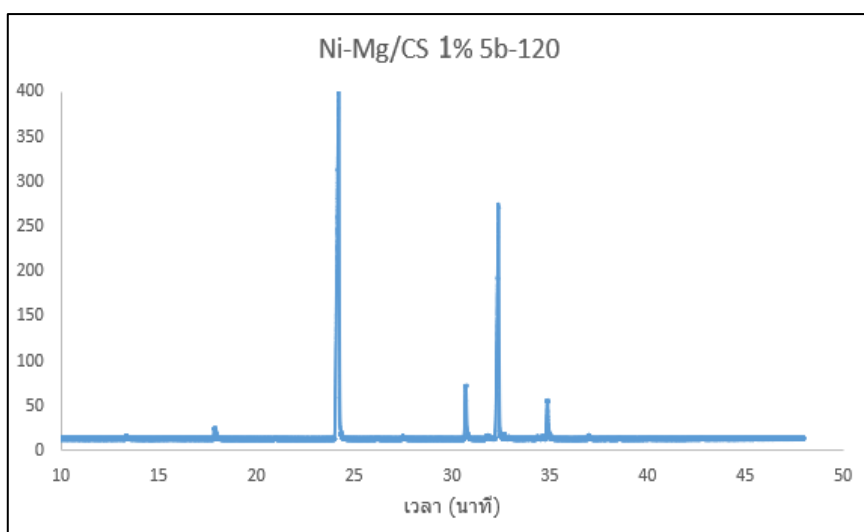
รูปที่ ก-3.2 GC โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
Ni-Mg/CS 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



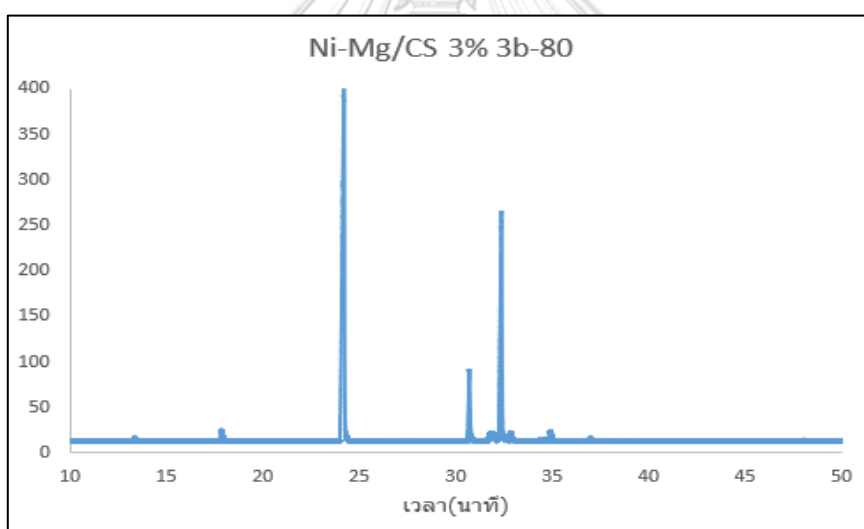
รูปที่ ก-3.3 GC โครมาโทแกรมของไปโอติเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



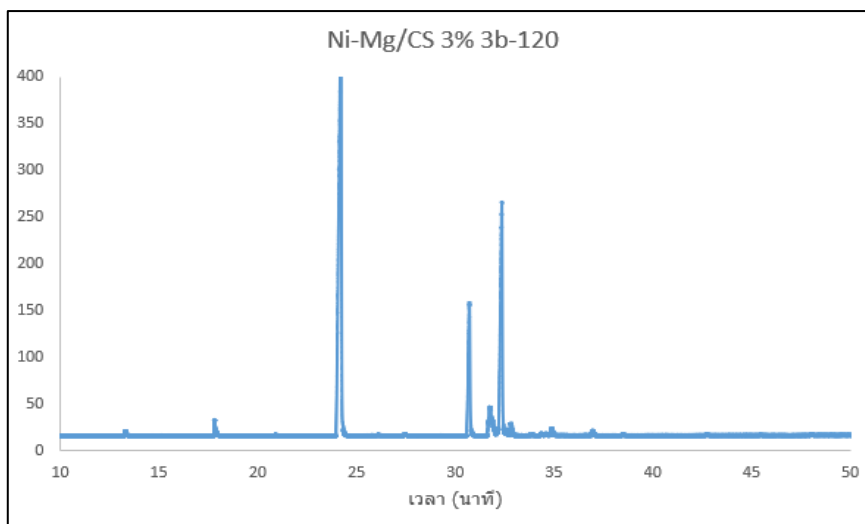
รูปที่ ก-3.4 GC โครมาโทแกรมของไปโอติเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



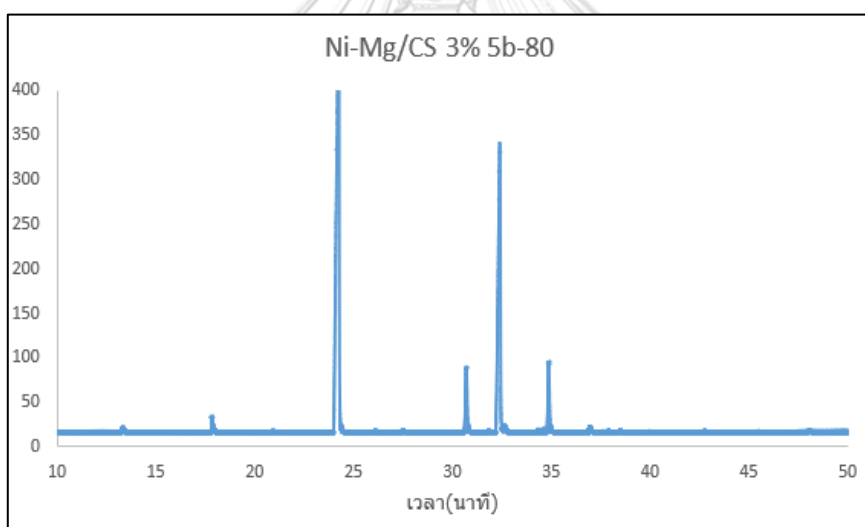
รูปที่ ก-3.5 GC โครมาโทแกรมของไปโอติเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส



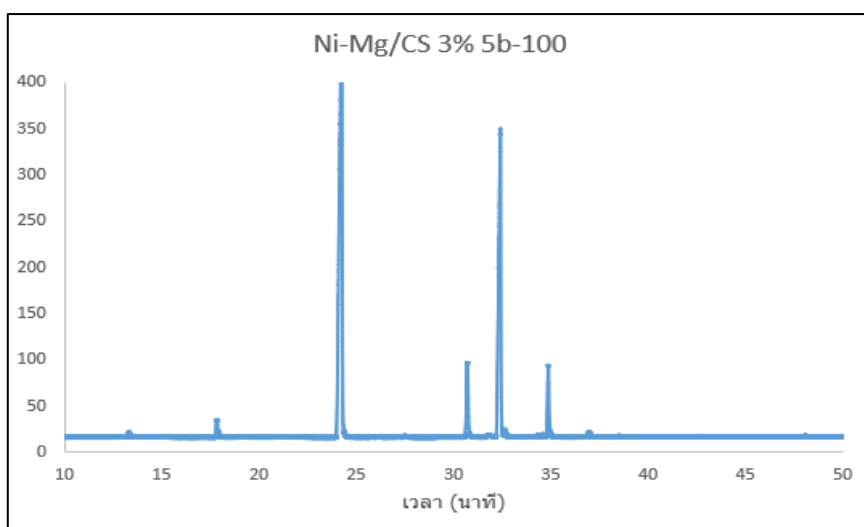
รูปที่ ก-3.6 GC โครมาโทแกรมของไปโอติเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



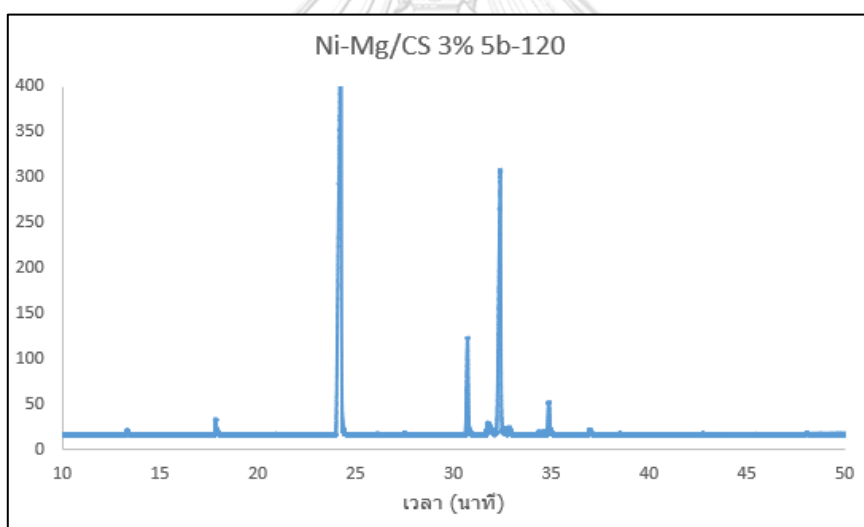
รูปที่ ก-3.7 GC โครมาโทแกรมของไปโอติเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส



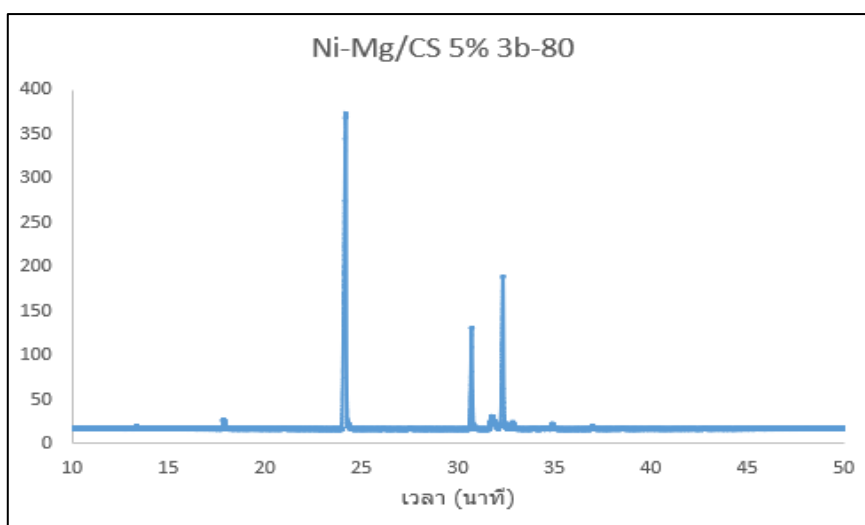
รูปที่ ก-3.8 GC โครมาโทแกรมของไปโอติเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



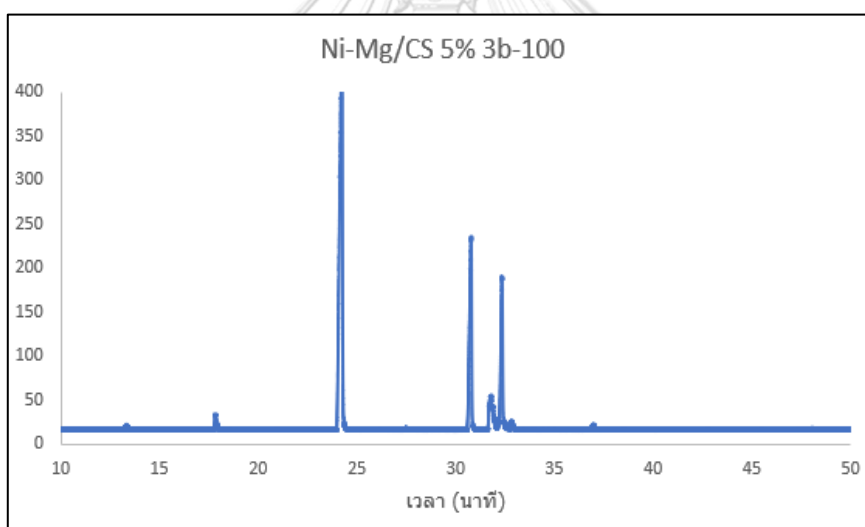
รูปที่ ก-3.9 GC โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ ก-3.10 GC โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลหลังทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส



รูปที่ ก-3.11 GC โครมาโทแกรมของไปโอติเซลหลังทำไฮโดรจีเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

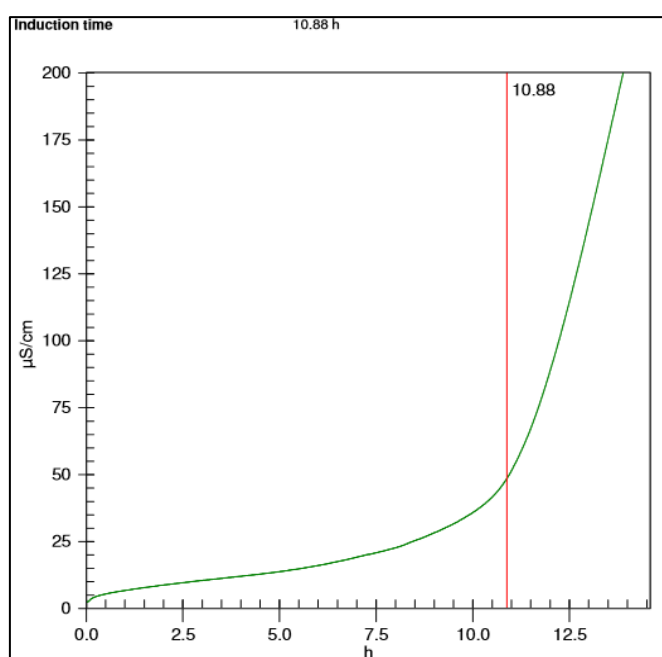


รูปที่ ก-3.11 GC โครมาโทแกรมของไปโอติเซลหลังทำไฮโดรจีเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ข

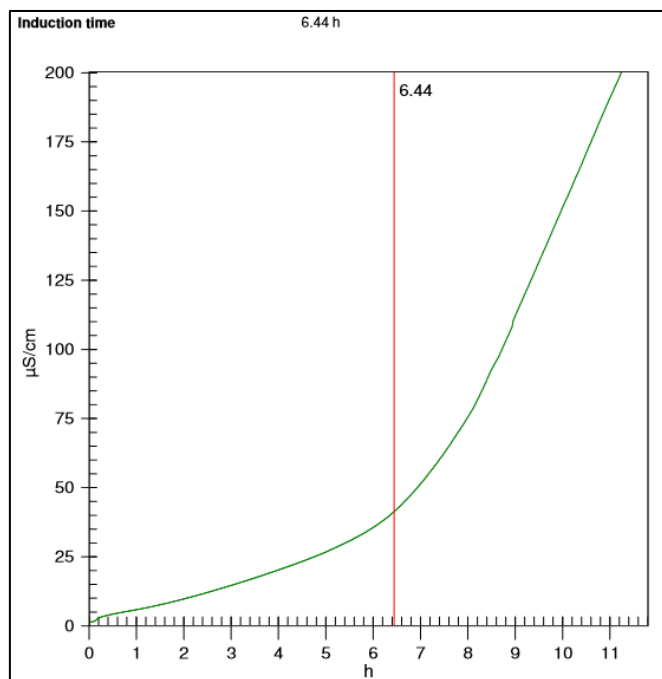
วัดค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ

ข-1 กราฟผลค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศของไบโอดีเซลก่อนทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน

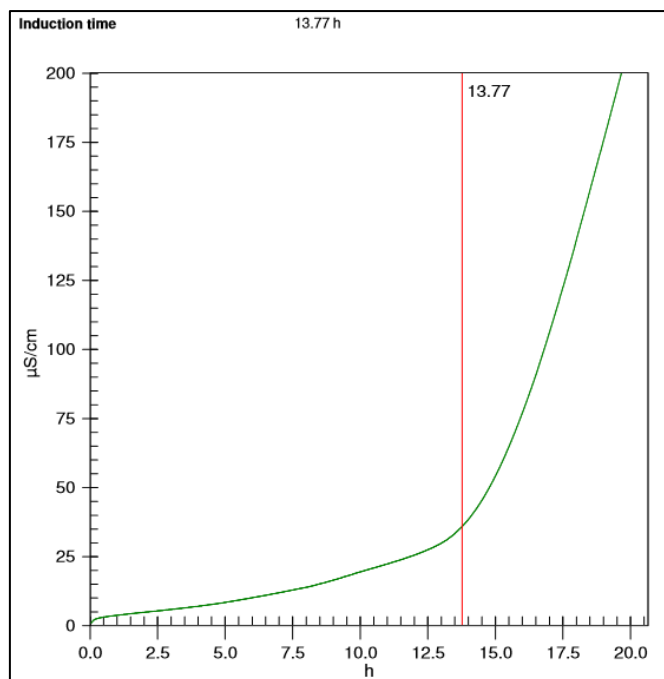


รูปที่ ข-1.1 แสดงค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยาดับออกซิเจนของ ไบโอดีเซล ก่อนทำไฮโดรจิเนชันบางส่วน

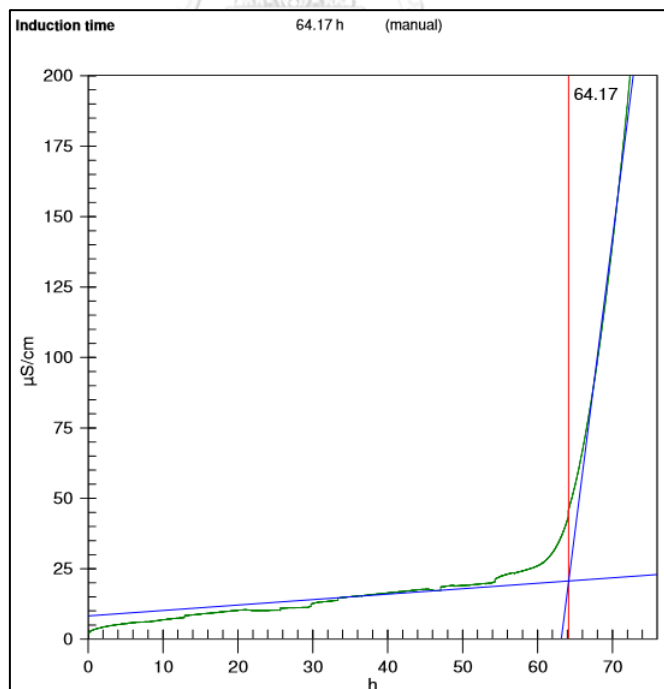
ข-2 กราฟแสดงผลค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับบอออกซิเจนในอากาศของไบโอดีเซลหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS ที่สภาวะดังนี้



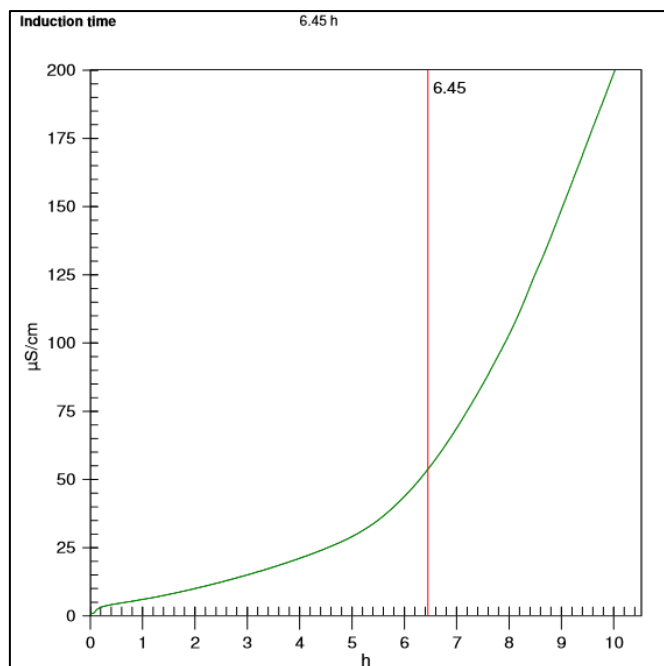
รูปที่ ข-2.1 ค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับบอออกซิเจนในอากาศของไบโอดีเซลหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข-2.2 ค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศของไบโอดีเซลหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

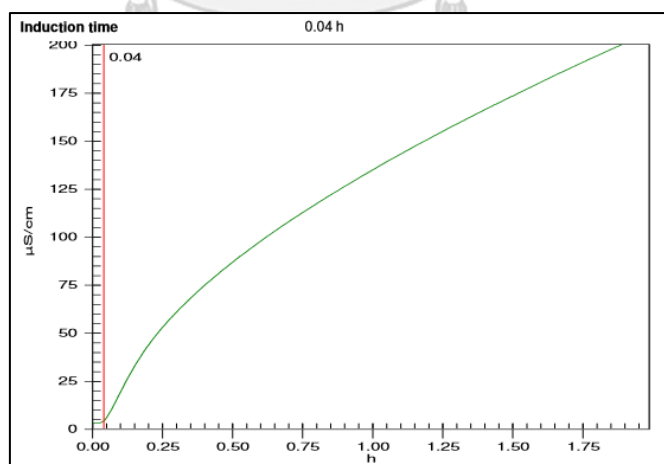


รูปที่ ข-2.3 ค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศของไบโอดีเซลหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

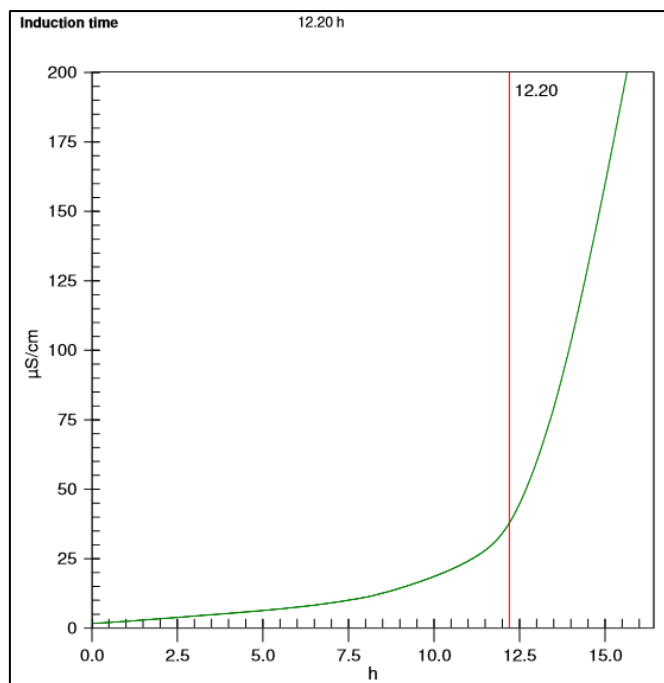


รูปที่ ข-2.4 ค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับบออกซิเจนในอากาศของไบโอดีเซลหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/CS 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

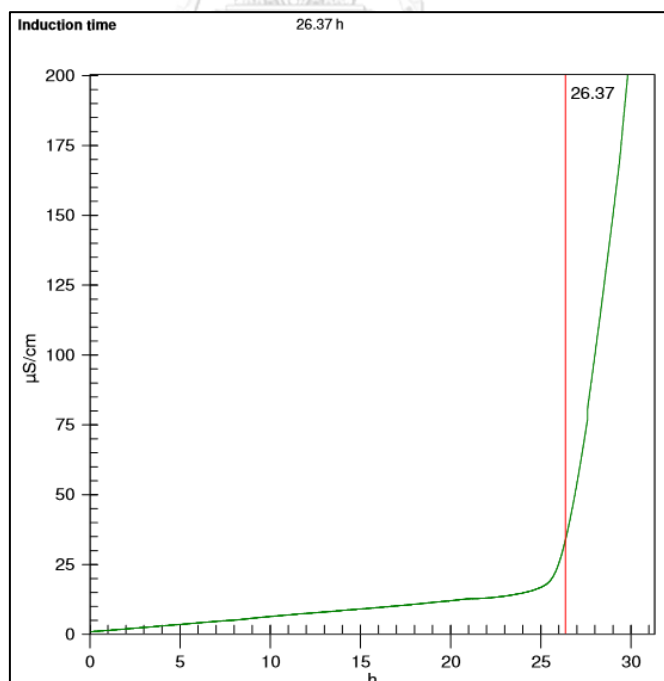
ข-3 กราฟแสดงผลค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับบออกซิเจนในอากาศของไบโอดีเซลหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS ที่สภาวะดังนี้



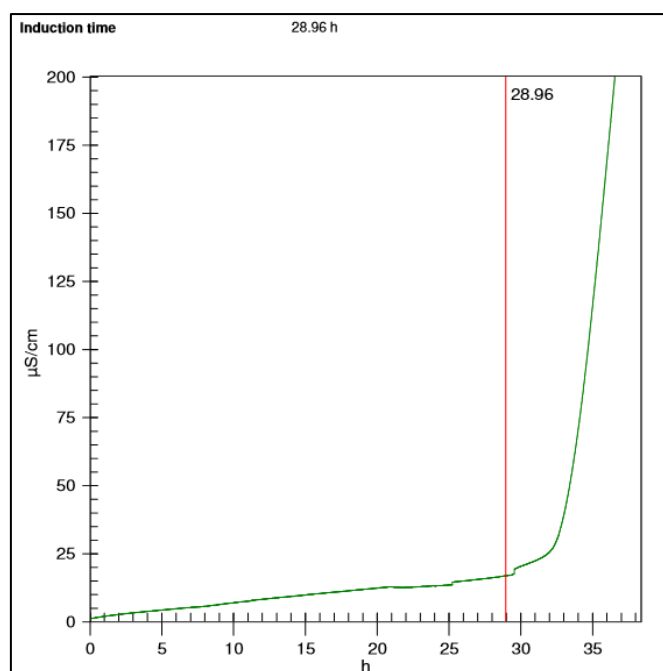
รูปที่ ข-3.1 ค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับบออกซิเจนในอากาศของไบโอดีเซลหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข-3.2 ค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับบอออกซิเจนในอากาศของไบโอดีเซลหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข-3.3 ค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับบอออกซิเจนในอากาศของไบโอดีเซลหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 3 บาร์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข-3.4 ค่าความเสถียรต่อการทำปฏิกิริยากับบอออกซิเจนในอากาศของไบโอดีเซลหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันบางส่วน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg/CS 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 บาร์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวรุ่งทิwa โกศล เกิดเมื่อวันที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2534 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี-อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2558 และสำเร็จการศึกษาในภาคต้นปีการศึกษา 2560

การเสนอผลงานวิจัย จากงานวิทยานิพนธ์ มีดังนี้

Kosol, R. and Reubroycharoen, P. 'Partial hydrogenation of biodiesel using carbon-supported over nickel catalyst', in Proceeding of the 6 th joint conference on Renewable Energy and Nanotechnology (JCREN-2017), October 12-14,2017, Bangkok, Thailand



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY