

การแตกตัวเชิงแรงปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ
แบตช์



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
สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CATALYTIC CRACKING OF WASTE FISH OIL ON MAGNESIUM OXIDE IN BATCH
REACTOR

Miss Sinjana Maboonlue



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Fuel Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบน
แมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

โดย

นางสาวสิญจนา มานุญลีอ

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชดธारा)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิชชากร จารุศิริ)

สัญญา มานูญลือ : การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (CATALYTIC CRACKING OF WASTE FISH OIL ON MAGNESIUM OXIDE IN BATCH REACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. ธารพงษ์ วิทิตสานต์, 92 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ขนาด 70 มิลลิลิตร โดยใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนสารตั้งต้น ไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โดยกระบวนการแตกตัวจะทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 420 – 500 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 – 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 – 5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 – 5 โดยน้ำหนัก โดยนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น (DGC) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบที่ดีที่สุด จากการทดลองพบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์ที่เป็นแนฟทา และอัตราส่วนแนฟทาต่อกากน้ำมัน คือ อุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา และปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-expert พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้งโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส 62.0 ของเหลว 24.4 และของแข็ง 13.6 ตามลำดับ เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวไปวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น (DGC) พบว่ามีปริมาณร้อยละของแนฟทา 7.8 เคโรซีน 3.3 ดีเซล 6.4 แก๊สออยล์ 2.0 และกากน้ำมัน 4.9 โดยน้ำหนัก

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีเชื้อเพลิง ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5872067023 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS: CATALYTIC PYROLYSIS / WASTE FISH OIL / MAGNESIUM OXIDE / RATIO NAPHTHA : LONG RESIDUE

SINJANA MABOONLUE: CATALYTIC CRACKING OF WASTE FISH OIL ON MAGNESIUM OXIDE IN BATCH REACTOR. ADVISOR: PROF. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., 92 pp.

This catalytic cracking of waste fish oil over magnesium oxide in a 70 mL microbatch reactor were investigated. The two level factorial experimental designs were performed to investigate the effect of variables of oil yield and their product distribution at the conditions : temperature (420 – 500 °C), time of reaction (30 – 60 min), initial hydrogen pressure (1 – 5 bar) and amount of MgO (1 – 5 %wt). The liquid yield was analyzed by simulated distillation gas chromatography (DGC) according to ASTM 2887 – D86. The result shown that the effects of variables on naphtha yield and ratio naphtha : long residue were temperature, amount of catalyst, reaction time and initial hydrogen pressure. From Design-Expert program, it was found the optimum condition is temperature of 500 °C, reaction time 60 min, initial hydrogen pressure 5 bars and using 1 wt% catalyst. The product was in 62.0 wt% gas, 24.4 wt% oil, 13.6 wt% of solid. This liquid product was analyzed by simulated distillation gas chromatography which was composed of 7.8 % of naphtha, 3.3 % of kerosene, 6.4 % of diesel, 2.0 % of gas oil and 4.9 % of long residue.

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Fuel Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ ความคิดเห็น รวมถึงแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่กรุณาให้ความรู้ ความคิดเห็น รวมถึงแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณโรงงานแปรรูปอาหารจำพวกปลาแห่งหนึ่งในจังหวัด สมุทรสาคร สำหรับการสนับสนุนและให้น้ำมันปลาเหลือทิ้งเพื่อนำมาใช้ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณบุคลากรในศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานชีวมวลที่ อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี บุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2.....	4
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปีโตรเลียม.....	4
2.2 น้ำมันดิบ.....	4
2.2.1 พาราฟิน (paraffin)	4
2.2.2 แนฟทีน (naphthene)	5
2.3 พลังงานทดแทน	6
2.3.1 พลังงานแสงอาทิตย์	6
2.3.2 พลังงานลม.....	6
2.3.3 พลังงานน้ำ.....	7

2.3.4 พลังงานความร้อนใต้พิภพ	7
2.3.5 พลังงานชีวมวล.....	7
2.4 น้ำมันปลาเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารกระป๋อง	8
2.5 เทคโนโลยีในการผลิตเชื้อเพลิงดีเซล.....	10
2.5.1 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Tranesterification)	10
2.5.2 กระบวนการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking)	10
2.5.3 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis reaction)	10
2.6 ปฏิริยาการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน.....	11
2.6.1 กระบวนการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน	11
2.6.2 กระบวนการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิริยา	12
2.6.3 การแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมในปฏิริยา	15
2.7 ตัวเร่งปฏิริยา.....	15
2.7.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิริยา	16
2.7.2 เทอมที่เกี่ยวข้องกับการเร่งปฏิริยา	16
2.7.3 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิริยา	18
2.7.4 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน โดยใช้วิธีบีที (Brunauer Emmett Teller Method, BET)	19
2.7.5 การดูดซับและการคายซับ.....	21
2.7.6 ขั้นตอนการเกิดปฏิริยาในปฏิริยาริวิฟฟันธุ์.....	22
2.7.7 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิริยา (Deactivation).....	24
2.7.8 ตัวเร่งปฏิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	26
2.8 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำมัน [23, 24]	26
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27

บทที่ 3.....	30
เครื่องมือและวิธีการทดลอง	30
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	30
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	33
3.3 การดำเนินการวิจัย.....	34
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	36
บทที่ 4.....	37
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	37
4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง.....	37
4.1.1 การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง.....	37
4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้งด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี แบบจำลองการกลั่น.....	39
4.1.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้งด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี ประกอบกับแมสสเปกโตรมิเตอร์.....	40
4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์.....	41
4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ XRD	41
4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยเทคนิค XRF	42
4.2.3 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของแมกนีเซียมออกไซด์.....	42
4.3 ผลการทดลองที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งด้วย แมกนีเซียมออกไซด์.....	43
4.3.1 การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาที่ ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ .	43

4.3.2 การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ได้จากการแตกตัวเชิง เร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์	47
4.3.3 การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนเนฟทาต่อกาน้ำมันในผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์	52
4.3.4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือ ทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์	57
4.3.5 อิทธิพลของเวลาที่ส่งผลต่อการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบน แมกนีเซียมออกไซด์	60
4.3.6 อิทธิพลของความดันที่ส่งผลต่อการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือ ทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์	62
4.3.7 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของ น้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์.....	64
4.4 การคำนวณหาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง บนแมกนีเซียมออกไซด์เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวโดยใช้โปรแกรม Design-Expert	66
4.5 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Total acid value) ของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลว.....	68
4.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบ ธาตุ CHO ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการ แตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์.....	69
4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่ง ปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์	69
4.8 การวิเคราะห์ค่าความร้อนและค่าความหนืดของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตก ตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์	71
4.9 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	72
บทที่ 5.....	73
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	73

5.1 สรุปผลการทดลอง.....	73
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	74
รายการอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก.....	79
ข้อมูลการทดลอง.....	79
ภาคผนวก ข.....	81
การคำนวณร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิง.....	81
ภาคผนวก ค.....	82
การวิเคราะห์องค์ประกอบการกระจายตัวของเชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือด.....	82
ภาคผนวก ง.....	86
การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลและการใช้โปรแกรม Design Expert.....	86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	92

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	34
3.2 จำนวนการทดลองแปดทอเรียลสองระดับ.....	35
4.1 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง.....	37
4.2 องค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้งก่อนการศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา.....	39
4.3 องค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้งจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบกับแมสสเปกโตรมิเตอร์.....	41
4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์เทคนิค XRF...	42
4.5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์.....	42
4.6 ปริมาณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ภาวะต่างๆ.....	43
4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาบนแมกนีเซียมออกไซด์.....	47
4.8 ปริมาณร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งที่ภาวะต่างๆ.....	48
4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของเนฟทาจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์.....	51
4.10 อัตราส่วนเนฟทาต่อกากน้ำมันที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งที่ภาวะต่างๆ.....	53
4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนเนฟทาต่อกากน้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์.....	56
4.12 ขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert ของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์.....	66
4.13 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม Design-Expert.....	67
4.14 การเปรียบเทียบระหว่างภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม Design-Expert กับค่าที่ได้จากการทดลอง.....	67
4.15 ค่าความเป็นกรด (Total acid value) ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวภาพเหลว.....	68
4.16 องค์ประกอบธาตุ CHO ของเชื้อเพลิงเหลว.....	69

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.17 องค์ประกอบเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาวิเคราะห์ด้วย เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบกับแมสสเปกโตรมิเตอร์.....	70
4.18 แสดงค่าความร้อนและค่าความหนืดของน้ำมันปลาเหลือทิ้งก่อนและหลังการแตกตัว เชิงเร่งปฏิกิริยา.....	71
4.19 องค์ประกอบแก๊สที่ภาวะที่เหมาะสมของการเกิดปฏิกิริยา.....	72
ก 1 ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของน้ำมันปลาเหลือ ทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์.....	77
ง. 1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	85



สารบัญ

รูปที่	หน้า
2.1 พาราฟินที่พบในปิโตรเลียม.....	4
2.2 แนฟทีนที่พบในปิโตรเลียม.....	5
2.3 สารไฮโดรคาร์บอนประเภทแอโรมาติก.....	5
2.4 น้ำมันปลาเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตปลากระป๋อง.....	9
2.5 น้ำมันปลาเหลือทิ้งที่ผ่านการกรองกากของเสียออกแล้ว.....	9
2.6 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	10
2.7 กระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน.....	11
2.8 พลังงานกระตุ้นปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	17
2.9 การวัดพื้นที่ผิวโดยใช้วิธีบีอีที.....	20
2.10 กราฟเส้นตรงของสมการบีอีที.....	21
2.11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาในปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์.....	22
2.12 การแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้น.....	22
2.13 การแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน.....	23
2.14 การดูดซับทางเคมีของสาร A บนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	23
2.15 การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจากโมเลกุล A ไปเป็น B.....	24
2.16 การเกิดโค้กที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	25
2.17 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบซินเทอริง.....	25
2.18 โครงสร้างผลึกของแมกนีเซียมออกไซด์.....	26
3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กขนาด 70 มิลลิลิตร (Microreactor).....	30
3.2 ชุดทดลองประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัลหม้อแปลงไฟฟ้าและ เครื่องควบคุมเครื่องปฏิกรณ์.....	31
3.3 ชุดกรองสุญญากาศ.....	31
3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น.....	32
3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์.....	33
3.6 เครื่องมือไทเทรตอัตโนมัติ.....	33
4.1 องค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้งด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปก โตรมิเตอร์.....	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยเทคนิค XRD.....	41
4.3 Half Normal plot ของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาที่ได้จากการแตกตัวเชิง แรงปฏิกิริยาบนแมกนีเซียมออกไซด์.....	45
4.4 Normal probability plot of residuals ของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำมันปลาที่ได้ จากการแตกตัวเชิงแรงปฏิกิริยาบนแมกนีเซียมออกไซด์.....	46
4.5 Half Normal plot ของร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ได้จากการแตกตัวเชิงแรง ปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์.....	50
4.6 Normal probability plot of residuals ของร้อยละผลได้ของเนฟทา.....	50
4.7 Half Normal plot ของอัตราส่วนเนฟทาต่ออกากน้ำมันที่ได้จากการแตกตัวเชิงแรง ปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์.....	55
4.8 Normal probability plot of residuals ของอัตราส่วนเนฟทาต่ออกากน้ำมัน.....	55
4.9 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยน แปลงอุณหภูมิ.....	58
4.10 ร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	58
4.11 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยน แปลงเวลา.....	60
4.12 ร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อ เปลี่ยนแปลงเวลา.....	61
4.13 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้งเมื่อเปลี่ยน แปลงความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น.....	62
4.14 ร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้งเมื่อ เปลี่ยนแปลงความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น.....	63
4.15 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยน แปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	64
4.16 ร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อ เปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาวิเคราะห ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบกับแมสสเปกโตรมิเตอร์.....	70
ค.1 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	80
ค.2 Flame Ionization Detector.....	81
ค.3 โครมาโทแกรมที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	82
ค.4 การเปรียบเทียบค่า Retention Time ของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน.....	82
ง.1 ตารางของ 2 level Factorial Design.....	86
ง.2 ตัวแปรและหน่วยที่ใช้ในการทดลอง.....	86
ง.3 Response และ หน่วยของตัวแปรที่ทำการทดลอง.....	87
ง.4 ตารางการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองที่ภาวะต่างๆ.....	87
ง.5 half normal plot.....	88
ง.6 การคำนวณผลของ ANOVA.....	88
ง.7 ขอบเขตที่ต้องการในการทดลอง.....	89
ง.8 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้.....	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมและการขนส่งคมนาคมเป็นเชื้อเพลิงที่มาจากปิโตรเลียม และความต้องการในการใช้เชื้อเพลิงยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้หลายประเทศทั่วโลก รวมถึงในประเทศไทย ต่างก็ประสบกับวิกฤตการณ์ที่น้ำมันแพงขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการแสวงหาแหล่งวัตถุดิบเพื่อมาทดแทนการใช้ น้ำมันที่กำลังจะหมดไป หนึ่งในนั้นก็เป็นน้ำมันที่มาจากพืชหรือจากสัตว์ที่เราสามารถปลูกทดแทนหรือขยายพันธุ์ได้โดยใช้เวลาไม่นานเท่าปิโตรเลียม ซึ่งไขมันสัตว์ โดยเฉพาะไขมันสัตว์ที่เหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารจำพวกเนื้อสัตว์ เป็นวัตถุดิบที่สามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวได้ ข้อดีคือมีต้นทุนต่ำ และมีประโยชน์มากกว่าไขมันจากพืชเนื่องจากไขมันสัตว์มีกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันอิสระสูง จะให้ค่าความร้อนสูงค่าซีเทนสูงและมีเสถียรภาพออกซิเดชันสูงอีกด้วย

การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการผลิตเชื้อเพลิงทดแทน จากการใช้วัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติ สามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาเป็นการใช้ความร้อนเพื่อสลายไฮโดรคาร์บอน โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าร่วมในการทำปฏิกิริยาด้วย ซึ่งเทคโนโลยีนี้มีข้อดีที่กว่ากระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริเฟเคชัน คือ สามารถใช้วัตถุดิบได้หลากหลายไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์หรือกำจัดน้ำออก ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่นาน และไม่เกิดของเสีย

ในงานวิจัยนี้จึงนำน้ำมันปลาเหลือทิ้ง มาผ่านกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ ส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันทำให้ได้ปริมาณสารไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนใกล้เคียงกับน้ำมันจากปิโตรเลียมมากที่สุด อีกทั้งยังช่วยลดความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย โดยศึกษาตัวแปรดังนี้ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ความดัน และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลที่ได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เป็นเชื้อเพลิงเหลว เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ และองค์ประกอบที่เหมาะสม จากการเปลี่ยนแปลงของกาน้ำมันสูงที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาหาภาวะของกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ จากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิ เวลา ความดันและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ และองค์ประกอบที่เหมาะสม จากการเปลี่ยนแปลงของกากน้ำมันสูงที่สุด

1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับผลิตเชื้อเพลิงเหลวผ่านกระบวนการไพโรไลซิส
2. ศึกษาสมบัติของน้ำมันปลาเหลือทิ้งก่อนทำปฏิกิริยาดังนี้
 - 2.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้งด้วยเทคนิค gas chromatography mass spectroscopy (GC-MS) และ distillation simulation gas chromatography (DGC)
 - 2.2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันปลาเหลือทิ้งโดยการค่าพลังงานความร้อนจำเพาะ
 - 2.3 วิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง
3. ศึกษาองค์ประกอบ และสมบัติทางกายภาพตัวเร่งปฏิกิริยาดังนี้
 - 3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence spectrometry (XRF) และ X-ray diffraction (XRD)
 - 3.2 วิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน
4. ออกแบบการทดลองโดยใช้แฟกทอเรียลแบบสองระดับจากโปรแกรม Design-expert โดยมีตัวแปรที่ต้องการศึกษาประกอบด้วย
 - อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 – 500 องศาเซลเซียส
 - เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 – 60 นาที
 - ความดันไฮโดรเจน 1 – 5 บาร์
 - ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคิดเป็นร้อยละ 1 – 5 โดยน้ำหนักของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง 15 กรัม
5. ทำการทดลองตามตัวแปรที่กำหนด ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 – 500 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 – 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 – 5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคิดเป็นร้อยละ 1 – 5 โดยน้ำหนัก

6. วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ดังนี้

6.1 วิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบเชื้อเพลิงเหลวในช่วงคาบจุดเดือดที่
อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเทคนิค distillation simulation gas chromatography (DGC)

6.2 วิเคราะห์องค์ประกอบที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงเหลวด้วยเทคนิค gas chromatography
mass spectroscopy (GC-MS)

6.3 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของเชื้อเพลิงเหลว

7. วิเคราะห์ผลการทดลองสรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

ได้ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันปลาเหลือทิ้งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์เพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ และองค์ประกอบที่เหมาะสมจากการเปลี่ยนแปลงของกากน้ำมันสูงที่สุด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปิโตรเลียม [1-3]

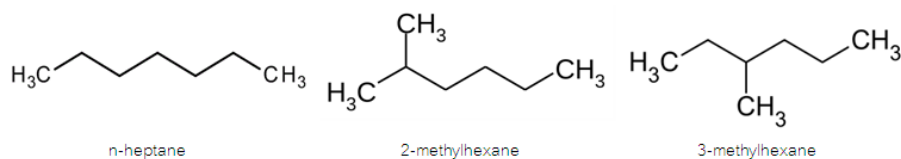
ปิโตรเลียม มีรากศัพท์มาจากภาษาละตินว่า Petra แปลว่า หิน และคำว่า Oleum แปลว่า น้ำมัน รวมความแล้วปิโตรเลียมจึงหมายถึง น้ำมันที่ได้มาจากหิน โดยไหลซึมออกมาเองในรูปของของเหลวหรือก๊าซ ปิโตรเลียมมีธาตุองค์ประกอบหลัก 2 ชนิด คือ คาร์บอนและไฮโดรเจน และอาจมีธาตุอโลหะชนิดอื่นปนอยู่ด้วย เช่น กำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจน ทั้งนี้ปิโตรเลียมเป็นได้ทั้ง 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ รวมถึงความร้อนและความดันของสภาพแวดล้อมในการเกิดและการกักเก็บปิโตรเลียม

กำเนิดของปิโตรเลียม เกิดจากการทับถมและแปรสภาพของซากสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ ยุคก่อนประวัติศาสตร์นับหลายล้านปี ที่ตกตะกอนหรือถูกกระแส น้ำพัดพามาจมนก ณ บริเวณที่เป็นทะเลหรือทะเลสาบในขณะนั้น ถูกทับถมด้วยชั้นกรวด ทราย และโคลนสลับกันเป็นชั้นๆ เกิดน้ำหนักกดทับกลายเป็นชั้นหินต่างๆ ผนวกกับความร้อนใต้พิภพและการสลายตัวของอินทรีย์สารตามธรรมชาติ ทำให้ซากพืชและซากสัตว์กลายเป็นน้ำมันดิบ (crude oil) และก๊าซธรรมชาติ (natural gas)

2.2 น้ำมันดิบ [4, 5]

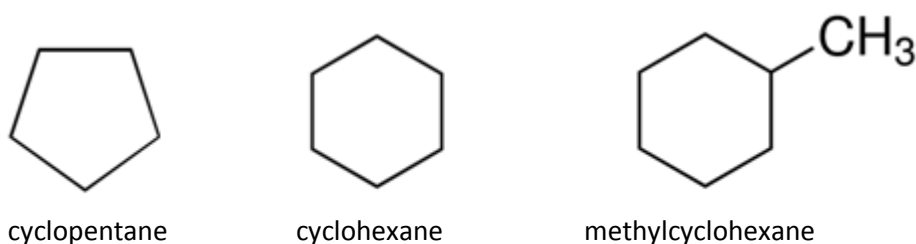
น้ำมันดิบ เป็นสารประกอบที่อยู่ในน้ำมันปิโตรเลียม มีลักษณะเป็นของเหลวสีดำ น้ำตาล หรือน้ำตาลเข้ม เป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนมากมายหลายชนิด ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมจะแบ่งออกเป็น 3 จำพวก ดังนี้

2.2.1 พาราฟิน (paraffin) เป็นอนุกรมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว หรือเรียกว่า แอลเคน ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลเชื่อมต่อกันเป็นเส้น มีสูตรทั่วไปเป็น C_nH_{2n+2} ส่วนใหญ่ที่พบคือ พาราฟินแบบโซ่ตรง เช่น n-heptane ไอโซพาราฟิน เช่น 2-methylhexane และ พาราฟินแบบกิ่ง เช่น 3-methylhexane มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1



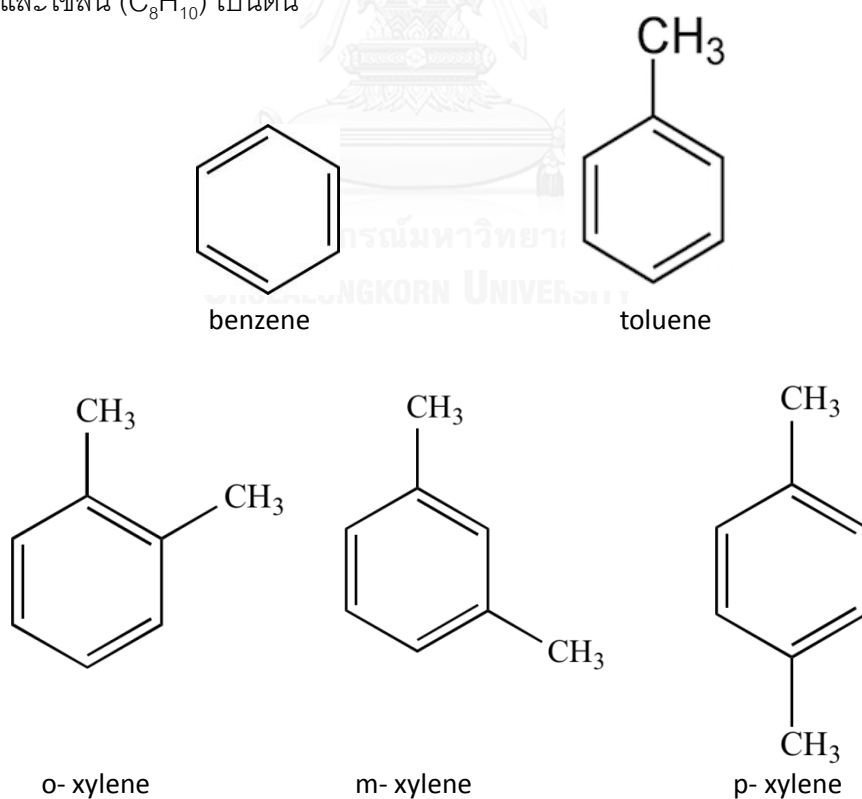
รูปที่ 2.1 พาราฟินที่พบในปิโตรเลียม

2.2.2 แนฟทีน (naphthene) เป็นอนุกรมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัวโดยมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลเชื่อมต่อกันเป็นวงหรือเรียกว่า ไซโคลออคเทน (cycloalkanes) มีสูตรทั่วไปเป็น C_nH_{2n} โดยทั่วไปน้ำมันดิบจะมีแนฟทีนสูงถึงร้อยละ 50 ที่พบในปิโตรเลียมส่วนใหญ่เป็นวงขนาดห้าเหลี่ยมและหกเหลี่ยม เช่น ไซโคลเพนเทน (C_5H_{10}) และไซโคลเฮกเซน (C_6H_{12}) เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แนฟทีนที่พบในปิโตรเลียม

2.2.3 แอโรมาติก (aromatics) คือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมของคาร์บอนต่อกันเป็นวงแหวน พันธะระหว่างอะตอมภายในวงแหวนจะเป็นพันธะเดี่ยวสลับพันธะคู่ โครงสร้างโมเลกุลที่เชื่อมต่อกันเป็นวงไม่อิ่มตัว มีสูตรทางเคมีทั่วไป คือ C_nH_{2n-6} เช่น เบนซีน (C_6H_6), โทลูอีน (C_7H_8) และไซลีน (C_8H_{10}) เป็นต้น



รูปที่ 2.3 สารไฮโดรคาร์บอนประเภทแอโรมาติก

2.3 พลังงานทดแทน [6-9]

ปัญหาด้านพลังงานมีผลกระทบต่อการพัฒนาประเทศไทยมากขึ้น ที่ผ่านมามีประเทศไทยใช้เชื้อเพลิงต่างๆ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ากว่าร้อยละ 90 เชื้อเพลิงต่างๆ เหล่านี้จึงมีปริมาณน้อยลงทุกวัน และราคาของเชื้อเพลิงมีความผันผวนไปในแนวทางที่สูงขึ้นตามภาวะทางเศรษฐกิจและการเมืองของโลก ในปัจจุบันจึงเริ่มหันมาใช้พลังงานทดแทนซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกรูปแบบใหม่มาผลิตไฟฟ้า เพื่อลดการใช้ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซธรรมชาติที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ นอกจากนี้ยังช่วยลดสาเหตุภาวะโลกร้อนจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อีกทางหนึ่งด้วย

พลังงานทดแทน หมายถึง พลังงานใดๆ ที่ใช้ทดแทนพลังงานหลัก มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อยกว่าพลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิล พลังงานทดแทนแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามแหล่งที่มาของพลังงาน ได้แก่ พลังงานทดแทนจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไปเรียกว่า พลังงานสิ้นเปลือง ได้แก่ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ นิวเคลียร์ หินน้ำมัน และทรายน้ำมัน เป็นต้น และพลังงานหมุนเวียน คือ พลังงานที่ได้จากแหล่งที่สามารถผลิตหรือกักกักกำเนิดพลังงานนั้นขึ้นมาเองได้ และยังสามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ได้อีก มักเป็นพลังงานสะอาด และไม่สร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานชีวมวล เป็นต้น

2.3.1 พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานหมุนเวียนที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่สิ้นสุด และมีลักษณะกระจายไปถึงผู้ใช้โดยตรง อีกทั้งยังเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยส่วนใหญ่จะใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ถึงแม้พลังงานแสงอาทิตย์จะมีต้นทุนที่สูง แต่จัดเป็นการลงทุนที่คุ้มค่าในระยะยาว นอกจากนี้ ยังมีการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตความร้อนในอุตสาหกรรมต่างๆ อีกด้วย เช่น เครื่องปั๊ม เครื่องอบแห้ง เครื่องทำน้ำร้อน เป็นต้น

2.3.2 พลังงานลม เป็นพลังงานธรรมชาติที่สะอาดและบริสุทธิ์และไม่มีวันหมด ลมเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิสองที่ แสงอาทิตย์ตกกระทบโลกทำให้อากาศร้อนและลอยตัวสูงขึ้น อากาศจากบริเวณอื่นซึ่งเย็นและหนาแน่นมากกว่าจึงเข้ามาแทนที่ เป็นสาเหตุให้เกิดลม พลังงานชนิดนี้ได้รับความสนใจและนำมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์อย่างกว้างขวาง กังหันลมเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะในการผลิตกระแสไฟฟ้าและใช้เป็นกังหันสูบน้ำ .ในประเทศไทยพลังงานลมที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ มีความเร็วอยู่ระหว่าง 3 – 5 เมตรต่อวินาที

2.3.3 พลังงานน้ำ พื้นผิวโลกถึงร้อยละ 70 ถูกปกคลุมด้วยน้ำ ซึ่งมีความสำคัญยิ่งต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย น้ำมีการเปลี่ยนสถานะและหมุนเวียนอยู่ตลอดเวลาระหว่างผิวโลกและบรรยากาศอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเรียกว่า วัฏจักรของน้ำ น้ำที่กำลังเคลื่อนที่มีพลังงานสะสมอยู่มาก และมนุษย์รู้จักนำพลังงานนี้มาใช้หลายร้อยปีแล้ว ปัจจุบันนี้พลังงานน้ำส่วนมากจะถูกใช้ในการผลิตไฟฟ้า และยังถูกนำไปใช้ในกรมชลประทาน และการทอผ้าอีกด้วย ในปัจจุบันพลังงานที่ได้จากแหล่งน้ำที่รู้จักกันโดยทั่วไปคือ พลังงานน้ำตก พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง และพลังงานคลื่น เป็นต้น

2.3.4 พลังงานความร้อนใต้พิภพ เป็นพลังงานตามธรรมชาติที่เกิด และเก็บสะสมตัวอยู่ภายใต้ผิวโลก เช่นเดียวกับน้ำมันดิบปิโตรเลียม หากแต่แหล่งพลังงานเหล่านี้เก็บอยู่ในรูปของน้ำร้อนหรือไอน้ำร้อน ลักษณะที่ปรากฏออกมาให้เห็นบนผิวโลก ได้แก่ บ่อโคลนเดือด บ่อน้ำร้อน และน้ำพุร้อน ในประเทศไทยมีปรากฏการณ์ตามธรรมชาติในลักษณะน้ำพุร้อนกว่า 60 แห่งตามแนวเหนือ-ใต้แถบชายแดนตะวันตกของประเทศไทย (แนวเทือกเขาตะนาวศรี) น้ำร้อนที่ถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าแล้วนั้น แม้อุณหภูมิจะลดลงบ้าง แต่ก็ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอบแห้ง และใช้ในห้องเย็นสำหรับเก็บรักษาพืชผลทางการเกษตรได้ นอกจากนี้ น้ำที่เหลือใช้แล้วยังสามารถนำไปใช้ในกิจการเพื่อกายภาพบำบัดและการท่องเที่ยวได้อีก ท้ายที่สุดคือ น้ำทั้งหมดซึ่งยังมีสภาพเป็นน้ำอุ่นอยู่เล็กน้อย จะถูกปล่อยลงไปผสมกับน้ำตามธรรมชาติในลำน้ำซึ่งนับเป็นการเพิ่มปริมาณน้ำให้กับเกษตรกรในฤดูแล้งได้อีกทางหนึ่งด้วย

2.3.5 พลังงานชีวมวล คือ พลังงานที่ถูกเก็บสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิต หรือสารอินทรีย์ทั่วไปตามธรรมชาติหรือในชีวมวล (Biomass) ที่เราสามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานทดแทนได้ เช่น ต้นหญ้า ต้นไม้ กิ่งไม้ หรือเศษวัสดุที่เหลือจากการเกษตรหรืออุตสาหกรรม เช่น ฟาง ชี้อ้อย แกลบ ชานอ้อย เศษไม้ เปลือกไม้ มูลสัตว์ รวมทั้งของเหลือหรือขยะจากครัวเรือนมนุษย์ โดยเทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ มีดังนี้

2.3.5.1 การเผาไหม้โดยตรงหรือการสันดาป (Combustion technology) ชีวมวลส่วนใหญ่ที่นำมาเผาคือ เศษวัสดุทางการเกษตร และเศษไม้ เมื่อนำมาเผา จะได้ความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวล ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไปได้

2.3.5.2 การหมัก (Anaerobic digestion technology) เป็นการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ ชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแตกตัว เกิดแก๊สชีวภาพ ที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน ซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

2.3.5.3 การผลิตก๊าซ (Gasification technology) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นแก๊สชีวภาพ มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน ไฮโดรเจน และ คาร์บอนมอนอกไซด์สามารถนำไปใช้กับกังหันแก๊ส (gas turbine)

2.3.5.4 การผลิตเชื้อเพลิงเหลว (Liquidification technology) คือการนำสารชีวมวลไปผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปเป็นของเหลวโดยใช้ความร้อน ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งมีกระบวนการผลิตดังนี้

1. กระบวนการทางชีวภาพ จะย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ให้เป็นเอทานอล เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน ซึ่งต้องใช้เวลาในกระบวนการผลิตนาน
2. กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยสกัดน้ำมันออกจากพืชน้ำมัน จากนั้นนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล ซึ่งกระบวนการนี้จะมีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต
3. กระบวนการใช้ความร้อนสูง เช่น กระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งใช้ความร้อนสูงในสภาพไร้ออกซิเจน และเกิดการสลายตัว เป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวและแก๊สผสมกัน เป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยตรง ใช้เวลาน้อยและไม่เกิดของเสีย

2.4 น้ำมันปลาเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารกระป๋อง [10, 11]

การผลิตอาหารกระป๋องที่มีคุณภาพ และได้มาตรฐานนั้นต้องมีการดำเนินการหลายด้านประกอบกัน ไม่ว่าจะเป็นการจัดการกระบวนการผลิตภายในโรงงานอุตสาหกรรม การผลิตตามเกณฑ์มาตรฐาน ตลอดจนการควบคุมคุณภาพอย่างเคร่งครัดในทุกขั้นตอนการผลิต ดังนั้นเทคโนโลยีสะอาดจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยพัฒนากระบวนการผลิต ควบคู่ไปกับการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ซึ่งจะส่งผลดีแก่ทั้งภาคอุตสาหกรรม เศรษฐกิจ สุขภาพอนามัยของประชาชน และสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะกระบวนการผลิตปลากระป๋องพบว่ามีปริมาณของเสียส่วนใหญ่ มาจากกรรมวิธีในการเตรียมวัตถุดิบ

ปลา ที่ใช้เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปลากระป๋องนั้นมีหลายชนิด ได้แก่ ปลาทูน่า ปลาซาร์ดีน ปลาแมกเคอเรล เป็นต้น กระบวนการผลิตปลากระป๋องของแต่ละโรงงาน อาจมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะการบรรจุ โดยในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ เริ่มจากการตัดแต่งเนื้อปลา โดยตัดส่วนที่ไม่ต้องการออก ได้แก่ หัวปลาหางปลา และไส้ปลา จากนั้นจะทำการล้างปลา เนื้อปลาที่ทำการตัดแต่งแล้วจะถูกนำไปล้างให้สะอาด เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ผิวของเนื้อปลา

ซึ่งในขั้นตอนนี้ จะมีน้ำเสียเกิดขึ้นในปริมาณมากรวมทั้งมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ ซึ่งได้แก่ ไขมันและเลือดปลา จากการตัดแต่งเนื้อปลาในปริมาณที่สูง น้ำและไขมันจะแยกชั้นกัน โดยโรงงานอุตสาหกรรมจะแยกน้ำเพื่อเข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสีย การบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพใช้สมบัติทางกายภาพที่ต่างกันระหว่างน้ำกับสิ่งเจือปนเพื่อแยกสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำ การบำบัดด้วยวิธีทางเคมีใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดให้สูงขึ้น การบำบัดทางกายภาพสามารถกำจัดบีโอดีได้บางส่วน ส่วนการบำบัดทางเคมีและชีวภาพสามารถกำจัดบีโอดีได้ดี ส่วนไขมันส่วนใหญ่จะนำไปทิ้ง หรือขายต่อ ซึ่งไขมันปลาเหลือทิ้ง แสดงในรูปที่ 2.4 สามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในปริมาณสูง และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้



รูปที่ 2.4 น้ำมันปลาเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตปลากระป๋อง

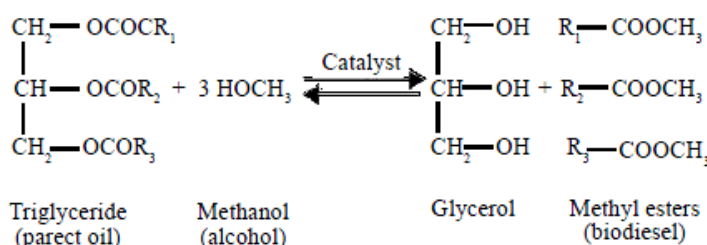


รูปที่ 2.5 น้ำมันปลาเหลือทิ้งที่ผ่านการกรองกากของเสียออกแล้ว

2.5 เทคโนโลยีในการผลิตเชื้อเพลิงดีเซล [12]

ในปัจจุบันกระบวนการที่นิยมในการผลิตเชื้อเพลิงดีเซลแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

2.5.1 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Tranesterification) เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมสูงที่สุดในการนำมาผลิตเชื้อเพลิงดีเซลในปัจจุบัน เป็นกระบวนการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไขมันหรือน้ำมัน (Triglyceride) กับแอลกอฮอล์ โดยมีตัวเร่งในปฏิกิริยาชนิดเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์, โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ หรือสารประกอบออกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์ ได้ผลิตภัณฑ์แบ่งเป็น 2 ภูมิภาคคือ เมทิลเอสเทอร์ หรือ ไบโอดีเซล และกลีเซอรอลที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกใช้ไปแล้วติดมาด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะบรรยากาศ อุณหภูมิประมาณ 37 – 87 องศาเซลเซียส กระบวนการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.6



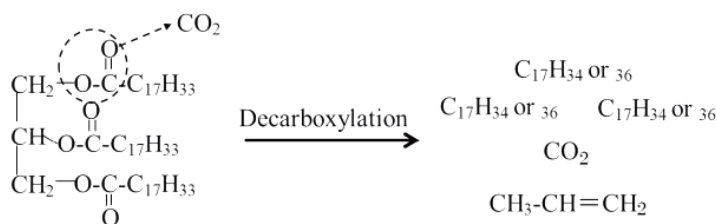
รูปที่ 2.6 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน [13]

2.5.2 กระบวนการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking) เป็นการนำไตรกลีเซอไรด์มาแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะทรานซิชันภายใต้ความดันที่เป็นไฮโดรเจนที่สูง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จำพวกแอลเคนที่เป็นโซ่ตรง จำนวนมากซึ่งเป็นพวกพาราฟิน และแนฟทีน นอกจากนี้ยังให้ค่าซีเทนสูงอีกด้วย

2.5.3 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis reaction) เป็นกระบวนการในการแตกสลายโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ความร้อนสูงในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. กระบวนการแตกตัวเชิงความร้อน (thermal cracking) คือ กระบวนการเปลี่ยนสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง หากมีการควบคุมอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาได้ดี จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงตามต้องการ แต่ถ้าให้ความร้อนที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการแตกตัวได้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กเกินไปจนอยู่ในสถานะที่เป็นแก๊ส ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ เนื่องจากไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้

2. กระบวนการแตกตัวเชิงความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking) คือ การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา เป็นการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาช่วยในการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดของโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงในสภาวะที่ไร้อากาศ ด้วยกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation reaction) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีโครงสร้างเหมาะสมที่จะนำไปใช้ประโยชน์ตามต้องการได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะขึ้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้



รูปที่ 2.7 กระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน [19]

2.6 ปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน [14, 15]

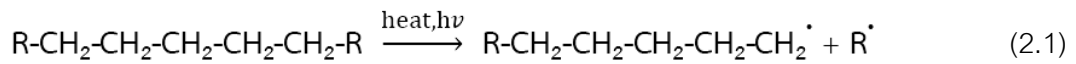
ปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน แบ่งออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

2.6.1 กระบวนการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน

การแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก โดยอุณหภูมิจะมีบทบาทอย่างมากในการแตกสลายสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน จากสารที่ระเหยได้ให้อยู่ในรูปอนุโมลอิสระ จากนั้นอนุโมลอิสระจะเกิดการรวมตัวกันเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็ก หากมีการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงได้ดี จะสามารถทำให้การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิง ที่ต้องการได้มากที่สุด แต่หากมีการให้ความร้อนมากเกินไป อาจทำให้การแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมากเกินไป จนได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนภาวะแก๊ส $\text{C}_1 - \text{C}_4$ ซึ่งไม่ต้องการและไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนส่วนที่มีแซนโอเลฟิน (olefin) และไดโอเลฟิน (diolefin) อาจทำปฏิกิริยากันเองเนื่องจากมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา

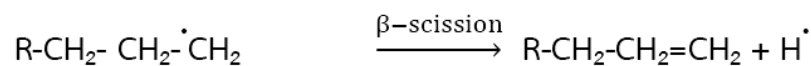
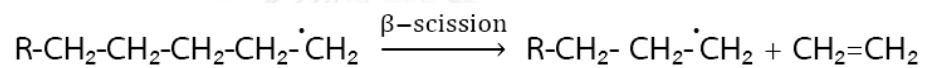
กระบวนการแตกตัวโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาแบบอนุโมลอิสระ (free radical) ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นเริ่มต้น (initiation step) เป็นขั้นตอนในการเกิดอนุมูลอิสระ เนื่องจากความร้อนทำให้เกิดการแตกพันธะของสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอน ได้เป็นอนุมูลอิสระซึ่งจะไปทำปฏิกิริยาในขั้นต่อไป ดังแสดงในสมการที่ 2.1

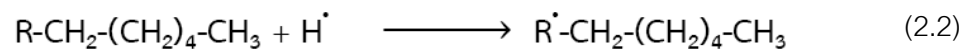


2. ขั้นการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (propagation step) เกิดจากอนุมูลอิสระทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง เกิดการเปลี่ยนรูปของไอโซเมอร์และมีการแตกพันธะเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่สายโซ่สั้นลงพร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้น นอกจากนี้อนุมูลอิสระอาจทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นเกิดเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้นอีก ทำให้ได้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่สายโซ่สั้นลงต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ดังแสดงในสมการที่ 2.2

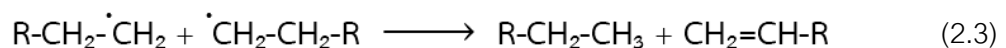
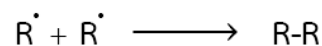
β -scission



Chain transfer



3. ขั้นหยุดปฏิกิริยา (termination step) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากันเองเพื่อหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่องเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจเกิดเป็นโมเลกุลใหม่ โมเลกุลเดี่ยวหรือเกิดเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล ดังแสดงในสมการที่ 2.3

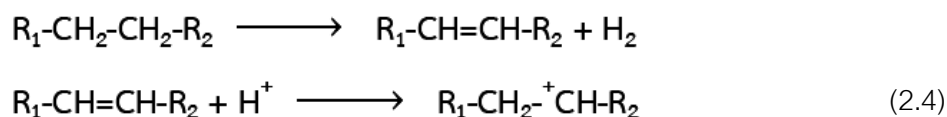


2.6.2 กระบวนการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

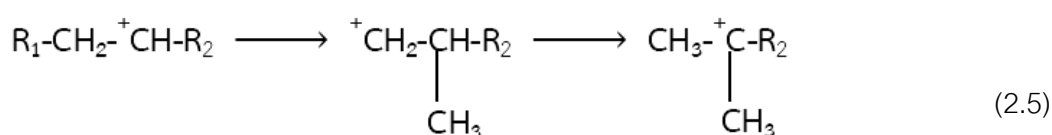
การแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการสลายพันธะของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างตามที่ต้องการ กลไกของการแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา มีดังนี้

1. ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (dehydrogenation) และปฏิกิริยาการเกิดคาร์โบแคทไอออน (carbocation) เกิดจากการที่โมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรดีไอออนที่มีประจุลบให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดสูง ทำให้คาร์โบแคทไอออน มีสภาพที่เป็นบวกทางไฟฟ้า

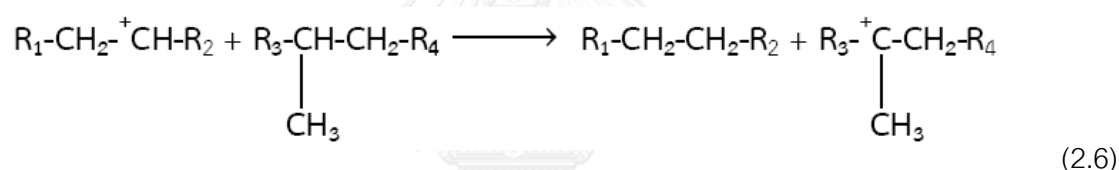
โดยคาร์โบแคทไอออนที่เกิดขึ้นจะมีเสถียรภาพแตกต่างกันออกไปตามโครงสร้างของไอออน ซึ่งโครงสร้างของไอออนแบบ tertiary ion จะมีเสถียรภาพที่มากกว่าแบบ secondary ion และแบบ primary ion ตามลำดับ แสดงในสมการที่ 2.4



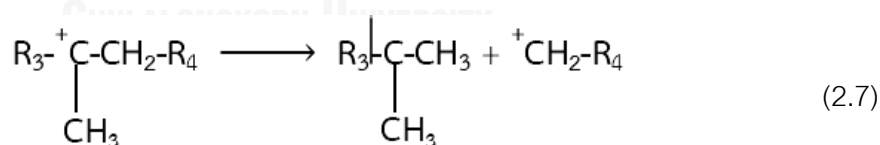
2. ปฏิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลคาร์โบแคทไอออน ซึ่งเกิดจากความเสถียรที่ต่างกันของโครงสร้างของคาร์โบแคทไอออน แต่ละลักษณะ จึงเกิดการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลเพื่อให้โครงสร้างของคาร์โบแคทไอออนที่มีเสถียรภาพ ดังสมการที่ 2.5



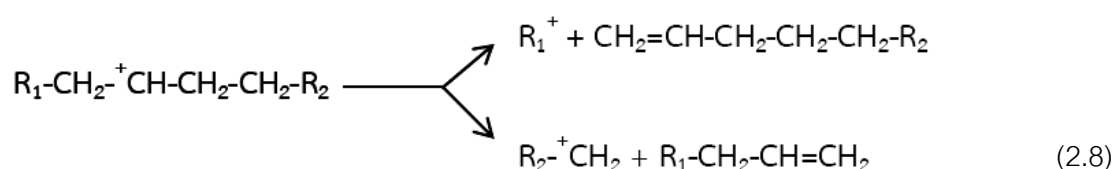
จากนั้นเกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ (hydride transfer) ระหว่างคาร์โบแคทไอออนกับโมเลกุลของสารประกอบไฮไดรด์คาร์บอน ดังสมการที่ 2.6



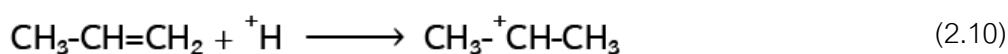
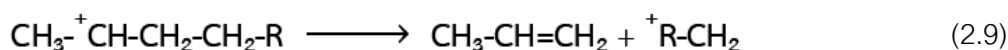
ในส่วนของคาร์โบแคทไอออน ที่มีขนาดใหญ่สามารถแตกตัว หรือเกิดปฏิกิริยาที่ตำแหน่ง β นับจากจุดที่มีประจุบวก เกิดเป็นสารประกอบโอเลฟินและคาร์โบแคทไอออนที่มีขนาดเล็กลง ส่วนใหญ่มักเกิดเป็นโครงสร้างแบบ primary carbocation ดังสมการที่ 2.7



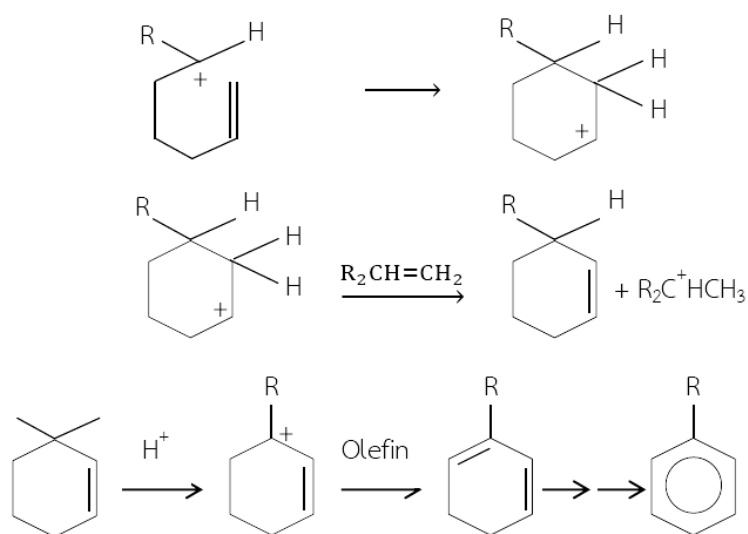
ในบางกรณีคาร์โบแคทไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้มากกว่า 1 รูปแบบ เช่น ตัวอย่างของ secondary carbonium ion ดังแสดงในสมการที่ 2.8



แต่หาก R_1 เป็น H จะเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ โพรพีน จะเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอนและอยู่ในรูปคาร์โบแคทไอออนซึ่งไม่สามารถเกิด β -scission ต่อไปได้อีก ดังแสดงในสมการที่ 2.9 และ สมการที่ 2.10



Isopropyl carbocation เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสมการที่ 2.10 สามารถเกิดปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายไฮโดรด์กับโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรเพน หรืออาจเกิดการสูญเสียโปรตอนและได้โพรพีนเป็นผลิตภัณฑ์ ในส่วนของการเกิดวง แอโรแมติกจะเกิดจากปฏิกิริยา dehydrocyclization ซึ่งโอเลฟินจะเกิดเป็นคาร์โบแคทไอออนแล้วเกิดปฏิกิริยา β -scission ได้เป็นสารประกอบ olefin carbocation ที่มีลักษณะเป็นวงแหวน จากนั้นเกิดปฏิกิริยากับโอเลฟินโดยเกิดการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ไอออนจากบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ allylic carbocation ที่มีความเสถียรและรับโปรตรอนจาก cyclohexadiene สุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแอโรมาติก ดังแสดงในสมการที่ 2.11



(2.11)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกพันธะโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยแก๊สที่มีโอเลฟินสูง องค์ประกอบของวงเบนซีนที่มีค่าออกเทนสูง เนื่องจากมีสารจำพวกแอโรแมติกและโอเลฟินมาก ส่วนของกากน้ำมันและโค้ก (coke) จะเกาะอยู่บนบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้พื้นที่ผิวและความว่างในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.6.3 การแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมในปฏิกิริยา

เป็นกระบวนการที่เกิดทั้งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา และปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีกิ่งจำนวนมาก เกิดเป็นพาราฟินและแนฟทีน เริ่มต้นจากการเกิดโอเลฟินขึ้นบริเวณที่เป็นโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว โอเลฟินก็จะไปทำให้เกิดคาร์โบแคทไอออนที่บริเวณที่เป็นกรดต่อไป จากนั้นจะเกิดการแตกตัวแล้วก็จะถูกเติมไฮโดรเจนให้อิ่มตัวทันทีที่ปฏิกิริยาต่างๆเกิดขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นประเภทสองหน้าที่ (dual function) คือ ทั้งแตกตัวและเติมไฮโดรเจน จึงมักประกอบด้วยสารพวกซิลิกา-อลูมินา สำหรับการแตกตัวพร้อมด้วยโลหะร่วมกับการเติมไฮโดรเจน โลหะที่นิยมใช้ คือ Pt, Pd, W และ Ni ปฏิกิริยาเกิดที่ตรงผิวโลหะเป็นการเติมไฮโดรเจน ซึ่งจะช่วยให้บริเวณที่มีฤทธิ์เป็นกรดสะอาดไปด้วย เพราะคอยเติมไฮโดรเจนกำจัดพวกที่จะทำให้เกิดโค้กออกไป

กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมนี้เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ทำให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์สูง จำเป็นต้องมีการควบคุมการเพิ่มขึ้น ของอุณหภูมิให้เหมาะสม เพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดโค้กและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาได้ และอาจทำให้เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความเสียหายอีกด้วย

2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา [16-19]

ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารที่ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้เข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น เนื่องจากช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา (activation energy) ให้ต่ำลง แม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีส่วนร่วมในบางขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยา แต่สุดท้ายมันต้องเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปเดิมหลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุดแล้ว ข้อดีของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการ มีดังนี้

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการแตกตัวของวัตถุดิบ
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้เลือกผลิตผลิตภัณฑ์ได้อย่างเฉพาะเจาะจง
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดมลพิษบางตัวที่เกิดจกสารปนเปื้อนมากับวัตถุดิบที่ได้
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้

2.7.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

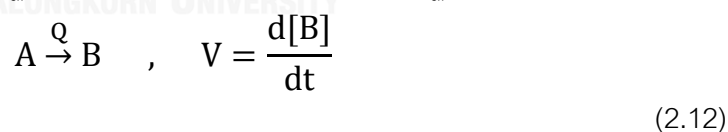
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalysts) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในวัฏภาคเดียวกับสารตั้งต้น ซึ่งอาจมีสถานะของเหลวหรือแก๊สก็ได้ ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาในสิ่งมีชีวิตที่เร่งโดยเอนไซม์ และปฏิกิริยาในสารละลาย ข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์คือประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูง และสามารถเลือกให้เร่งปฏิกิริยาที่ต้องการได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือ มักสลายตัวหรือเสียสภาพในภาวะที่ใช้ความร้อนหรือความดันสูง แยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นที่เหลือและผลิตภัณฑ์ยาก และอายุการใช้งานสั้นกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalysts) คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยา เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สหรือของเหลว การใช้ตัวเร่งแบบวิวิธพันธ์พบได้ในอุตสาหกรรมหลายๆอย่าง เช่น ปุ๋ย ผลิตภัณฑ์ยา เชื้อเพลิง เส้นใยสังเคราะห์ ตัวทำละลาย เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งนั้นมีความแข็งแรงทนทานต่อความดันและอุณหภูมิสูง สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นที่เหลือและผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ที่สำคัญมีอายุการใช้งานนาน

2.7.2 เทอมที่เกี่ยวข้องกับการเร่งปฏิกิริยา

1. ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic efficiency) ในปฏิกิริยาเปลี่ยนสารตั้งต้น A ไปเป็นผลิตภัณฑ์ B โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Q ด้วยอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา V ดังสมการที่ 2.12

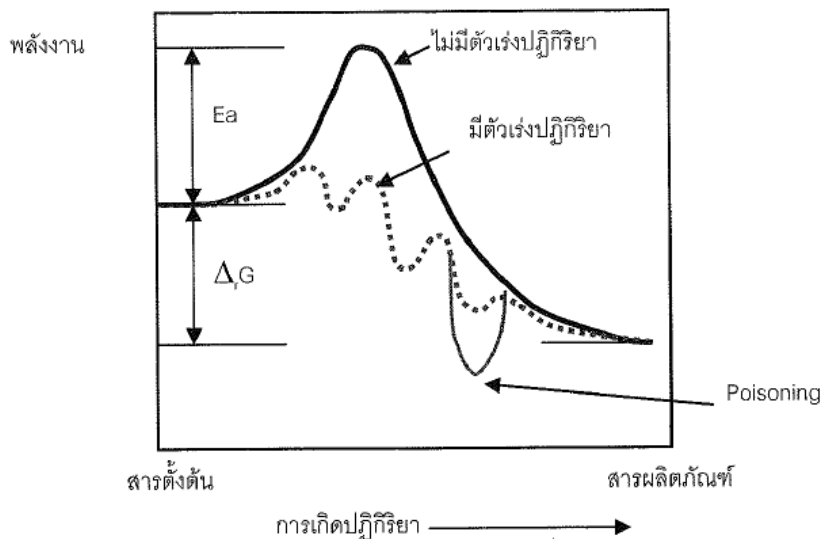


ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถสังเกตได้โดยตรงจากค่าความถี่ผันเวียน (Turnover Frequency) ซึ่งแสดงโดยค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งกัมมันต์ คือ อัตราการเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าความถี่ผันเวียน แทนด้วย N หาได้จากสมการที่ 2.13 จากอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา V ต่อความเข้มข้นของสาร C_A ซึ่งในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์สามารถแทนด้วยค่าพื้นที่กัมมันต์ได้

$$N = \frac{V}{C_A} \quad (2.13)$$

2. วัฏจักรของการเร่งปฏิกิริยา (catalytic cycle) หลักของการเร่งปฏิกิริยา คือ การที่สารตั้งต้นถูกเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ และได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ กลไกของปฏิกิริยา (reaction mechanism) ที่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นไปเป็นสารมัธยันตร์ (intermediates) และสารผลิตภัณฑ์ โดยอาจมีการเปลี่ยนแปลงของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย เมื่อวัฏจักรของปฏิกิริยาครบรอบแล้วจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับคืนมาเหมือนเดิม

3. การเปลี่ยนแปลงพลังงาน (energetics) ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้โดยการเปลี่ยนวิถีของปฏิกิริยา โดยวิถีใหม่จะมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกิบส์ (gibbs energy of activation, ΔG) ต่ำกว่าวิถีเดิม ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 พลังงานกระตุ้นปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยา [20]

จากรูปจะเห็นว่าระดับพลังงานของวิถีใหม่ไม่สูง แต่ต้องไม่ต่ำกว่าค่าพลังงานของสารผลิตภัณฑ์ ถ้าวิถีใหม่ที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์มีพลังงานต่ำกว่าวิถีของผลิตภัณฑ์ปกติ จะเรียกว่าเกิดพอยซันนิง (poisoning) จะทำให้วัฏจักรของปฏิกิริยาถูกทำลาย และไม่เกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ และเกิดการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย

4. กัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (activity) คือความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อเข้าสู่สมดุล เป็นการวัดเชิงปริมาณว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้มากเท่าใดในการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งความดัน อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ มีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยการหำร้อยละกัมมันตภาพ หากจากผลต่างของปริมาณสารตั้งต้นที่ใส่เข้าไปและออกจากระบบ (input reactant – output reactant) เทียบกับปริมาณสารตั้งต้นที่ใส่เข้าไป ดังสมการที่ 2.14

$$\%Activity = \frac{(\text{Input reactant} - \text{Output reactant}) \times 100}{\text{Input reactant}} \quad (2.14)$$

5. สัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา (selectivity) คือ ความสามารถในการเลือกเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการโดยเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง (side reaction) น้อยที่สุด หาได้จากสัดส่วนของปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิด (desired reaction) ต่อปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งหมด (all reactions) ดังแสดงในสมการที่ 2.15

$$\%Selectivity = \frac{(\text{Desired reaction}) \times 100}{\text{All reaction}} \quad (2.15)$$

6. การทำให้คืนสภาพ (regeneration) คือการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เสื่อมสภาพแล้วหลังจากการใช้งานมาทำให้กลับไปอยู่ในสภาพที่ว่างไวและใช้งานได้เหมือนเดิม

7. อายุการใช้งาน (lifetime) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีต้องมีอายุการใช้งานนาน สามารถใช้ในการเร่งปฏิกิริยาได้หลายรอบโดยไม่เสื่อมสภาพ การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยานั้นต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของมันด้วย เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเร่งปฏิกิริยาได้หลายปฏิกิริยา และปฏิกิริยาข้างเคียงบางปฏิกิริยาอาจทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้อีกต่อไป

8. ตัวยับยั้ง (inhibitor) คือ สารที่ทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเกิดช้าลง ตัวยับยั้งปฏิกิริยาที่แข็งแรงจะเกิดพันธะกับตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้สารตั้งต้นไม่สามารถเกิดพันธะกับตัวเร่งปฏิกิริยาได้อีก

2.7.3 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญ เช่น พื้นที่ผิว (surface area) ปริมาตรรูพรุน (pore volume) ขนาดรูพรุน (pore size) และการกระจายตัวของขนาดรูพรุน (pore size distribution)

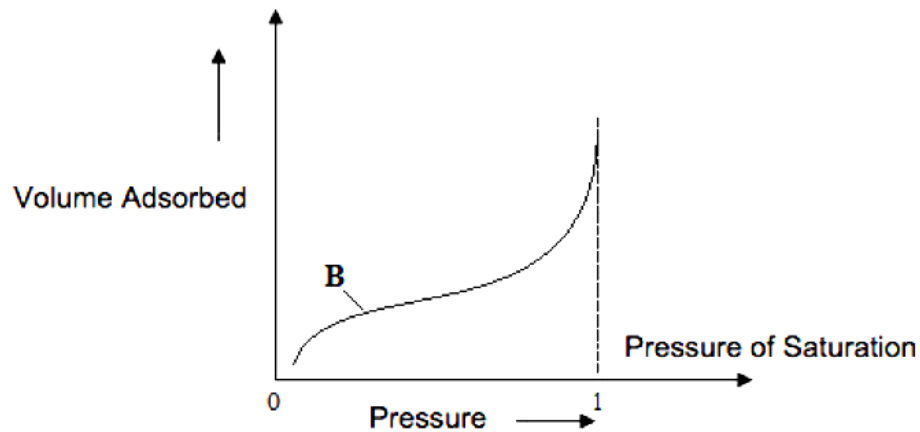
พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (surface area) มีความสำคัญมาก เนื่องจากจะบ่งบอกความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยายิ่งมีพื้นที่ผิวมากจะยิ่งมีความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี การเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำได้โดยลดขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาให้เป็นผงละเอียด แต่วิธีการนี้ทำได้ยาก จึงนิยมเพิ่มพื้นที่ผิวโดยการทำให้เกิดเป็นโพรงเล็กๆจำนวนมาก ซึ่งวิธีนี้เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวได้ดีที่สุด

ขนาดและจำนวนของรูพรุน (size and number of pores) บอกปริมาณพื้นที่ผิวภายในตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวภายในสูงจะมีรูพรุนอยู่อย่างหนาแน่น ทำให้การกระจายตัวของตำแหน่งกัมมันต์ (active site) สูง และขนาดของรูพรุนที่เลือกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับโมเลกุลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ขนาดของโพรงของตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งเป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. แมคโครพอร์ (macropores) เป็นกลุ่มที่มีขนาดของโพรงใหญ่กว่า 50 nm หรือมีรัศมีเฉลี่ยของโพรงใหญ่กว่า 25 nm
2. มีโซพอร์ (Mesopore) มีขนาดของโพรงระหว่าง 2-3 นาโนเมตรจนถึง 50 นาโนเมตร หรือมีรัศมีเฉลี่ยของโพรงระหว่าง 1 และ 25 นาโนเมตร
3. ไมโครพอร์ (Micropore) มีขนาดของโพรงน้อยกว่า 2-3 นาโนเมตร หรือรัศมีเฉลี่ยของโพรงน้อยกว่า 1 นาโนเมตร

2.7.4 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน โดยใช้วิธีบีที (Brunauer Emmett Teller Method, BET)

การวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน เป็นขั้นตอนหนึ่งของการศึกษาการเร่งปฏิกิริยา ทำได้โดยการศึกษาดูดซับของแก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สที่มีขนาดเล็ก เช่น อาร์กอน โดยใช้ประโยชน์จากไอโซเทิร์มของการดูดซับทางกายภาพ ที่อุณหภูมิของแก๊สเหลว (ในที่นี้เป็นอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวหรืออาร์กอนเหลว) ซึ่งขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ โดยจะหาจำนวนโมเลกุลที่ใช้เพื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวภายในได้ ดังรูปที่ 2.9 การดูดซับของแก๊สไนโตรเจน จะเกิดขึ้นเร็วในช่วงแรกโดยจะเพิ่มตามความดัน จนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนแปลง (ตำแหน่ง B) ซึ่งเส้นกราฟจะราบ แสดงถึงปรากฏการณ์ที่การดูดซับบนพื้นผิวเป็นแบบชั้นเดียว และเมื่อความดันย่อยของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจนเกินจุดที่เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว จะเกิดการควบแน่นของไนโตรเจนเหลวในรูพรุนทำให้ปริมาตรของการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



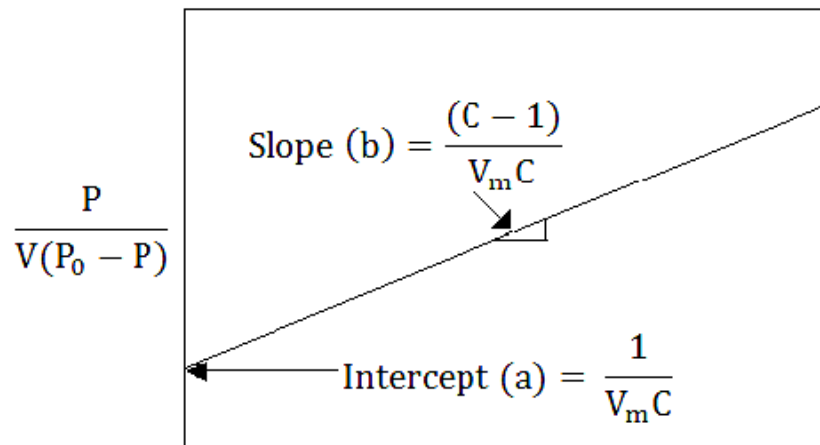
รูปที่ 2.9 การวัดพื้นที่ผิวโดยใช้วิธีบีอ์ที [21]

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดันย่อยต่างๆ และปริมาตรที่ถูกดูดซับแล้วเกิดเป็นการดูดซับชั้นเดียว คือ สมการของบีอ์ที ดังแสดงในสมการที่ 2.16

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{CV_m} + \frac{(C - 1)P}{V_m CP_0} \quad (2.16)$$

เมื่อ	P	คือ ความดันย่อยของแก๊สที่ถูกดูดซับ
	P_0	คือ ความดันอิ่มตัวของแก๊สที่ถูกดูดซับ ณ อุณหภูมิที่ศึกษา
	V	คือ ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ความดัน P
	V_m	คือ ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ทำให้เกิดการปกคลุมชั้นเดียว
	C	คือ ค่าคงที่

สมการที่ 2.16 เขียนได้ในรูปของกราฟเส้นตรง $y = a + bx$ เมื่อให้ x เป็น P/P_0 , y เป็น $P/V(P_0 - P)$, a คือ จุดตัดแกน y เป็น $1/V_m C$ และเทอม b คือ ความชัน เป็น $(C-1)/V_m C$ จากนั้นเขียนกราฟที่ได้จากการคำนวณในรูปเส้นตรงของสมการบีอ์ที ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟเส้นตรงของสมการปรีตี [21]

จากสมการของปรีตีที่สามารถคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะของสารได้ โดยนำปริมาตรของแก๊สที่ปกคลุมผิวของสาร หรือ V_m ที่ได้จากสมการที่ 2.16 ไปคำนวณจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ 1 ชั้นโมเลกุล แล้วจึงนำไปคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้สมการที่ 2.17 ดังนี้

$$S_{sp} = \frac{N_A a_{max} S_0}{W} \quad (2.17)$$

เมื่อ	S_{sp}	คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของสาร (ตารางเมตรต่อกรัม)
	N_A	คือ เลขอาโวกาโดร มีค่าเท่ากับ 6.02×10^{23} (จำนวนโมเลกุลต่อกรัมโมล)
	a_{max}	คือ จำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ 1 ชั้นโมเลกุล เท่ากับ $V_m/22,414$
	S_0	คือ พื้นที่ผิวหน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ มีค่าเท่ากับ 1.62×10^{-20} (ตารางเมตร)
	W	คือ น้ำหนักของสารหรือตัวดูดซับ (กรัม)

2.7.5 การดูดซับและการคายซับ

การดูดซับ (adsorption) คือ การเกิดพันธะเคมีระหว่าง ตัวดูดซับ (adsorbent) กับตัวถูกดูดซับ (adsorbate) บนตำแหน่งกัมมันต์ (active site) เพื่อให้โมเลกุลเหล่านั้นเกิดปฏิกิริยาต่อไป การดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

- การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) จึงมีค่าความร้อนของการดูดซับต่ำ (น้อย

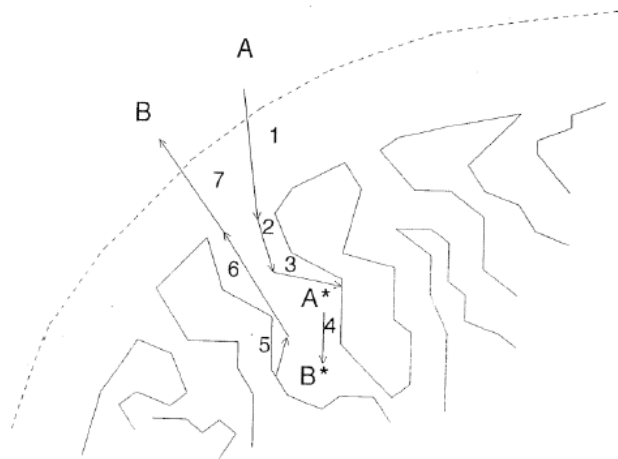
กว่า 25 กิโลจูลต่อโมล) เป็นกระบวนการคายความร้อน ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์ และไม่มีการแตกพันธะ ปฏิกิริยาจึงสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ทำให้สามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่าย

- การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) การดูดซับทางเคมีอย่างง่ายเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) โดยตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน โดยมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมสร้างเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น ความร้อนของการดูดซับมีค่าประมาณ 60 – 85 กิโลจูลต่อโมล และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) ดังนั้นการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำได้ยาก

การคายซับ (desorption) คือ การแตกออกของพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ทำให้ได้ตำแหน่งกัมมันต์กลับคืนมา

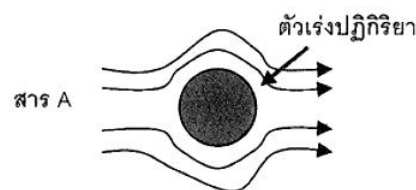
2.7.6 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในปฏิกิริยาวិวิพันธ์

กลไกของการถ่ายเทมวลสารซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยามี 7 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาในปฏิกิริยาวิวิพันธ์ [17]

1. การแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้น (external diffusion) เป็นการแพร่ของสารตั้งต้น A ที่จะแพร่ไปยังผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในขั้นตอนนี้ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี



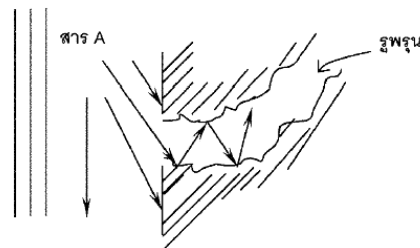
รูปที่ 2.12 การแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้น [16]

จากรูปสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.18

$$k_{\text{exit, diff.}} = k_g S_{\text{exit}} \quad (2.18)$$

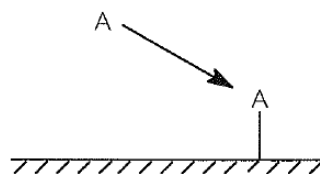
เมื่อ $k_{\text{exit, diff.}}$ คือ ค่าคงตัวของการแพร่ภายนอก (external diffusion coefficient)
 k_g คือ สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient)
 S_{exit} คือ พื้นที่ผิวภายนอกของอนุภาคต่อปริมาตรของอนุภาค

2. การแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน (internal pore diffusion) เป็นการแพร่ของสารตั้งต้น A จากผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านเข้าไปภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากรูพรุนมีขนาดเล็กและรูปร่างไม่แน่นอน ทำให้ระหว่างการแพร่จะมีการชนกันเองระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น หรือชนกับผนังของรูพรุน ในขั้นตอนนี้ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ดังรูปที่ 2.13



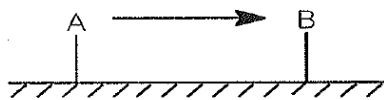
รูปที่ 2.13 การแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน [16]

3. การดูดซับ (adsorption) เป็นการดูดซับของสารตั้งต้น A ไปยังผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ในการเร่งปฏิกิริยานั้น การดูดซับจะเป็นการดูดซับในเชิงเคมีเสมอ คือ เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น A ในกรณีนี้เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) กับผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง ในกรณีนี้เรียกว่าตัวดูดซับ (adsorbent) ทำให้เกิดการจับของสารตั้งต้นเป็นชั้นเดียว (Monolayer) บนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.14 การดูดซับทางเคมีของสาร A บนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา [16]

4. ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) โมเลกุลของสารตั้งต้น A เกิดปฏิกิริยาเคมีไปเป็นผลิตภัณฑ์ B ที่ตำแหน่งซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา (active sites) ซึ่งเป็นลักษณะของปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) แสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจากโมเลกุล A ไปเป็น B [16]

5. การคายซับ (desorption) ขั้นตอนนี้โมเลกุลของผลิตภัณฑ์ B จะเกิดการคายหรือหลุดออกจากผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการสิ้นสุดการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีในขั้นตอนสุดท้าย

6. การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ออกจากภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นการแพร่ของผลิตภัณฑ์ B ผ่านรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยากลับไปสู่ผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้าปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ สารที่แพร่ออกมาก็จะมีสารที่เป็นสารตั้งต้นด้วย

7. การแพร่ของผลิตภัณฑ์ B จากผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้สารที่เป็นผลิตภัณฑ์จะแพร่ออกจากผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาและอาจจะมีสารตั้งต้นแพร่ออกมาด้วยเช่นกันหากเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์

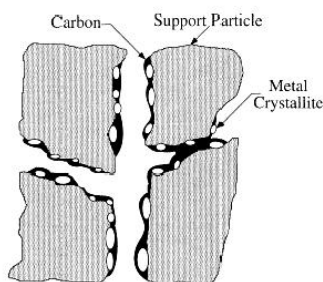
2.7.7 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (Deactivation)

การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ การที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาลดลง ถ้าจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาทำงานได้เหมือนเดิมต้องนำตัวเร่งมาผ่านกระบวนการคืนสภาพ (regeneration process) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูประจุที่เสื่อมสภาพให้กลับมามีอยู่ในสภาพที่เร่งปฏิกิริยาได้อีกครั้งหนึ่ง สาเหตุการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยามีหลายสาเหตุ [18] ดังนี้

1. การเสื่อมสภาพเนื่องจากพอยซันนิง (Poisoning) เป็นการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดจากการเกาะติดของสารพอยซัน (Poison) บนพื้นที่กัมมันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมีอย่างแข็งแรง (strong chemisorption) ทำให้สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปและไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ เช่น ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของเอทิลีน โดยมีโลหะกัมมันต์เป็นสารพอยซันที่เกิดการดูดซับอยู่บนพื้นที่กัมมันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ขัดขวางการเติมไฮโดรเจนของเอทิลีน

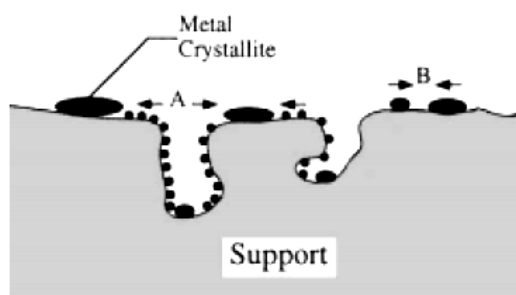
2. การเสื่อมสภาพของเม็ดอนุภาค คือการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับแรงกระแทกหรือแรงขัดสีที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ อาจทำให้เกิดการหลุดออกขององค์ประกอบบางตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลของเม็ดอนุภาคนั้น

3. การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจากการเกิดถ่านโค้ก (Coking) ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน หรือ CO_x มักมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น ทำให้เกิดกลุ่มของคาร์บอนปกคลุมหรือปิดกั้นพื้นผิวกระตุ้นแบบกายภาพ (Physical) ทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง เราเรียกกลุ่มคาร์บอนดังกล่าวว่าถ่านโค้ก (Coke) ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การเกิดโค้กที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา [18]

4. การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากการซินเทอริง (Sintering) เป็นการลดลงของพื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพโดยมีการปรับโครงสร้างภายในของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนใหญ่เป็นผลจากความร้อนและทางกายภาพ ซินเทอริงสามารถเกิดได้ทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะบนตัวรองรับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวรองรับซึ่งเป็นการเคลื่อนที่มารวมกัน (Migration) ของผลึกโลหะไปเป็นผลึกโลหะที่ใหญ่ขึ้น แสดงในรูปที่ 2.17

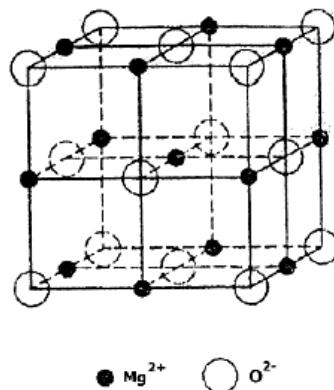


รูปที่ 2.17 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบซินเทอริง [18]

5. การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงในสถานะของแข็ง (Solid state transformation) เป็นการเสื่อมสภาพที่เป็นผลต่อเนื่องและรุนแรง เกิดขึ้นจากกระบวนการซินเทอริงที่อุณหภูมิสูงมากขึ้น กล่าวคือ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะกระตุ้นกับตัวรองรับ เช่น นิกเกิลกับ Al_2O_3 เกิดเป็นนิกเกิลอลูมินาต (Nickel aluminate) ที่ 1000 องศาเซลเซียส

2.7.8 ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

แมกนีเซียมออกไซด์ เป็นโลหะออกไซด์ที่มีความเป็นเบส มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาสูง เช่น ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของเบนซัลดีไฮด์ (benzaldehyde) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของอะคริไนด์ไนไตรล (acrylonitrile) และปฏิกิริยาแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันพืช เป็นต้น รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างผลึกของแมกนีเซียมออกไซด์



รูปที่ 2.18 โครงสร้างผลึกของแมกนีเซียมออกไซด์ [22]

2.8 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำมัน [23, 24]

วิเคราะห์หาคคุณภาพของน้ำมันดิบในปัจจุบันใช้วิธีแยกน้ำมันดิบออกตามคาบจุดเดือด ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย และใช้เวลาไม่นาน เหมาะกับที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวสำเร็จรูป สามารถแบ่งได้ดังนี้

1. พวกที่มีคาบจุดเดือดตั้งแต่ IBP (Initial boiling point) จนถึง 200 องศาเซลเซียส เรียกว่า แก๊สโซลีน (gasoline fraction) มักใช้ในการผลิตน้ำมันเบนซิน
2. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 200 – 250 องศาเซลเซียส เรียกว่าน้ำมันก๊าด (kerosene fraction) มักใช้น้ำมันก๊าดเพื่อให้แสงสว่าง ถ้าจุดเกิดควันไม่ต่ำจนเกินไป น้ำมันก๊าดที่ได้จะมีคุณภาพดี แต่ถ้าจุดเยือกแข็งต่ำจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงอากาศยานไอพ่นได้
3. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 250 – 350 องศาเซลเซียส เราเรียกกันว่าแก๊สออยล์ชนิดเบา (light gas oil) มักนำมาใช้เป็นน้ำมันเครื่องยนต์
4. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 350 – 370 องศาเซลเซียส เรียกว่าแก๊สออยล์ (gas oil) มักนำมาใช้เป็นน้ำมันเครื่องยนต์ดีเซล

5. พวกที่มีค่าบจุดเดือดสูงกว่า 370 องศาเซลเซียส เรียกว่ากากน้ำมัน (residue) สามารถนำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่น นำมาใช้เป็นน้ำมันเตา ผลิตเป็นยางมะตอย เป็นต้น

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Adewale และคณะ [25] ศึกษาแนวโน้มล่าสุดของการผลิตไบโอดีเซลจากของเสียไขมันสัตว์และเทคนิคการผลิตที่เกี่ยวข้อง พบว่า กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมสูงที่สุดในการนำมาผลิตเชื้อเพลิงดีเซลในปัจจุบัน เป็นกระบวนการที่ต้องใช้แอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้นในการผลิต โดยจะควบคุมให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้น ภายใต้สภาวะบรรยากาศ อุณหภูมิประมาณ 37 – 87 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นเอสเทอร์ (FAME) และกลีเซอรอล แต่ในกระบวนการนี้ก็มีข้อเสียคือ จะถูกปนเปื้อนด้วยน้ำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว กรดไขมันอิสระ ซึ่งยากในการกำจัด และไบโอดีเซลที่ผลิตจากไขมันสัตว์ที่ได้มาโดย วิธีการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันมีปริมาณสารสายโซ่ยาวอิมิตัวมาก ส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำมันที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งของเสียไขมันจากสัตว์มีปริมาณของกรดไขมันอิสระ (FFAs) สูงกว่าน้ำมันพืช จึงอาจเกิดสบู่ขึ้นในตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ทำให้ลดอัตราผลตอบแทนที่ได้ ดังนั้นจึงให้ความสนใจกับวิธีไพโรไลซิส ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย และเป็นเทคโนโลยีที่ต้นทุนต่ำ ในการผลิตไบโอดีเซลจากของเสียไขมันสัตว์

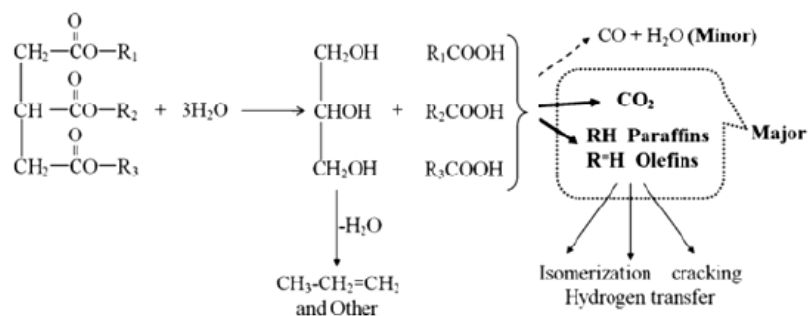
Ito และคณะ [26] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากของเสียไขมันสัตว์โดยใช้วิธีไพโรไลซิส ผลที่ได้คือ ไตรเอซิลกลีเซอรอลมีการสลายตัวที่ 360 – 390 องศาเซลเซียส กรดไขมันที่ถูกสร้างขึ้นโดยการแตกของพันธะเอสเทอร์และสารไฮโดรคาร์บอนห่วงโซ่สั้นและกรดไขมันห่วงโซ่สั้นที่ถูกสร้างขึ้นโดยการแตกของพันธะไม่อิ่มตัวในห่วงโซ่ไฮโดรคาร์บอนเมื่อเวลาผ่านไปที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส น้ำมันเบา ถูกสร้างขึ้นโดย กระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน ของกรดไขมัน โดยเมื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Pd / C จะช่วยเสริมกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชันมากขึ้น และลดระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น และได้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนในอัตราผลตอบแทนในระดับสูงที่ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับไบโอดีเซลที่ได้จากวิธีการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันไบโอดีเซลที่ได้จากการไพโรไลซิสปรับตัวดีขึ้นประมาณ -5 องศาเซลเซียส ในจุดจุดตันไส้กรองที่อุณหภูมิต่ำ

Natewong และคณะ [27] ได้ศึกษาผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยา MgO บนตัวรองรับชนิดต่างๆที่ใช้สำหรับการผลิตไฮโดรคาร์บอนไบโอดีเซล โดยทั่วไปออกไซด์โลหะพื้นฐาน MgO มีประสิทธิภาพการทำงานเทียบเท่ากับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ จึงสามารถนำมาใช้เร่งปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันแทน Pd, Pt และ Rh ได้ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษา ตัวเร่งปฏิกิริยา MgO บนตัวรองรับ ZrO₂ และ ถ่านกัมมันต์ในการเร่งปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของน้ำมันปรุงอาหารเหลือทิ้ง โดยการ

ทดลองปฏิกิริยาสำหรับการประเมินผลการปฏิบัติงานเร่งปฏิกิริยาได้ดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์ที่ 430 องศาเซลเซียส พบว่า MgO-ZrO₂/AC เหมาะกับการใช้ในปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเนื่องจาก ZrO₂ สามารถยับยั้งการเกิดโค้กได้

Jungjaroenpanit [28] ศึกษาการไพโลไรซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยา MgO และถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร ทำการศึกษาที่ภาวะอุณหภูมิ 380 – 430 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 60 – 80 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100 – 300 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา MgO และถ่านกัมมันต์ร้อยละ 30 – 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณและองค์ประกอบของน้ำมันที่เกิดขึ้น ด้วยเครื่อง Simulate Distillation Gas Chromatography (DGC) ภาวะที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม design-expert พบว่าภาวะของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยา MgO และถ่านกัมมันต์คืออุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 66.60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา MgO และถ่านกัมมันต์ร้อยละ 60.00 โดยน้ำหนัก จะได้ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจะ 74.78 โดยน้ำหนัก ผลได้ของเนฟทาร์ร้อยละ 20.17 โดยน้ำหนัก ผลได้ของเคโรซีนร้อยละ 10.39 โดยน้ำหนักและผลได้ของดีเซลร้อยละ 43.82 โดยน้ำหนัก

Tani และคณะ [12] ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการแตกตัวของ ไตรกลีเซอไรด์ที่มีความจำเพาะในการได้ผลิตภัณฑ์เป็นดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SiO₂, MgO-SiO₂, carbon, MgO-carbon, Spent FCC และ MgO พบว่าการใช้ MgO-carbon เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการแตกตัวของน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความเป็นกรดและค่าไอโอดีนต่ำ ร้อยละของน้ำมันสูงถึง 64.9 และได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง จึงกล่าวได้ว่า MgO ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ของไตรกลีเซอไรด์หรือกรดไขมันอิสระ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารไฮโดรคาร์บอนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังปฏิกิริยา



โดยปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชัน เมื่อใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แมกนีเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิกได้เป็นแมกนีเซียมคาร์บอเนตและสารไฮโดรคาร์บอน ดังสมการที่ 2.19 จากนั้นแมกนีเซียมคาร์บอเนตจะสลายตัวเป็นแมกนีเซียมออกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.20



บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่ใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2 ปัจจัย หาสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว และองค์ประกอบที่เหมาะสม ที่มีเปลี่ยนแปลงของกากน้ำมันสูงที่สุด

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (Microreactor) รูปทรงกระบอก ปริมาตร 70 มิลลิลิตร ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม SS 316 พร้อมฝาปิดด้านบนซึ่งต่อเข้ากับชุดอุปกรณ์สำหรับป้องกันความดันแก๊สไฮโดรเจน และวาล์วนิรภัย สามารถทำการทดลองภายใต้ภาวะที่ทนความร้อนได้ถึง 500 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะพาสคัล ด้านบนของฝาปิดมีชุดสำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิล สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างทำการทดลอง แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กขนาด 70 มิลลิลิตร (Microreactor)

3.1.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล (Temperature controller) ทำหน้าที่ในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้า ไปยังขดลวดให้ความร้อนที่ต่อเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ สามารถตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าได้เมื่ออุณหภูมิสูงถึงตามค่าที่กำหนดไว้ มีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิได้ในระดับ ± 10 องศาเซลเซียส

3.1.3 ขดลวดไฟฟ้าแบบสวม (Injection heater) เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์ มีลักษณะเป็นขดลวดทรงกระบอก กำลังไฟฟ้า 350 วัตต์ แรงดัน 230 โวลต์

3.1.4 เทอร์โมคัพเพิลแบบเค (K-Type) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตรสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ

3.1.5 ชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ โดยมีมอเตอร์เป็นชุดกำลังขับเคลื่อนแกนหมุน เพื่อแกว่งเครื่องปฏิกรณ์ให้เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง โดยการปรับความเร็วรอบการแกว่งเครื่องปฏิกรณ์จากชุดควบคุมความเร็ว ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดทดลองประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล หม้อแปลงไฟฟ้าและเครื่องควบคุมเครื่องปฏิกรณ์

3.1.6 ชุดกรองสุญญากาศ ประกอบด้วยชุดเครื่องแก้วต่อกับเครื่องปั๊มอากาศเพื่อทำการกรองแยกแบบสุญญากาศสำหรับแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวออกจากส่วนที่เป็นกากของแข็ง โดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชุดกรองสุญญากาศ

3.1.7 เครื่องชั่งน้ำหนัก ชั่งได้ละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก ชั่งได้ละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.1.9 นาฬิกาจับเวลา

3.1.10 ตู้อบ (Oven)

3.1.11 เครื่องแก้ว ประกอบด้วยปีกเกอร์ ขวดใส่สารตัวอย่าง

3.1.12 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation) สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือด โดยใช้มาตรฐานการวิเคราะห์ตาม ASTM D2887 ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC7890A ของบริษัท เอจีเลนต์ เทคโนโลยี จำกัด (ประเทศไทย) ใช้คอลัมน์ชนิด capillary จากบริษัท J&W Scientific จำกัด รุ่น DB-1 ขนาด 10 เมตร x 0.53 มิลลิเมตร x 2.65 ไมโครเมตร และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (simulation distillation software)



รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น
(Simulated Distillation Gas Chromatograph)

3.1.13 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography – Mass Spectrometer, GC-MS) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC2010 และแมสสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น GCMSQP2010 เป็นตัวตรวจวัด จากบริษัท Agilent จำกัด โดยใช้ Capillary column จากบริษัท J&W Scientific จำกัด รุ่น DB-1 ขนาด 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร ซึ่งมี 100% Dimethylpolysiloxane หนา 0.25 ไมโครเมตรเป็นวัสดุภาคนิ่ง ซึ่งสามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 350 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์
(Gas Chromatography - Mass Spectrometer, GC-MS)

3.1.14 เครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ รุ่น 848 Trinoplus ยี่ห้อ Metrohm สำหรับวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของของแข็งเพลิงเหลว ในรูปของ Modification Acid Number เทียบกับ Mg ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องมือไทเทรตอัตโนมัติ

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

3.2.1 น้ำมันปลาเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารจำพวกปลาแห่งหนึ่งในจังหวัด สมุทรสาคร

3.2.2 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) 99.9% จากบริษัท Earth Chem Lab LTD., Part.

3.2.3 แก๊สไฮโดรเจน 99.99% บรรจุในถังเก็บแบบ high pressure ขนาด 6 ลูกบาศก์เมตร จากบริษัท TIG Trading

3.2.4 โทลูอีน เกรดการค้ำ จากบริษัท Merck

3.3 การดำเนินการวิจัย

3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง

- วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง ก่อนทำการทดลองโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography – Mass Spectrometer, GC-MS) และวิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง

3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

- วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRD (X-ray diffractometer), XRF (X-Ray Fluorescence spectrometry) และการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (BET)

3.3.3 ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ โดยออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลสองระดับ โดยมีตัวแปรที่ศึกษาทั้งหมด 4 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงในตารางที่ 3.1 และทำการทดลองซ้ำจำนวน 2 ครั้ง รวมการทดลองที่เป็นค่ากลาง 3 การทดลอง ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์

ตัวแปร	ระดับ	
	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
A อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	420	500
B เวลา (นาที)	30	60
C ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์)	1	5
D ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1	5

ตารางที่ 3.2 การทดลองแฟคทอเรียลสองระดับของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์

ภาวะที่ใช้ทดลอง			
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (นาที)	ความดันแก๊ส ไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์)	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
420	30	1	1
500	30	1	1
420	60	1	1
500	60	1	1
420	30	5	1
500	30	5	1
420	60	5	1
500	60	5	1
420	30	1	5
500	30	1	5
420	60	1	5
500	60	1	5
420	30	5	5
500	30	5	5
420	60	5	5
500	60	5	5
460	45	3	3
460	45	3	3
460	45	3	3

3.3.4 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้หลังจากการทดลอง

- วิเคราะห์ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว
- วิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีและซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.4.1 ชั่งน้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์พร้อมแหวนก่อนการทดลอง ใส่น้ำมันปลาเหลือทิ้งจำนวน 15 กรัม

3.4.2 ชั่งน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ เติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ จากนั้นประกอบปิดฝาให้แน่นสนิท

3.4.3 นำเครื่องปฏิกรณ์ไปทำการไล่อากาศที่อยู่ภายในออกโดยการอัดแก๊สไฮโดรเจนเข้าไป แล้วปล่อยให้คลายออก จากนั้นอัดแก๊สไฮโดรเจนจนถึงความดันที่กำหนด ตรวจสอบรอยรั่วของแก๊สตามข้อต่อของเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้น้ำสบู่ หมุนวาล์วปิดให้สนิท

3.4.4 ต่อเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับชุดควบคุม สวมอุปกรณ์ให้ความร้อนเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนในระหว่างทำการทดลอง นำสายเทอร์โมคัปเปิลใส่เข้าไปภายในเครื่องปฏิกรณ์

3.4.5 ทำการทดลองตามภาวะที่กำหนดไว้ และเริ่มทำการจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์คงที่เท่ากับที่ตั้งไว้จนครบเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจึงนำฉนวนและอุปกรณ์ให้ความร้อนออก ปล่อยให้วางอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง จึงปล่อยให้แก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ออก

3.4.6 แยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นเชื้อเพลิงเหลวออกจากกากของแข็งโดยการกรองแบบสุญญากาศและใช้กระดาษกรองเพื่อแยกส่วนที่เป็นของเหลวเก็บไว้ในขวดแก้ว เพื่อการวิเคราะห์ต่อไป

3.4.7 เช็ดทำความสะอาดเครื่องปฏิกรณ์ด้วยกระดาษซับที่ชั่งน้ำหนักไว้แล้ว นำส่วนที่เป็นของแข็งและกระดาษซับไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละของของแข็งต่อไป

3.4.8 นำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่นเพื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบตามจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆและวิเคราะห์ชนิดขององค์ประกอบที่เกิดขึ้นอย่างละเอียดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์

3.4.9 คำนวณหาร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว ของแข็ง และแก๊ส

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบนเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ เพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวและองค์ประกอบที่เหมาะสม โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา เวลาในการเกิดปฏิกิริยา ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง

4.1.1 การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปลาเหลือทิ้งตามมาตรฐาน AOCS 1993

องค์ประกอบของกรดไขมัน	กรัม/100 กรัม
Capric acid C10:0	0.0617
Lauric acid C12:0	0.3383
Tridecanoic acid C13:0	0.0554
Myristic acid C14:0	8.1732
Pentadecanoic acid C15:0	0.6455
Palmitic acid C16:0	21.2106
Heptadecanoic acid C17:0	1.7877
Stearic acid C18:0	6.2794
Arachidic acid C20:0	0.8077
Heneicosanoic acid C21:0	0.0706
Behenic acid C22:0	0.3083
Tricosanoic acid C23:0	0.3946
Lignoceric acid C24:0	1.1805
Total saturated fatty acid	41.3135
Myristoleic acid C14:1	0.0246
Cis-10-Pentadecenoic acid C15:1	0.0178

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปลาเหลือง

องค์ประกอบของกรดไขมัน	กรัม/100 กรัม
Palmitelaidic acid methyl ester C16:1t9	0.0305
Palmitoleic acid C16:1 n-7	9.4626
Trans – Elaidic acid C18:1 n9t	0.0852
Cis-9-Octadecenoic acid C18:1 n-9	14.1765
Cis-Vaccenic acid C18:1 n-7	3.3525
Cis-9,12-Octadecadienoic acid C18:2 n-6	3.4040
Trans-Octadecadienoic acid C18:2t9t12	0.0724
Cis-9,12,15-Octadecatrienoic acid C18:3 n-3(ALA)	0.6925
Cis-6,9,12- Octadecatrienoic acid C18:3 n-6	0.2166
Moroctic acid C18:4 n-3	1.1446
Paullinic acid C20:1 n-7	0.1667
Cis-11-Eicosenoic acid C20:1 n-9	0.5337
Gadoleic acid C20:1 n-11	0.0549
Cis-11,14-Eicosadienoic acid C20:2 n-6	0.1349
Cis-11,14,17-Eicosatrienoic acid C20:3 n-3	0.0617
Cis-5,8,11,14-Eicasatetraenic acid C20:4 n-6(ARA)	1.3265
Eicosatetraenoic acid C20:4 n-3	0.5130
Cis-5,8,11,14,17-Eicosapentaenoic acid C20:5 n-3(EPA)	7.9585
Cis-13-Docosenoic acid C22:1 n-9	0.0710
Cetoleic acid C22:1 n-11, n-13	0.1112
Cis-7,10,13,16-Docosatetraenoic acid C22:4 n-6	0.1620
Docosapentaenoic acid C22:5 n-6	0.4301
Cis-4,7,10,13,16,19-Docosahexaenoic acid C22:6 n-3(DHA)	6.3174
Nervonic acid C24:1	0.2298
Total unsaturated fatty acid	50.7512
Unidentified peak	7.9357

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง วิเคราะห์ที่ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา พบว่า มีปริมาณของกรดไขมันอิ่มตัว ในน้ำมันปลาเหลือทิ้ง 41.31 กรัม/100 กรัม และมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัว ในน้ำมันปลาเหลือทิ้ง 50.75 กรัม/100 กรัม แสดงว่าน้ำมันปลาเหลือทิ้งมีองค์ประกอบของพันธะที่ไม่อิ่มตัวจำนวนหนึ่ง ซึ่งควรมีการปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงก่อนนำไปใช้สำหรับเครื่องยนต์โดยตรง นอกจากนี้พบว่าการมีองค์ประกอบเป็นกรดไขมันจำนวนมากอาจจะส่งผลกระทบต่อการกัดกร่อน (corrosion) เมื่อมีการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ จึงควรที่จะนำมาปรับปรุงผ่านกระบวนการต่างๆก่อนนำไปใช้งาน

4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้งด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น

องค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้งหาได้จากการนำน้ำมันปลาเหลือทิ้งมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น เพื่อหาองค์ประกอบของน้ำมันตามคราบจุดเดือดอย่างคร่าวๆ ตามวิธีการ ASTM 2887-D86 แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้งก่อนการศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา

จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
IBP* - 200	Naphtha (C ₅ -C ₁₂)	6.00
200 - 250	Kerosene (C ₁₂ -C ₁₅)	4.30
250 - 350	Light gas oil (C ₁₅ -C ₂₅)	32.90
350 - 370	Gas oil (C ₂₅ -C ₃₃)	18.40
370 – FBP**	Long residue (>C ₃₃)	38.40

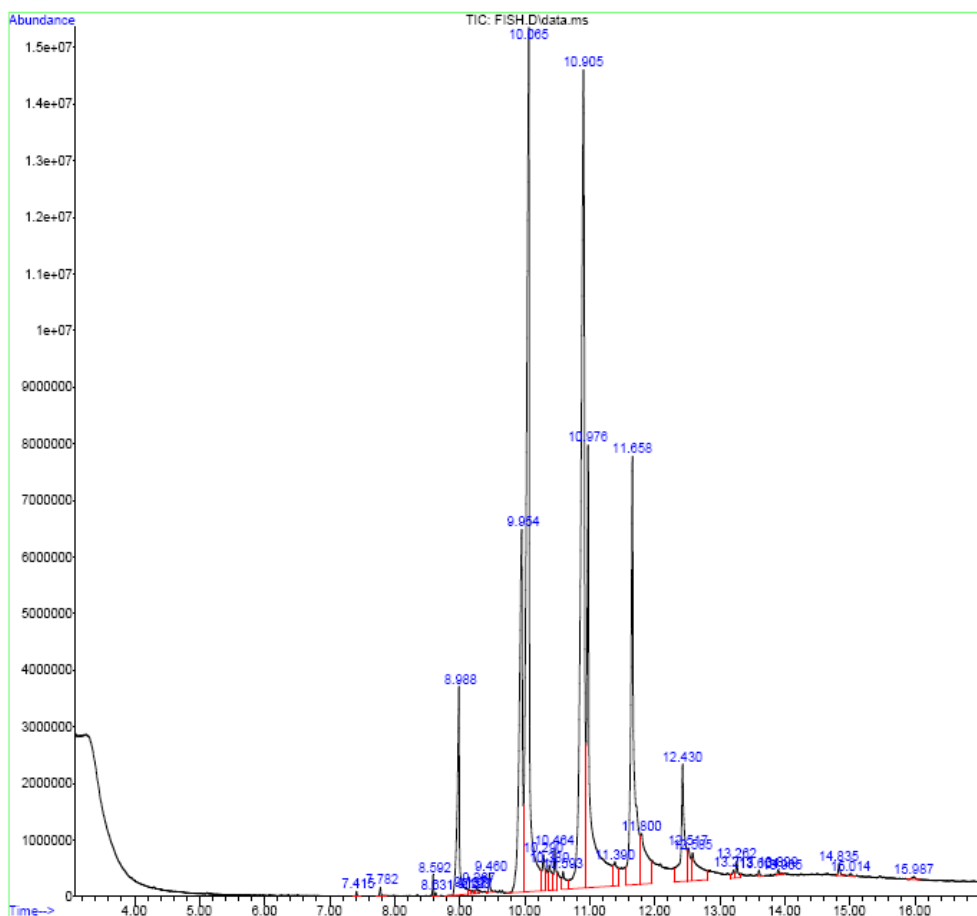
*IBP = Initial boiling point

**FBP = Final boiling point

จากตารางที่ 4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้งด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่นก่อนนำไปศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาพบว่า มีองค์ประกอบในช่วงกากน้ำมัน (Long residue) มากที่สุดคือร้อยละ 38.40 โดยน้ำหนัก และมีองค์ประกอบในช่วงเคโรซีนน้อยที่สุดคือร้อยละ 4.30 โดยน้ำหนัก โดยจุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้ต้องการให้น้ำมันปลาเหลือทิ้งเกิดปฏิกิริยาแตกตัวเชิงความร้อนร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบเป็นกากน้ำมันลดลง ในขณะที่ได้ร้อยละผลได้ขององค์ประกอบที่เป็นเนฟตามากขึ้น

4.1.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้งด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี ประกอบกับแมสสเปกโตรมิเตอร์

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้งทำได้โดยการนำน้ำมันปลาเหลือทิ้งไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีประกอบกับแมสสเปกโตรมิเตอร์ องค์ประกอบของน้ำมันแสดงดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้งด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีประกอบกับ
แมสสเปกโตรมิเตอร์

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้งก่อนการนำไปแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบกับแมสสเปกโตรมิเตอร์ พบว่าเกิดพีคที่เวลา 8.988, 9.954, 10.065, 10.905, 10.976, 11.658 และ 12.430 นาที ซึ่งองค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้แสดงในตารางที่ 4.3

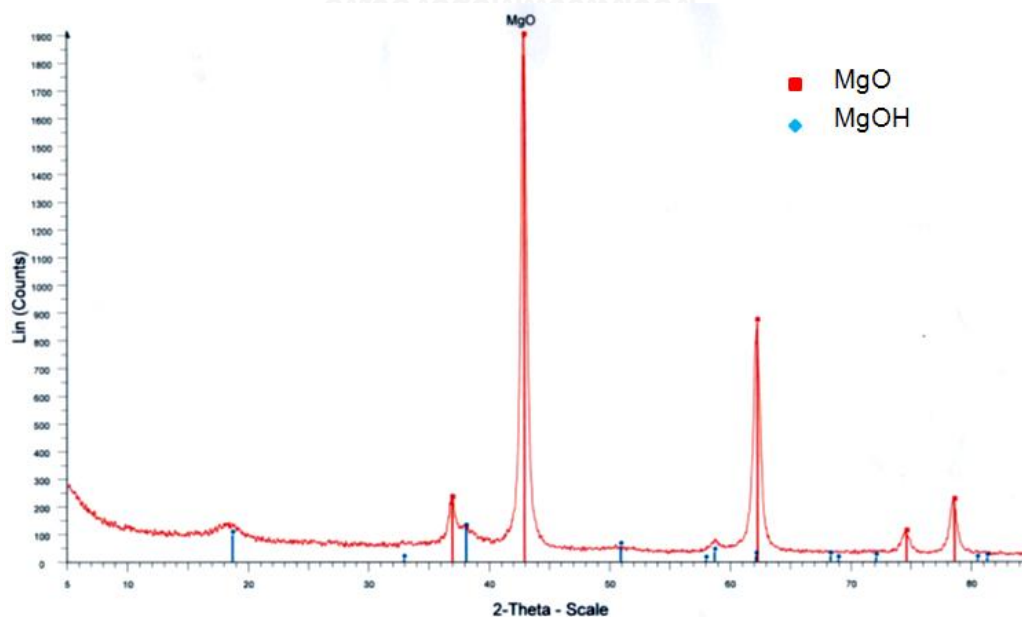
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของน้ำมันปลาเหลือทิ้งจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ประกอบกับแมสสเปกโตรมิเตอร์

พีค (นาที)	องค์ประกอบ	สูตรเคมี	พื้นที่ (%)
8.988	Tetradecanoic acid	$C_{14}H_{28}O_2$	4.03
9.954	Palmitoleic acid	$C_{16}H_{30}O_2$	9.63
10.065	n-Hexadecanoic acid	$C_{16}H_{32}O_2$	23.01
10.905	Oleic acid	$C_{18}H_{34}O_2$	24.91
10.976	Octadecanoic acid	$C_{18}H_{36}O_2$	12.44
11.658	5,8,11,14,17-Eicosapentaenoic acid (EPA)	$C_{20}H_{30}O_2$	11.48
12.430	4,7,10,13,16,19-Docosahexaenoic acid (DHA)	$C_{22}H_{32}O_2$	3.53

4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์

4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ XRD

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยเทคนิค XRD แสดงในรูปที่ 4.2 มีองค์ประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์ในโครงสร้างผลึก และพบแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ปนอยู่



รูปที่ 4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยเทคนิค XRD

4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยเทคนิค XRF

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์เป็นการนำตัวอย่างปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF องค์ประกอบของตัวอย่างปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าตัวอย่างปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์มีออกไซด์ของแมกนีเซียมร้อยละ 89.50 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยเทคนิค XRF

Magnesium oxide (Element)	Compound	Concentration (wt%)
Mg	MgO	89.50
S	SO ₃	0.731
Ca	CaO	0.676
Si	SiO ₂	0.195
Cl	Cl	0.119
unknown	-	8.779

4.2.3 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของแมกนีเซียมออกไซด์

การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของแมกนีเซียมออกไซด์เป็นการนำตัวอย่างปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET พื้นที่ผิวของตัวอย่างปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวอย่างปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์

ตัวอย่างปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (S _{BET}) (ตารางเมตร/กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)
แมกนีเซียมออกไซด์	89.00	0.076

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด ของตัวอย่างปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ พบว่าตัวอย่างปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์มีพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ 89.00 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.076 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

4.3 ผลการทดลองที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งด้วยแมกนีเซียมออกไซด์

4.3.1 การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

จากการศึกษาออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับเพื่อหาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาบนแมกนีเซียมออกไซด์ โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง เวลาที่ใช้ในการทดลอง ความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา จำนวนการทดลองคือ 2^4 เท่ากับ 16 การทดลอง แต่ละการทดลองทำซ้ำ 2 ครั้ง และมีการทดลองค่ากลางของแต่ละสภาวะอีก 3 การทดลอง ผลของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลา แสดงในตารางที่ 4.6 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ แสดงในรูปที่ 4.3 และค่าความน่าเชื่อถือของการทดลองแสดงในรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.6 ปริมาณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ภาวะต่างๆ

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลา (wt%)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), A	เวลา (นาที), B	ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น(บาร์), C	ตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%), D	
1	420	30	1	1	33.10
2					40.99
3	500	30	1	1	79.74
4					81.84
5	420	60	1	1	45.64
6					42.56
7	500	60	1	1	78.45
8					83.23
9	420	30	5	1	46.30
10					49.39

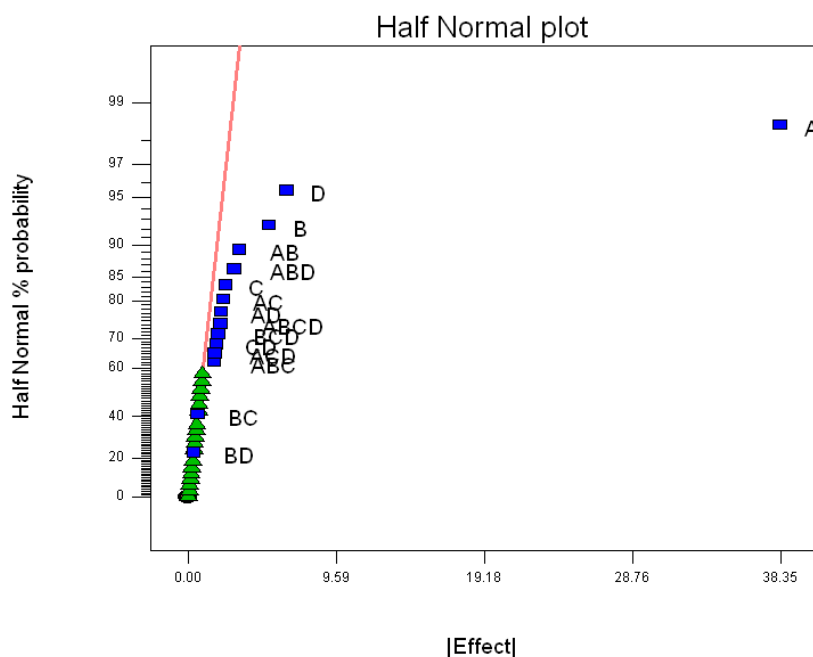
ตารางที่ 4.6 (ต่อ) ปริมาณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ภาวะต่างๆ

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลา (wt%)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), A	เวลา (นาที), B	ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น(บาร์), C	ตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%), D	
11					78.73
12	500	30	5	1	73.08
13					51.97
14	420	60	5	1	47.89
15					86.73
16	500	60	5	1	85.75
17					49.87
18	420	30	1	5	45.53
19					81.33
20	500	30	1	5	82.67
21					50.75
22	420	60	1	5	47.63
23					97.27
24	500	60	1	5	96.56
25					50.80
26	420	30	5	5	51.14
27					86.37
28	500	30	5	5	83.71
29					42.16
30	420	60	5	5	54.01
31					93.86
32	500	60	5	5	94.05

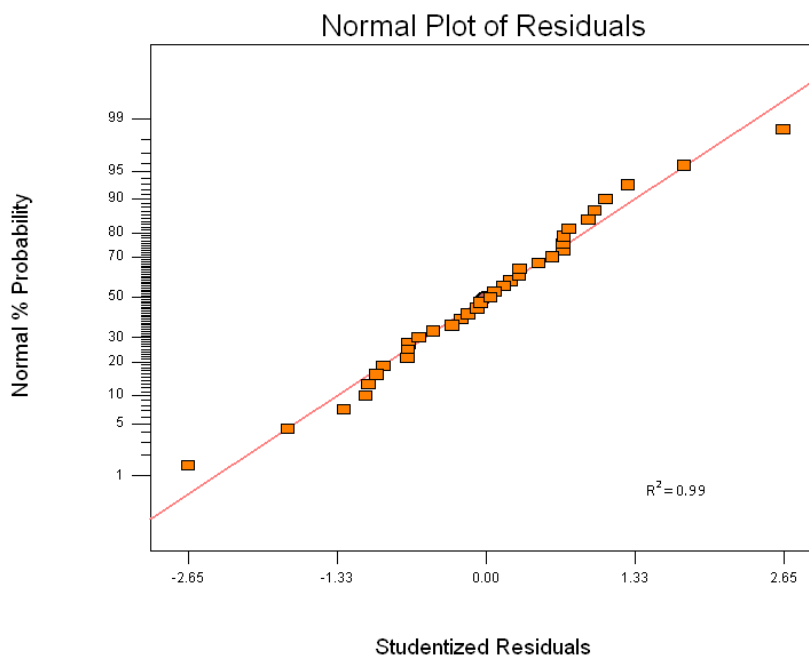
ตารางที่ 4.6 (ต่อ) ปริมาณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาที่ภาวะต่างๆ

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลา (wt%)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), A	เวลา (นาที่), B	ความดันแก๊ส ไฮโดรเจน เริ่มต้น(บาร์), C	ตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%), D	
33					69.35
34	460	45	3	3	73.95
35					72.82

จากศึกษาออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับเพื่อหาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาบนแมกนีเซียมออกไซด์พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 33.10 - 97.27 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.3 Half Normal plot ของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาบนแมกนีเซียมออกไซด์



รูปที่ 4.4 Normal probability plot of residuals ของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาบนแมกนีเซียมออกไซด์

จากรูปที่ 4.3 แสดงถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา บนแมกนีเซียมออกไซด์ โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลจะออกห่างจากข้อมูลอื่นที่อยู่บนเส้นตรง พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลคือ อุณหภูมิ (A) เวลา (B) ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (C) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (D) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (AB) และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับเวลาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ABD) โดยพบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเชิงเร่งตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้งไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวที่ให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาได้ดีที่สุด ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (A) เวลาในการทำปฏิกิริยา (B) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (D) และเมื่อพิจารณาจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design – Expert ที่แสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่มี $Prof > F$ น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นจะส่งผลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาจากการแตกตัวเชิงเร่งตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เช่นเดียวกัน

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ทำกรทดลองได้ พบว่าสมการมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงและค่า $R^2 = 0.99$ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปวิเคราะห์ทางสถิติต่อไปได้

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาบนแมกนีเซียมออกไซด์

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	12745.25	15	849.68	85.07	< 0.0001
A	11767.31	1	11767.31	1178.11	< 0.0001
B	220.08	1	220.08	22.03	0.0002
C	47.00	1	47.00	4.71	0.0437
D	327.17	1	327.17	32.76	< 0.0001
AB	87.58	1	87.58	8.77	0.0084
AC	41.40	1	41.40	4.15	0.0567
AD	36.59	1	36.59	3.66	0.0716
BC	3.20	1	3.20	0.32	0.5783
BD	1.06	1	1.06	0.11	0.7485
CD	27.75	1	27.75	2.78	0.1129
ABC	23.22	1	23.22	2.32	0.1447
ABD	71.88	1	71.88	7.20	0.0152
ACD	24.61	1	24.61	2.46	0.1339
BCD	30.77	1	30.77	3.08	0.0962
ABCD	35.62	1	35.62	3.57	0.0752
Curvature	98.93	1	98.93	9.90	0.0056
Pure Error	179.79	18	9.99		
Cor Total	13023.96	34			

4.3.2 การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

จากศึกษาออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับเพื่อหาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง เวลาที่ใช้ในการทดลอง ความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา จำนวนการทดลองคือ 2^4 เท่ากับ 16 การ

ทดลอง แต่ละการทดลองทำซ้ำ 2 ครั้ง และมีการทดลองค่ากลางของแต่ละสภาวะอีก 3 การทดลอง ผลของร้อยละผลได้ของเนฟทา แสดงในตารางที่ 4.8

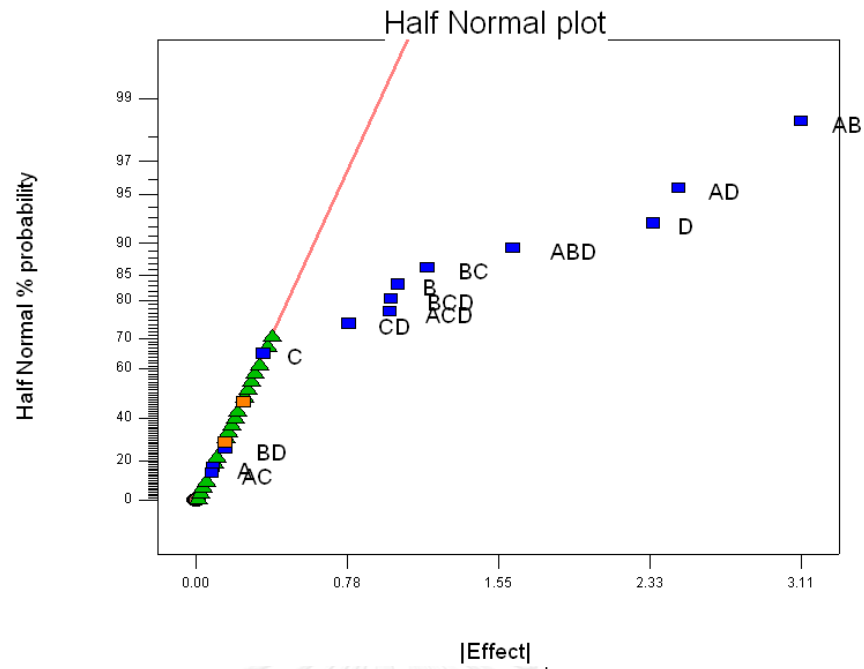
ตารางที่ 4.8 ปริมาณร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งที่ภาวะต่างๆ

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของเนฟทา (wt%)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), A	เวลา (นาที), B	ความดันแก๊ส ไฮโดรเจน เริ่มต้น (บาร์), C	ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt%), D	
	1	420	30	1	
2					8.24
3	500	30	1	1	12.03
4					9.93
5	420	60	1	1	8.70
6					7.81
7	500	60	1	1	9.06
8					7.98
9	420	30	5	1	5.50
10					5.73
11	500	30	5	1	12.77
12					8.58
13	420	60	5	1	6.08
14					6.90
15	500	60	5	1	7.59
16					9.20
17	420	30	1	5	5.94
18					5.99
19	500	30	1	5	8.85
20					9.13

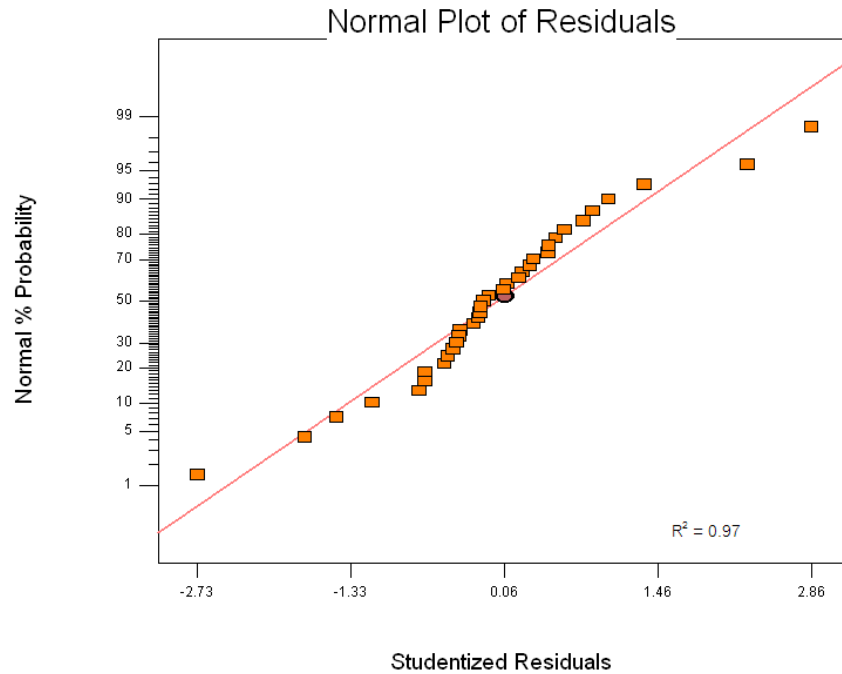
ตารางที่ 4.8 (ต่อ) ปริมาณร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งที่ภาวะต่างๆ

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของแนฟทา (wt%)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), A	เวลา (นาที), B	ความดันแก๊ส ไฮโดรเจน เริ่มต้น (บาร์), C	ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt%), D	
21					6.83
22	420	60	1	5	7.04
23					1.32
24	500	60	1	5	1.22
25					4.96
26	420	30	5	5	4.83
27					6.40
28	500	30	5	5	6.71
29					9.52
30	420	60	5	5	12.54
31					2.35
32	500	60	5	5	2.51
33					11.57
34	460	45	3	3	12.86
35					12.03

จากศึกษาออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับเพื่อหาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ พบว่าค่าร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 1.22 – 12.86 โดยน้ำหนักร



รูปที่ 4.5 Half Normal plot ของร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์



รูปที่ 4.6 Normal probability plot of residuals ของร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลจะออกห่างจากข้อมูลอื่นที่อยู่บนเส้นตรง ตัวแปรที่มีอิทธิพลคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (D) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (B) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (AB) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (AD) อันตรกิริยาระหว่างเวลากับความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (BC) อันตรกิริยาระหว่างความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (CD) และ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับเวลาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ABD) โดยพบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเชิงเร่งตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้งไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวที่ให้ร้อยละผลได้ของเนฟทาดีที่สุด ได้แก่ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (AB) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (AD) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (D) และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับเวลาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ABD) เมื่อพิจารณาจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design – Expert ที่แสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่มี $Prof > F$ น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นจะส่งผลกระทบต่อร้อยละผลได้ของเนฟทาจากการแตกตัวเชิงเร่งตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เช่นเดียวกัน

จากรูปที่ 4.6 แสดงถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ทำกรทดลองได้ พบว่าสมการมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงและค่า $R^2 = 0.97$ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปวิเคราะห์ทางสถิติต่อไปได้

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของเนฟทาจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	234.64	15	15.64	14.55	< 0.0001
A	0.06	1	0.06	0.06	0.8167
B	8.59	1	8.59	7.99	0.0112
C	0.96	1	0.96	0.89	0.3574
D	44.18	1	44.18	41.09	< 0.0001
AB	77.38	1	77.38	71.97	< 0.0001
AC	0.05	1	0.05	0.05	0.8297
AD	49.25	1	49.25	45.81	< 0.0001

ตารางที่ 4.9 (ต่อ) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของเนฟทาจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob > F
BC	11.28	1	11.28	10.49	0.0046
BD	0.18	1	0.18	0.16	0.6897
CD	4.91	1	4.91	4.57	0.0465
ABC	0.48	1	0.48	0.44	0.5145
ABD	21.19	1	21.19	19.71	0.0003
ACD	7.92	1	7.92	7.37	0.0142
BCD	8.04	1	8.04	7.48	0.0136
ABCD	0.18	1	0.18	0.16	0.6897
Curvature	67.74	1	67.74	63.00	< 0.0001
Pure Error	19.35	18	1.08		
Cor Total	321.74	34			

4.3.3 การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนเนฟทาต่อกากน้ำมันในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

จากศึกษาออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับเพื่อหาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนเนฟทาต่อกากน้ำมันที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง เวลาที่ใช้ในการทดลอง ความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา จำนวนการทดลองคือ 2^4 เท่ากับ 16 การทดลอง แต่ละการทดลองทำซ้ำ 2 ครั้ง และมีการทดลองค่ากลางของแต่ละสภาวะอีก 3 การทดลอง ผลของอัตราส่วนเนฟทาต่อกากน้ำมัน แสดงในตารางที่ 4.10

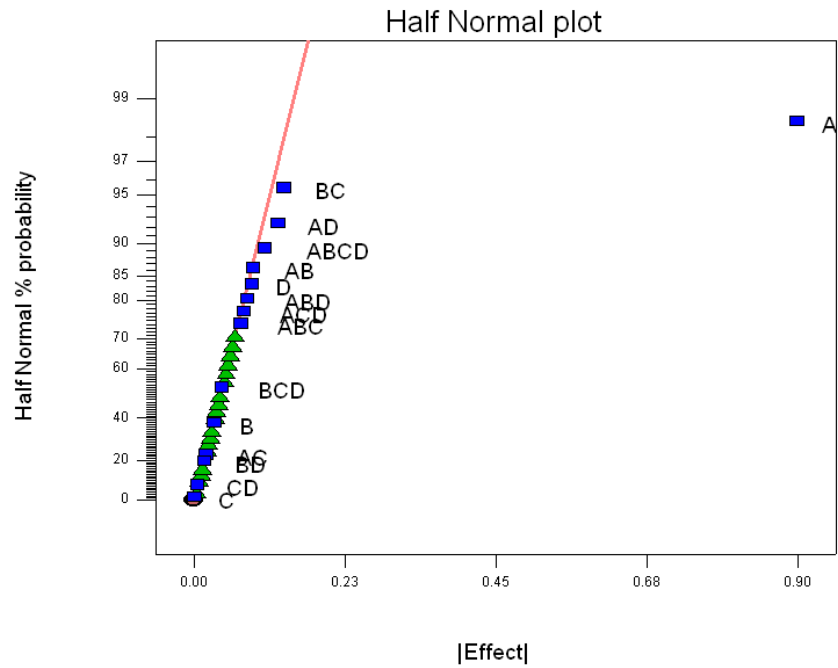
ตารางที่ 4.10 อัตราส่วนเนฟทาต่ออากาศน้ำมันในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งที่ภาวะต่างๆ

การทดลอง	ตัวแปร				อัตราส่วน เนฟทาต่อ อากาศน้ำมัน
	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส), A	เวลา (นาที), B	ความดันแก๊ส ไฮโดรเจน เริ่มต้น (บาร์), C	ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt%), D	
1	420	30	1	1	0.30
2	420	30	1	1	0.36
3	500	30	1	1	1.55
4	500	30	1	1	1.42
5	420	60	1	1	0.42
6	420	60	1	1	0.35
7	500	60	1	1	1.10
8	500	60	1	1	1.24
9	420	30	5	1	0.27
10	420	30	5	1	0.29
11	500	30	5	1	1.56
12	500	30	5	1	0.83
13	420	60	5	1	0.33
14	420	60	5	1	0.34
15	500	60	5	1	1.49
16	500	60	5	1	1.68
17	420	30	1	5	0.31
18	420	30	1	5	0.29
19	500	30	1	5	1.23
20	500	30	1	5	1.37

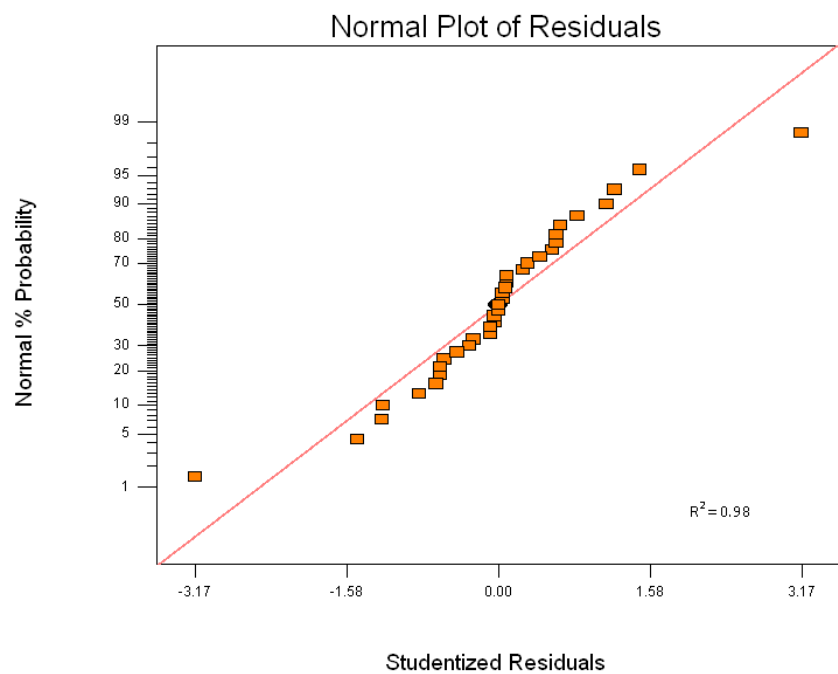
ตารางที่ 4.10 (ต่อ) อัตราส่วนเนฟทาต่อกากน้ำมันในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งที่ภาวะต่างๆ

การทดลอง	ตัวแปร				
	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส), A	เวลา (นาที), B	ความดันแก๊ส ไฮโดรเจน เริ่มต้น (บาร์), C	ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt%), D	อัตราส่วน เนฟทาต่อ กากน้ำมัน
	21	420	60	1	5
22					0.35
23	500	60	1	5	1.26
24					0.92
25	420	30	5	5	0.26
26					0.26
27	500	30	5	5	1.22
28					1.07
29	420	60	5	5	0.43
30					0.71
31	500	60	5	5	1.00
32					1.10
33					0.98
34	460	45	3	3	1.29
35					1.15

จากศึกษาออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับเพื่อหาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนเนฟทาต่อกากน้ำมันที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ พบว่าอัตราส่วนเนฟทาต่อกากน้ำมันที่ได้อยู่ในช่วง 0.26 – 1.68



รูปที่ 4.7 Half Normal plot ของอัตราส่วนเนฟทาต่ออกากน้ำมันในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์



รูปที่ 4.8 Normal probability plot of residuals ของอัตราส่วนเนฟทาต่ออกากน้ำมันในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

จากรูปที่ 4.7 แสดงถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนเนฟทาต่อกากน้ำมันที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลจะออกห่างจากข้อมูลอื่นที่อยู่บนเส้นตรง ตัวแปรที่มีอิทธิพลคือ อุณหภูมิ (A) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (AD) และอันตรกิริยาระหว่างเวลากับความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (BC) โดยพบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเชิงเร่งของน้ำมันปลาเหลือทิ้งไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวที่ให้อัตราส่วนเนฟทาต่อกากน้ำมันในผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (A) และเมื่อพิจารณาจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design – Expert ที่แสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่มี $Prof > F$ น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นจะส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนเนฟทาต่อกากน้ำมันในผลิตภัณฑ์จากการแตกตัวเชิงเร่งของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เช่นเดียวกัน

จากรูปที่ 4.8 แสดงถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ทำกรทดลองได้ พบว่าสมการมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงและค่า $R^2 = 0.98$ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปวิเคราะห์ทางสถิติต่อไปได้

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนเนฟทาต่อกากน้ำมันในผลิตภัณฑ์จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

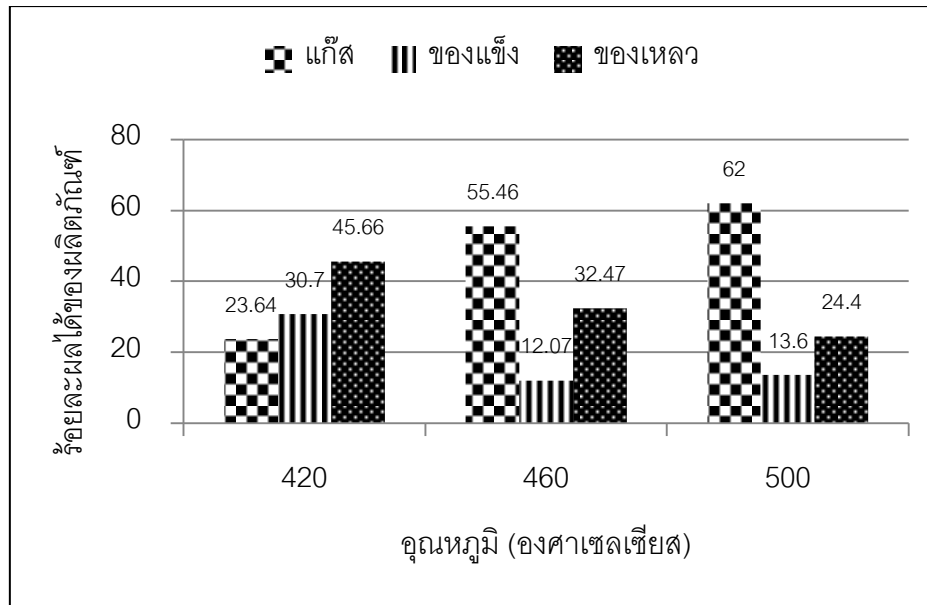
Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	7.1324	15	0.4755	17.878	< 0.0001
A	6.4890	1	6.4890	243.973	< 0.0001
B	0.0075	1	0.0075	0.282	0.6018
C	0.000003	1	0.000003	0.000117	0.9915
D	0.0604	1	0.0604	2.270	0.1492
AB	0.0621	1	0.0621	2.336	0.1438
AC	0.0026	1	0.0026	0.099	0.7569
AD	0.1263	1	0.1263	4.747	0.0429
BC	0.1445	1	0.1445	5.431	0.0316
BD	0.0020	1	0.0020	0.073	0.7895
CD	0.0003	1	0.0003	0.010	0.9234
ABC	0.0399	1	0.0399	1.500	0.2364

ตารางที่ 4.11(ต่อ) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนเนฟทาต่อกากน้ำมันในผลิตภัณฑ์จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

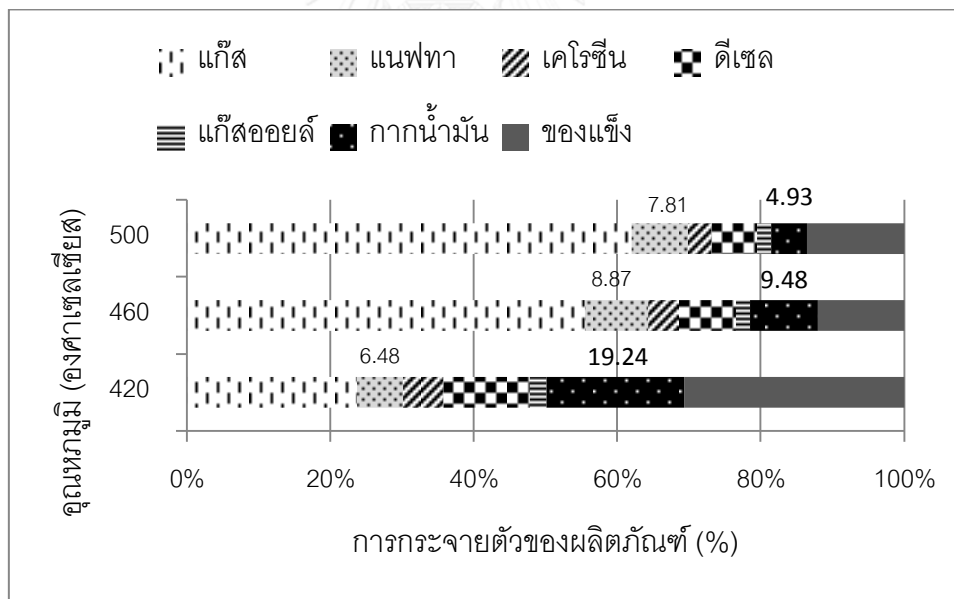
Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob > F
ABD	0.0504	1	0.0504	1.895	0.1855
ACD	0.0443	1	0.0443	1.664	0.2134
BCD	0.0140	1	0.0140	0.527	0.4770
ABCD	0.0893	1	0.0893	3.356	0.0836
Curvature	0.3130	1	0.3130	11.768	0.0030
Pure Error	0.4788	18	0.0266		
Cor Total	7.9242	34			

4.3.4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เวลา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.9 และร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้งเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เวลา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เวลา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.10 ร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เวลา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

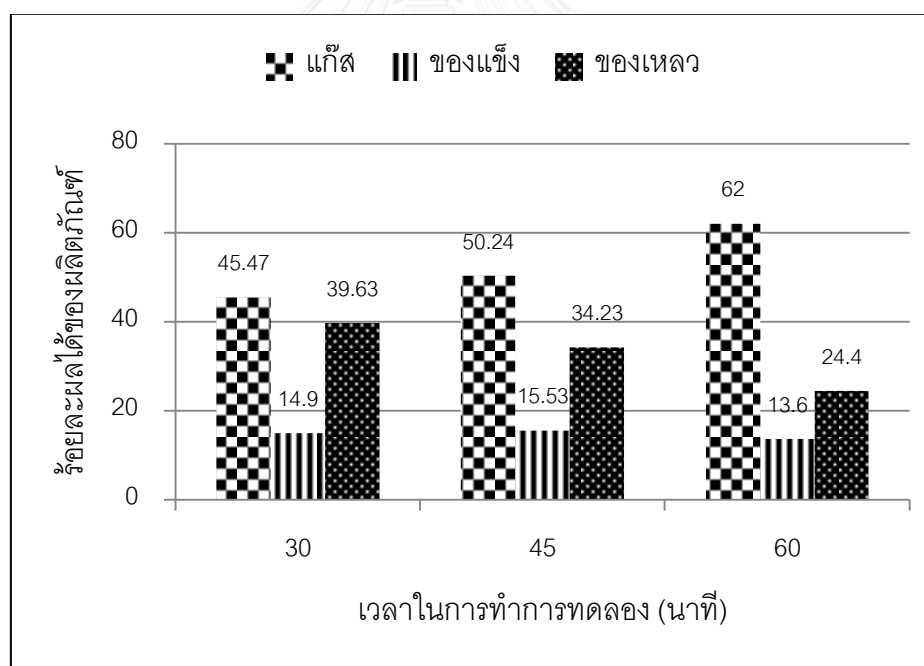
รูปที่ 4.9 แสดงถึงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เวลา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 420 – 500 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวลดลงจาก 45.66 เป็น 24.40 โดยน้ำหนัก และปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเพิ่มขึ้นจาก 23.64 เป็น 62.00 โดยน้ำหนัก เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ไปเป็นสารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กจึงพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวลดลงและเกิดเป็นแก๊สเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.10 แสดงถึงร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เวลา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 420 – 500 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราส่วนของแนฟทาต่อจากน้ำมันเพิ่มขึ้น และปริมาณจากน้ำมันลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการแตกสลายเชิงความร้อน ทำให้สารโมเลกุลใหญ่มีขนาดเล็กลง ผลิตภัณฑ์ที่เป็นจากน้ำมันและดีเซลซึ่งเป็นโมเลกุลใหญ่จึงมีปริมาณลดลง ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแนฟทา และเคโรซีนซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดเล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยอธิบายกลไกการแตกตัวเชิงตัวเร่งจากอิทธิพลของอุณหภูมิได้ดังนี้ อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเชิงความร้อนของน้ำมันปลาเหลือทิ้งที่เป็นกรดไขมันอิสระ โดยเมื่อกรดไขมันได้รับความร้อน จะมีการแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิลิก และหมู่คาร์บอนิล โดยแตกสลายไปเป็นแก๊สขนาดเล็กในรูปของไฮโดรเจนคาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ที่มีความสามารถในการส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ได้ดีขึ้น โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจะเกิดแก๊สขนาดเล็ก คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น พร้อมกับการแตกสลายของสายโซ่กรดไขมันให้มีขนาดเล็กลง ในรูปของอนุมูลอิสระ (Free radical) รวมถึงเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ จากปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงตัวเร่งทำให้ได้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง และมีลักษณะเป็นเส้นตรงจำพวก แอลเคน นอกจากนี้หากเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจะทำให้ได้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กเกิดขึ้นจากการแตกตัวของกรดไขมันในช่วงแรก และแตกตัวต่อไปเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์นอกจากจะช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันแล้ว ยังมีส่วนช่วยในการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจน ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแนฟทามากขึ้น ในขณะที่หากเพิ่มอุณหภูมิสูงถึง 500 องศาเซลเซียส จะพบว่ามีแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เนื่องจากอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการแตกสลายกรดไขมันไปเป็นแก๊สขนาดเล็ก และเกิดอนุมูลอิสระจำนวนมาก และเมื่อ

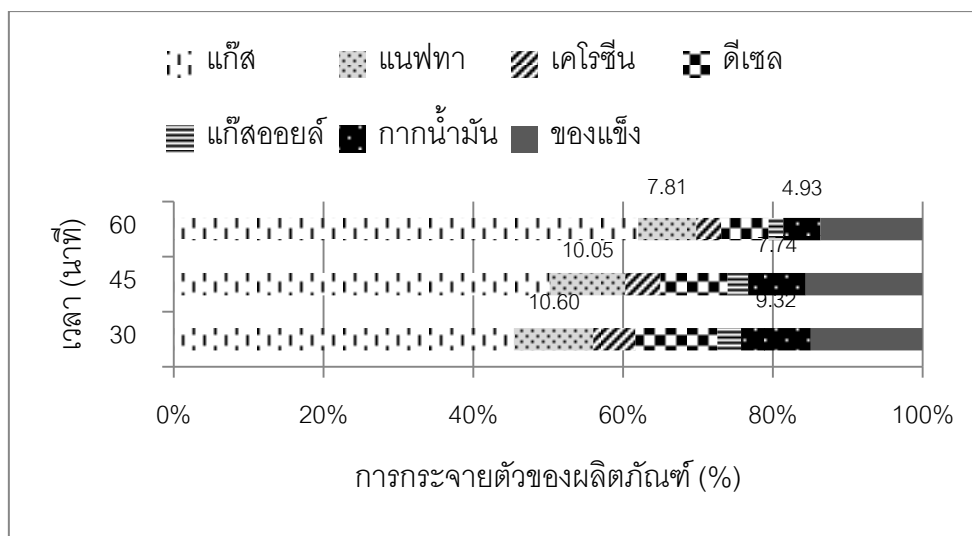
ยังได้รับความร้อนจากการเพิ่มอุณหภูมิในขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินต่อไป ก็จะทำให้เกิดแก๊สขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก

4.3.5 อิทธิพลของเวลาที่ส่งผลต่อการแตกตัวของแข็งแรงปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

จากการศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวของแข็งแรงปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง บนแมกนีเซียมออกไซด์ ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.11 และร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้งเมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



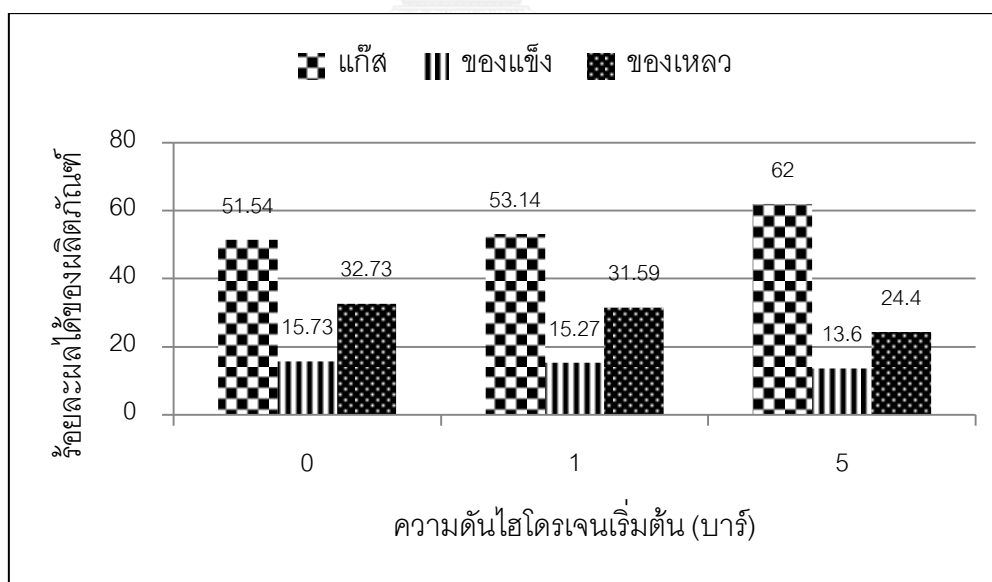
รูปที่ 4.12 ร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลา ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.11 แสดงถึงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลา ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 30 – 60 นาที พบว่าเมื่อใช้เวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวลดลงจากร้อยละ 39.63 เป็น 24.40 โดยน้ำหนัก และผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 45.47 เป็น 62.00 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น สารที่อยู่ในถังปฏิกรณ์จะได้รับอิทธิพลจากความร้อนมากขึ้นจึงทำให้สารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่แตกสลายตัวไปเป็นสารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็ก จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวลดลง และเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 4.12 แสดงถึงร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 30 – 60 นาที พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นกากน้ำมันมีปริมาณลดลงเมื่อใช้เวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น โดยอธิบายได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน และการแตกตัวเชิงตัวเร่งบนแมกนีเซียมออกไซด์ ที่ในช่วงแรกอิทธิพลของอุณหภูมิจะมีบทบาทอย่างมากต่อปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน รวมถึงการแตกตัวสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนของกรดไขมันไปเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก รวมถึงเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจน และปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนจนได้สายโซ่โมเลกุลที่มีขนาดกลางและขนาดเล็ก แต่เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยายังดำเนินต่อไป ทำให้สายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็กได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิ ทำให้เกิดการแตกสลายสายโซ่

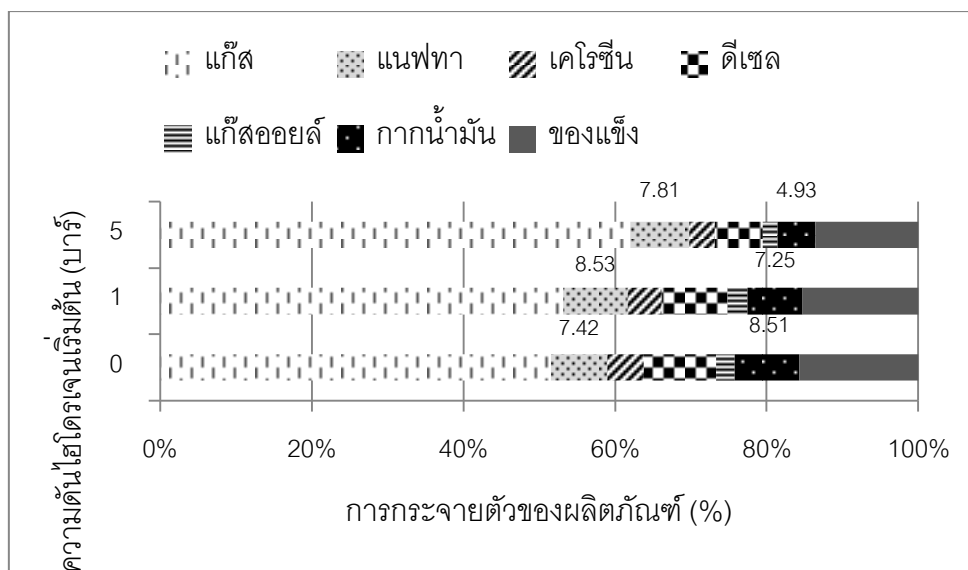
โมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็กต่อไป เป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก โดยพบว่าเมื่อทำการทดลองที่เวลา 60 นาที จะมีปริมาณแก๊สไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของเหลวตามจุดเดือดให้ร้อยละผลได้ของกากน้ำมันลดลง ซึ่งเกิดจากการแตกตัวเชิงความร้อน และการแตกตัวเชิงตัวเร่งที่ทำให้กรดไขมันมีการแตกตัวและมีปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจน จนมีขนาดที่เหมาะสม และมีความอิมิตัวมากขึ้น

4.3.6 อิทธิพลของความดันที่ส่งผลต่อการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

จากการศึกษาอิทธิพลของความดันที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4.13 และร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้งเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้งเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



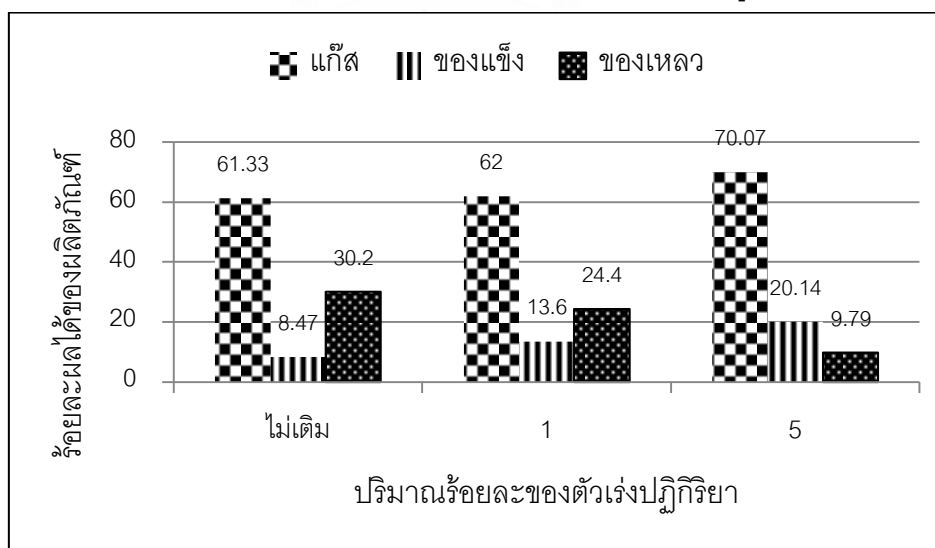
รูปที่ 4.14 ร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้งเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.13 แสดงถึงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้งเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นจาก 0 – 5 บาร์ พบว่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวลดลงจาก 32.73 เป็น 24.40 โดยน้ำหนัก และร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเพิ่มขึ้นจาก 51.54 เป็น 62.00 โดยน้ำหนัก และจากรูปที่ 4.14 แสดงถึงร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้งเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น พบว่า การทดลองที่ไม่อัดความดันแก๊สไฮโดรเจนมีปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นแนฟทาเท่ากับร้อยละ 7.42 โดยน้ำหนัก และเมื่อเปรียบเทียบกับความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 กับ 5 บาร์พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแนฟทาเพิ่มขึ้นเป็น 8.53 และ 7.81 โดยน้ำหนัก และปริมาณกากน้ำมันลดลง เนื่องจากการแตกตัวเชิงความร้อนมีบทบาทอย่างมากในช่วงแรก และเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน เกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจน โดยการทดลองภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนทำให้ส่งเสริมปฏิกิริยาการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม และการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) จึงพบว่าปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงความร้อน และปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงตัวเร่งโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนที่ความดันต่างๆ ให้ผลการทดลองที่มีแนวโน้มให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชิงเพลิงเหลวมากขึ้น และเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบ

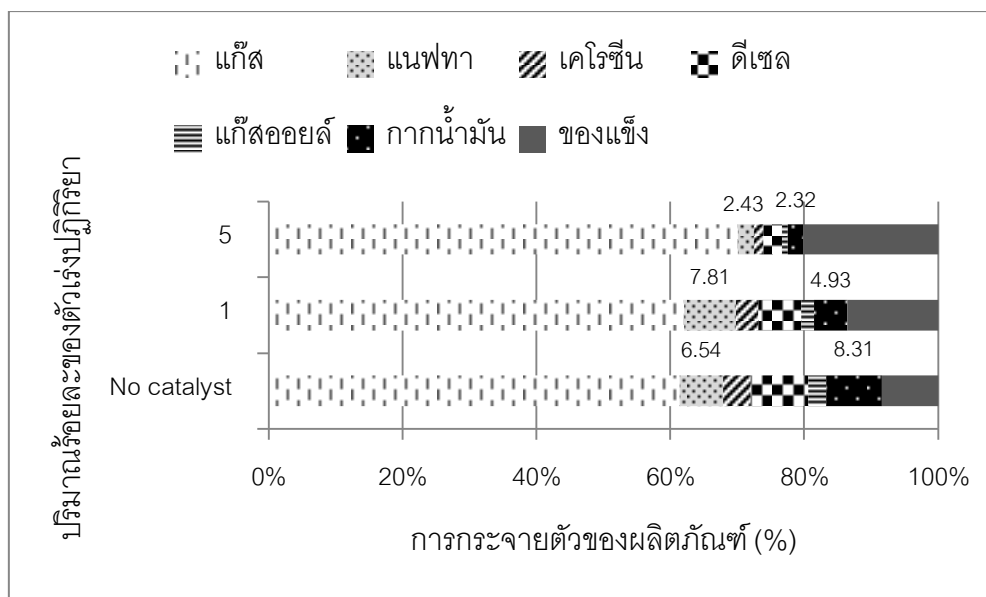
ตามคาบจุดเดือดให้ร้อยละผลได้ของเนฟทาและเคโรซีนมากขึ้น ซึ่งอธิบายได้จากกลไกการแตกสลายเชิงความร้อน และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์มีบทบาทในการส่งเสริมปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจน ร่วมกับการแตกตัวเชิงความร้อน จนได้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดกลางและขนาดเล็ก โดยการทดลองภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนจะเกิดการแตกตัวไฮโดรเจนและการเติมไฮโดรเจน จนได้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง และมีความอึดตัวมากขึ้น นอกจากนี้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนจะช่วยทำให้ชะลอการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเป็นการส่งเสริมปฏิกิริยา SPILL OVER บนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย

4.3.7 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ แสดงในรูปที่ 4.15 และร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้งเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ แสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์



รูปที่ 4.16 ร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์

จากรูปที่ 4.15 แสดงถึงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้งเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อย 0 – 5 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวลดลงจากร้อยละ 30.20 เป็น 9.79 โดยน้ำหนัก และจากรูปที่ 4.16 แสดงร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันปลาเหลือทิ้ง เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นแนฟทาลดลงจากร้อยละ 7.81 เป็นร้อยละ 2.43 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบกับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สูง ผลิตภัณฑ์จึงเกิดเป็นแก๊สได้อย่างรวดเร็ว เกิดกลไกการแตกสลายเชิงความร้อน และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์มีบทบาทในการส่งเสริมปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจน ร่วมกับการแตกตัวเชิงความร้อน จนได้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดกลางและขนาดเล็กกลายเป็นแก๊สส่วนใหญ่ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ

4.4 การคำนวณหาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวโดยใช้โปรแกรม Design-Expert

4.4.1 การคำนวณหาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวโดยใช้โปรแกรม Design-Expert

จากการศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวโดยใช้โปรแกรม Design-Expert โดยขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert ของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ แสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert ของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

ตัวแปร	เป้าหมาย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	หน่วย
Temperature	Is in range	420	500	°C
Time	Is in range	30	60	Minute
Pressure	Is in range	1	5	Bar
Catalyst	Is in range	1	5	%wt
Conversion	maximize	33.1	97.27	%wt
Naphtha Ratio	maximize	1.22	12.86	%wt
Naphtha/Long residue	maximize	0.26	1.68	-

ในการหาภาวะที่เหมาะสมพิจารณาค่าตอบสนอง ได้แก่ ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไปของเชื้อเพลิงเหลว ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแนฟทา และอัตราส่วนแนฟทาต่อากาน้ำมัน ขอบเขตที่ศึกษาของร้อยละการเปลี่ยนแปลงไปของเชื้อเพลิงเหลวระหว่างร้อยละ 33.1 – 97.27 โดยน้ำหนัก ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแนฟทาระหว่างร้อยละ 1.22 – 12.86 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนแนฟทาต่อากาน้ำมันระหว่าง 0.26 – 1.68 โดยจะพิจารณาให้มีค่าตัวแปรทั้งสามนั้นมากที่สุดโดยใช้โปรแกรม Design-Expert ในการหาภาวะที่เหมาะสม จากการคำนวณของโปรแกรมพบว่าภาวะที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม Design-Expert

ตัวแปร	ภาวะจากโปรแกรม
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	500.00
เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	59.00
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์)	5
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	83.37
ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแนฟทา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	8.52
อัตราส่วนแนฟทาต่อกากน้ำมัน	1.38

จากตารางที่ 4.13 พบว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม Design-Expert มีค่าเท่ากับร้อยละ 83.37 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแนฟทาที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม Design-Expert มีค่าเท่ากับร้อยละ 8.52 และอัตราส่วนแนฟทาต่อกากน้ำมันมีค่าเท่ากับ 1.38 เมื่อนำภาวะที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมไปทดลองจริงเพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบระหว่างค่าที่เกิดจากการคำนวณของโปรแกรมและจากการทดลองแสดงดังตาราง 4.14

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบระหว่างภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม Design-Expert กับค่าที่ได้จากการทดลอง

ตัวแปร	ภาวะจากโปรแกรม	ผลจากการทดลองจริง
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	500.00	500
เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	59.00	60
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์)	5	5
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1	1
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	83.37	87.16
ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแนฟทา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	8.52	7.81
อัตราส่วนแนฟทาต่อกากน้ำมัน	1.38	1.58

จากตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบระหว่างภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม Design-Expert กับค่าที่ได้จากการทดลอง พบว่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลาจากการทดลองจริงมีค่าเท่ากับ 87.16 โดยน้ำหนัก ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็น แนฟ-ทาจากการทดลองจริงมีค่าเท่ากับ 7.81 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนแนฟทาต่ออกากน้ำมันปลาจากการทดลองจริงมีค่าเท่ากับ 1.58

4.5 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Total acid value) ของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลว

ค่าความเป็นกรดของไขมันหรือน้ำมัน คือจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ASTM D664) ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) หรือหมู่ของกรดอินทรีย์ ซึ่งค่าที่ได้สามารถนำมาคำนวณเป็นร้อยละกรดไขมันอิสระได้ ค่าความเป็นกรด (Total acid value) แสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ค่าความเป็นกรด (Total acid value) ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวภาพเหลว	ค่าความเป็นกรด (mg-KOH/g)
น้ำมันปลาเหลือทิ้งตั้งต้นก่อนการทดลอง	163.73
น้ำมันปลาเหลือทิ้งที่แตกตัวด้วยความร้อน	15.37
น้ำมันปลาเหลือทิ้งที่แตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์	4.75

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการทดลอง 60 นาที ความดันเริ่มต้นไฮโดรเจน 5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบว่าน้ำมันปลาเหลือทิ้งก่อนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยามีค่าความเป็นกรดที่สูงมาก เท่ากับ 163.73 mg-KOH/g เมื่อเกิดการแตกตัวเชิงความร้อนโดยไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ค่าความเป็นกรดของเชื้อเพลิงเหลวมีค่า 15.37 mg-KOH/g แต่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ชนิดเบสร่วมกับปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงความร้อน ทำให้ได้ค่าความเป็นกรดของเชื้อเพลิงเหลวลดลง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ ให้ค่าความเป็นกรดต่ำที่สุดคือ 4.75 mg-KOH/g

4.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบ ธาตุ CHO ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

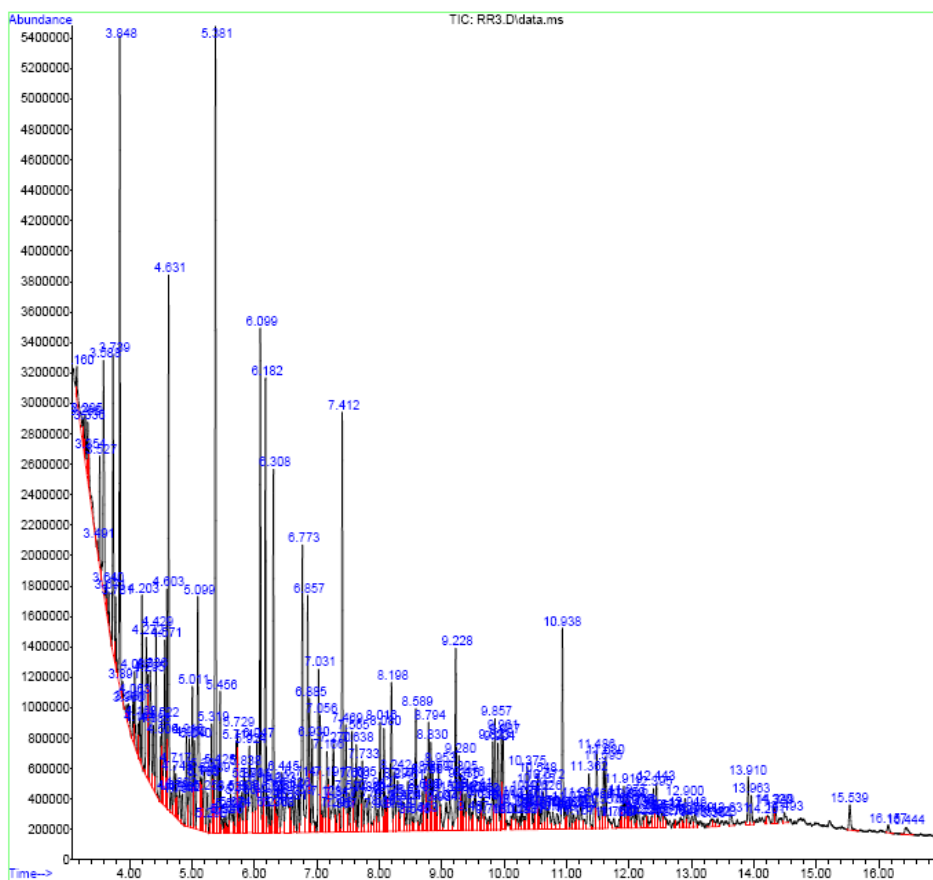
ตารางที่ 4.16 องค์ประกอบธาตุ CHO ของเชื้อเพลิงเหลว (%wt)

น้ำมันปลาเหลือทิ้ง	C	H	O
ก่อนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา	71.89	5.77	22.34
หลังการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา	84.46	11.22	4.32

จากตารางที่ 4.16 แสดงองค์ประกอบของธาตุ CHO พบว่าน้ำมันปลาเหลือทิ้งก่อนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยามีค่าออกซิเจนเท่ากับร้อยละ 22.34 หลังจากผ่านการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาแล้วพบว่าผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้มีค่าออกซิเจนลดลงเท่ากับร้อยละ 4.32 เนื่องจากในการแตกสลายเชิงความร้อนทำให้เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์พบว่า จะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ได้ดีขึ้น ซึ่งทำให้มีการกำจัดหมู่คาร์บอกซิลิก และหมู่คาร์บอนิลที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบออกไปในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จึงพบว่ามีปริมาณของออกซิเจนลดลง จากการวิเคราะห์ CHNO ของน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวที่ผ่านการแตกตัวโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นปัจจัยที่ส่งผลให้น้ำมันเชื้อเพลิงเหลวมีค่าความร้อนที่สูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tani และคณะ (2011)

4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ ถูกวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ แสดงในรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.17



รูปที่ 4.17 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโทรมิเตอร์

ตารางที่ 4.17 องค์ประกอบเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโทรมิเตอร์

พีค (นาที)	องค์ประกอบ	สูตรเคมี	พื้นที่ (%)
3.848	Decane	$C_{10}H_{22}$	3.02
4.631	Undecane	$C_{11}H_{24}$	2.49
5.381	Naphthalene	$C_{10}H_8$	4.61
6.099	Tridecane	$C_{13}H_{28}$	2.73
6.182	1-methyl Naphthalene	$C_{11}H_{10}$	2.40
6.308	2-methyl Naphthalene	$C_{11}H_{10}$	1.88

ตารางที่ 4.17 (ต่อ) องค์ประกอบเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของ น้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วย แก๊สโครมาโทมิเตอร์

พีค (นาที)	องค์ประกอบ	สูตรเคมี	พื้นที่ (%)
6.773	Tetradecane	$C_{14}H_{30}$	2.00
7.412	Pentadecane	$C_{15}H_{32}$	2.28
9.228	Anthracene	$C_{14}H_{10}$	1.11
10.938	Pyrene	$C_{16}H_{10}$	1.30

จากตารางที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลว ที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ จะได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคนเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของน้ำมันปลาเหลือทิ้งในช่วงแรกให้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง และเกิดการแตกตัวต่อไปโดยอิทธิพลของอุณหภูมิ ทำให้ได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดสั้นลง และความดันแก๊สไฮโดรเจนที่เติมเข้าไปส่งผลในการเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคน

4.8 การวิเคราะห์ค่าความร้อนและค่าความหนืดของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

ค่าความร้อนและค่าความหนืดของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ค่าความร้อนและค่าความหนืดของน้ำมันปลาเหลือทิ้งก่อนและหลังการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา

น้ำมันปลาเหลือทิ้ง	ค่าความร้อน (MJ/Kg)	ค่าความหนืด (cSt)
ก่อนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา	37.85	32.13
หลังการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา	42.07	6.98

จากตารางที่ 4.18 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันปลาเหลือทิ้งก่อนและหลังการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ พบว่าค่าความร้อนของน้ำมันปลาเหลือทิ้งก่อนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 37.85 MJ/Kg เมื่อผ่านการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแมกนีเซียมออกไซด์แล้วมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 42.07 MJ/Kg และผลการวิเคราะห์ค่าความหนืด (ASTM D2270) ของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์ พบว่าค่าความหนืดที่ได้หลังจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยามีค่าลดลง

4.9 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

จากตารางที่ 4.19 วิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้ตัวตรวจวัด thermal conductivity detector (TCD) พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อองค์ประกอบของแก๊ส โดยพบแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าร้อยละ 18.98 คาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 32.31 แก๊สมีเทนร้อยละ 38.14 และปริมาณแก๊สไฮโดรเจนร้อยละ 10.57

ตารางที่ 4.19 องค์ประกอบแก๊สที่ภาวะที่เหมาะสมของการเกิดปฏิกิริยา

องค์ประกอบของแก๊ส(%)	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂
500 องศาเซลเซียส				
60 นาที, 5 บาร์				
และร้อยละของตัวเร่ง	10.57	38.14	32.31	18.98
ปฏิกิริยา 1 โดยน้ำหนัก				

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยทำการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา และหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลว ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแนฟทา และอัตราส่วนของแนฟทาต่อากน้ำมันมากที่สุด โดยได้ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ ซึ่งตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง 420 - 500 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่าง 30 - 60 นาที ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นระหว่าง 1 - 5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 - 5 โดยน้ำหนัก สามารถสรุปการทดลองได้ดังนี้ ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์ที่เป็นแนฟทา และอัตราส่วนของแนฟทาต่อากน้ำมัน คือ อุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา และปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Design-Expert พบว่าภาวะที่ให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลา ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแนฟทา และอัตราส่วนของแนฟทาต่อากน้ำมันมากที่สุด จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปลาเหลือทิ้งบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ คือ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการทดลอง 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จากการทดลองจริงในภาวะที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert บนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ จะได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลา 87.16 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแนฟทาเท่ากับ 7.81 และ อัตราส่วนของแนฟทาต่อากน้ำมันเท่ากับ 1.58 และจากการศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนช่วยให้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นกรดและค่าความหนืดลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. นำน้ำมันปลาเหลือทิ้งไปทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
2. ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสอื่นๆ ที่อาจส่งผลได้ดีกว่า รวมถึงกระบวนการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้
3. นำภาวะที่ได้ไปทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อไปประยุกต์ใช้ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม
4. ศึกษาการแยกองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ซึ่งประกอบไปด้วยดีเซล เคโรซีน แนฟทา
5. ศึกษาการนำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้ไปใช้กับเครื่องยนต์ชนิดต่างๆ
6. ศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตของน้ำมันปลาเหลือทิ้งเมื่อเทียบกับน้ำมันสัตว์ชนิดอื่นๆ
7. ศึกษาองค์ประกอบหมู่ฟังก์ชันก็อย่างละเอียดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้โดยใช้เทคนิค FTIR

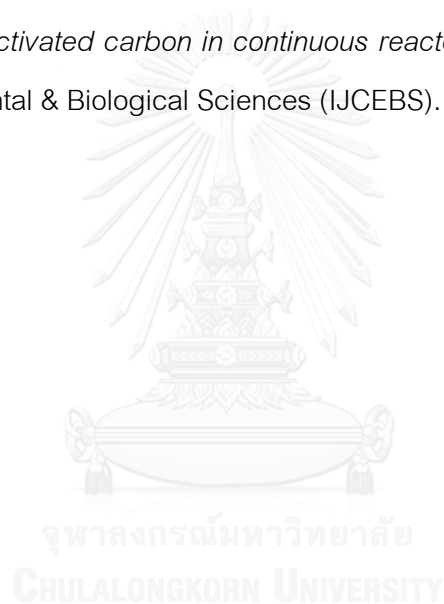


รายการอ้างอิง

1. ศุภวรรณ ตันตยานนท์. ปีโตรเคมี. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
2. ปีโตรเลียม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :
http://www.nakhamwit.ac.th/pingpong_web/Petro_Chem.htm [26 พฤษภาคม 2560].
3. ปีโตรเลียม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://th.wikipedia.org/wiki/ปีโตรเลียม> [26 พฤษภาคม 2560].
4. อะโรมาติก. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :
<http://www.oknation.net/blog/print.php?id=196999> [26 พฤษภาคม 2560].
5. น้ำมันดิบ และ การกลั่น. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :
<http://www.sgl1.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=539373800> [26 พฤษภาคม 2560].
6. เทคโนโลยีพลังงานชีวมวล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :
<http://www.siambioenergy.com/bio65/index.php/2012-10-14-08-58-20/2012-10-14-08-59-07/95-2012-10-13-15-27-23> [27 พฤษภาคม 2560].
7. พลังงานชีวมวล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :
<http://www.energyvision.co.th/14424507/%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%87%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%8A%E0%B8%B5%E0%B8%A7%E0%B8%A1%E0%B8%A7%E0%B8%A5> [27 พฤษภาคม 2560].
8. พลังงานทดแทน พลังงานทางเลือกใหม่สำหรับอนาคต. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :
http://www.bu.ac.th/knowledgecenter/executive_journal/jan_mar_12/pdf/aw014.pdf [26 พฤษภาคม 2560].
9. พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :
http://www.electron.rmutphysics.com/sciTech/pdf/c07_2554_energy.pdf [26 พฤษภาคม 2560].
10. อุตสาหกรรมอาหารทะเลแปรรูปจำพวกปลา. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :
<http://infofile.pcd.go.th/water/fishTin.pdf?CFID=3049438&CFTOKEN=65866970> [27 พฤษภาคม 2560].

11. อุตสาหกรรมปลากระป๋อง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www2.diw.go.th/l_Standard/Web/pane_files/Industry1.asp [27 พฤษภาคม 2560].
12. การเกิดกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://vcharkarn.com/varticle/37458> [27 พฤษภาคม 2560].
13. Tani H, Shimouchi M, Haga H, Fujimoto K. *Development of Direct Production Process of Diesel. Fuel from Vegetable Oils* Journal of the Japan Institute of Energy. 2011;p.466-470.
14. Harold H, Schobert. *The Chemistry of Hydrocarbon fuel*. NewYork. 1991.
15. Gary JH, Handwerk GH. *Catalytic Hydrocracking and Hydroprocessing*. New York: Marcel Dekker. 1994.
16. จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. การเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 2547. หน้า 1-11, 43-47
17. Tani H, Hasegawa T, Shimouchi M, Asami K, Fujimoto K. *Selective catalytic decarboxy-cracking of triglyceride to middle-distillate hydrocarbon*. Catalysis Today. 2011;p. 410-414.
18. Moulijn JA, van Leeuwen PWNM, van Santen RA. *Catalysis an Integrated Approach to Homogeneous, Heterogeneous and Industrial Catalysis*. Amsterdam : Elsevier Science Publishers BV. 1993.
19. Bartholomew CH. *Mechanisms of catalyst deactivation*. Applied Catalysis A. 2001: 17-60.
20. พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยา [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://dc345.4shared.com/doc/lBziOHlt/preview.html> [27 พฤษภาคม 2560].
21. BET Surface Area Analysis of Nanoparticles [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://cnx.org/content/m38278/latest/> [28 พฤษภาคม 2560].
22. Gates. BC. *Catalytic Chemistry*. University of Delaware: John Wiley&Sons. 1992:320-326.
23. วีระ เปรมโยธิน. เชื้อเพลิงและปิโตรเคมี. ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2534.
24. ปราโมทย์ ไซยเวช. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548. หน้า 391-412 .

25. Peter A, Marie-Josée D, Michael N. *Recent trends of biodiesel production from animal fat wastes and associated production techniques.* . Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015:574 - 588.
26. Takuya I, Yusuke S, Yusuke K, Motoyuki S, Katsumi H. *Biodiesel production from waste animal fats using pyrolysis method.* Fuel Processing Technology. 2012:47 - 52.
27. Paweesuda N, Yayoi M, Haruki T, Kenji A. *Effect of support material on MgO-based catalyst for production of new hydrocarbon bio-diesel.* American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS). 2016:153-165.
28. Chettha J, Tharapong V. *Catalytic pyrolysis of used cooking oil by magnesium oxide supported on activated carbon in continuous reactor.* International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences (IJCEBS). 2013:2320 - 4087.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.
ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ก 1 ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของน้ำมันปลา
เหลือทิ้งบนแมกนีเซียมออกไซด์

Parameter				Product yield(%wt)			Product distribution (%wt)				
Temperature (°C)	Time (min)	Pressure (bar)	Catalyst (%wt)	Gas yield (%wt)	Solid yield (%wt)	Liquid yield (%wt)	Naphtha yield (%wt)	Kerosene yield (%wt)	Light gas oil yield (%wt)	Gas oil yield (%wt)	Residue yield (%wt)
420	30	1	1	22.86	19.67	57.47	13.30	11.00	25.70	5.30	44.70
420	30	1	1	22.40	24.07	53.53	15.40	12.00	25.35	4.92	42.33
500	30	1	1	46.74	12.73	40.53	29.67	15.33	27.83	7.97	19.20
500	30	1	1	44.54	19.13	36.33	27.33	16.07	29.40	8.00	19.20
420	60	1	1	31.53	15.40	53.07	16.40	13.00	26.27	5.00	39.33
420	60	1	1	34.46	12.07	53.47	14.60	11.90	26.8	5.45	41.25
500	60	1	1	50.47	15.33	34.20	26.50	13.75	27.25	8.30	24.20
500	60	1	1	55.80	15.20	29.00	27.50	14.50	27.60	8.20	22.20
420	30	5	1	21.20	31.40	47.40	11.60	11.15	28.50	5.25	43.50
420	30	5	1	19.13	35.67	45.20	12.67	10.83	27.5	6.00	43.00
500	30	5	1	44.14	14.33	41.53	30.75	14.75	27.10	7.73	19.67
500	30	5	1	46.80	15.47	37.73	22.75	13.65	27.85	8.35	27.40
420	60	5	1	25.20	31.40	43.40	14.00	12.00	26.33	5.17	42.50
420	60	5	1	22.07	30.00	47.93	14.40	12.60	26.25	5.00	41.75
500	60	5	1	60.20	15.07	24.73	30.70	13.50	26.80	8.40	20.60
500	60	5	1	56.14	16.26	27.6	33.33	13.67	25.4	7.77	19.83
420	30	1	5	20.00	36.00	44.00	13.50	11.70	25.80	5.25	43.75
420	30	1	5	22.33	32.2	45.47	13.17	11.00	24.83	5.00	46.00
500	30	1	5	51.93	14.87	33.20	26.67	15.33	28.40	8.00	21.60
500	30	1	5	51.60	15.40	33.00	27.67	15.58	28.75	7.83	20.17
420	60	1	5	14.20	39.67	46.13	14.80	12.60	26.60	5.00	41.00
420	60	1	5	15.80	36.60	47.60	14.80	12.20	26.00	4.75	42.25

ตาราง ก 1 (ต่อ) ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของน้ำมันปลาเหลืองบนแมกนีเซียมออกไซด์

Temperature (°C)	Parameter			Product yield(%wt)			Product distribution (%wt)				
	Time (min)	Pressure (bar)	Catalyst (%wt)	Gas yield (%wt)	Solid yield (%wt)	Liquid yield (%wt)	Naphtha yield (%wt)	Kerosene yield (%wt)	Light gas oil yield (%wt)	Gas oil yield (%wt)	Residue yield (%wt)
500	60	1	5	78.07	16.53	5.40	24.50	16.5	30.75	8.85	19.40
500	60	1	5	76.80	17.20	6.00	20.33	16.27	32.07	9.33	22.00
420	30	5	5	24.60	35.20	40.20	12.33	10.67	25.00	5.00	47.00
420	30	5	5	32.67	24.20	43.13	11.20	12.30	27.75	5.25	43.50
500	30	5	5	58.47	16.60	24.93	25.67	16.08	29.05	8.20	21.00
500	30	5	5	58.20	15.73	26.07	25.75	14.25	27.80	8.20	24.00
420	60	5	5	25.40	16.53	58.07	16.40	12.85	27.25	5.25	38.25
420	60	5	5	20.54	25.53	53.93	23.25	14.25	25.25	4.50	32.75
500	60	5	5	67.86	22.47	9.67	24.33	14.17	28.5	8.60	24.40
500	60	5	5	72.27	17.80	9.93	25.30	14.10	28.85	8.75	23.00
460	45	3	3	39.67	16.33	44.00	26.30	14.20	26.50	6.25	26.75
460	45	3	3	35.86	21.27	42.87	30.00	16.00	25.00	5.67	23.33
460	45	3	3	38.53	20.00	41.47	29.00	15.00	25.20	5.63	25.17

ภาคผนวก ข.

การคำนวณร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิง

การคำนวณ

1. การคำนวณร้อยละผลได้ของเหลว

$$\text{ร้อยละผลได้ของเหลว} = \left[\frac{W_{\text{Liq}}}{W_{\text{Daf}}} \right] \times 100$$

2. การคำนวณร้อยละผลได้ของแข็ง

$$\text{ร้อยละผลได้ของแข็ง} = \left[\frac{W_{\text{R}}}{W_{\text{Daf}}} \right] \times 100$$

3. การคำนวณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส

$$\text{ร้อยละผลได้ของแก๊ส} = 100 - \text{ร้อยละผลได้ของเหลว} - \text{ร้อยละผลได้ของแข็ง}$$

$$\text{โดย } W_{\text{Daf}} = \text{น้ำหนักเริ่มต้นที่ปราศจากความชื้น}$$

$$W_{\text{R}} = \text{น้ำหนักกากของแข็งที่ปราศจากความชื้น}$$

$$W_{\text{Liq}} = \text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลว}$$

4. การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปลา

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงเหลว} = \frac{\text{Long residue}_{\text{before}} - \text{Long residue}_{\text{actual}}}{\text{Long residue}_{\text{before}}}$$

$$\text{เมื่อ } \text{Long residue}_{\text{actual}} = \frac{\text{Long residue}_{\text{after}} \times \text{ร้อยละผลได้ของเหลว}}{100}$$

$$\text{โดย } \text{Long residue}_{\text{before}} = \text{ปริมาณกากน้ำมันของน้ำมันปลาก่อนทำปฏิกิริยา}$$

$$\text{Long residue}_{\text{actual}} = \text{ปริมาณกากน้ำมันจริงที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงเหลว}$$

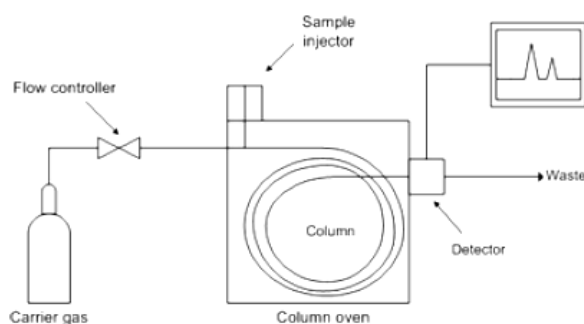
$$\text{Long residue}_{\text{after}} = \text{ปริมาณกากน้ำมันในผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้หลังทำปฏิกิริยา}$$

ภาคผนวก ค.

การวิเคราะห์องค์ประกอบการกระจายตัวของเชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือด

แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph)

แก๊สโครมาโทกราฟี เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการแยกสารตัวอย่างซึ่งเป็นของผสมออกจากกัน แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่สารตัวอย่างนั้นๆจะต้องสามารถเปลี่ยนให้เป็นแก๊สเฟสและมีความเสถียรที่อุณหภูมิที่เหมาะสม โดยอาศัยหลักความแตกต่างของความสามารถในการเคลื่อนที่และกระจายตัวผ่านเฟสคงที่ของแต่ละองค์ประกอบในสารตัวอย่าง ทำให้สารแต่ละชนิดสามารถแยกออกจากกันได้ ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์นี้สามารถบอกได้ทั้งชนิดและปริมาณของสารตัวอย่างส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแสดงดังรูปที่ ค. 1



รูปที่ ค. 1 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

โดยทั่วไปมีส่วนประกอบดังนี้

1. แก๊สที่ใช้งานกับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี มี 3 ชนิด คือ
 - 1.1 แก๊สเฉื่อย ได้แก่ ฮีเลียม อาร์กอน หรือไนโตรเจน ซึ่งใช้เป็นแก๊สพา (Carrier Gases) เพื่อจะใช้พาไอของสารหรือแก๊สตัวอย่างเข้าคอลัมน์
 - 1.2 แก๊สไฮโดรเจนเพื่อใช้ใน Flame Ionization Detector (FID)
 - 1.3 อากาศ เพื่อใช้ผสมกับไฮโดรเจนใน FID
2. Gas Traps และ Filters เป็นส่วนช่วยทำให้ระบบของแก๊สที่จะใช้งานสะอาดและบริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็น Cartridge คือ
 - 2.1 Molecular Sieve Trap ใช้ดูดความชื้น
 - 2.2 Oxygen Trap เป็นที่จับแก๊สออกซิเจน
 - 2.3 Hydrocarbon Filter ใช้จับแก๊สไฮโดรคาร์บอนและไอของน้ำมัน สำหรับแก๊สพาควรจะต้องผ่าน Filter อากาศควรจะต้องผ่าน Charcoal Filter
3. ตัวควบคุมอัตราการไหล (Flow Regulator) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สพา

4. ส่วนที่จะฉีดสารเข้าคอลัมน์ (Injection Port) ทำหน้าที่ฉีดสารเข้าคอลัมน์และให้ความร้อนให้สารตัวอย่างเปลี่ยนเป็นเฟสไอ

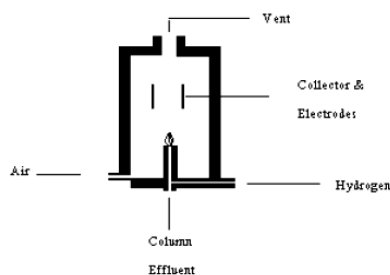
5. คอลัมน์ (Column) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแยกสารซึ่งสำคัญที่สุด นิยมใช้คอลัมน์ที่ทำจากทองแดง นิกเกิล หรือเหล็กกล้าไร้สนิม อาจอยู่ในรูป U Tube ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 1-2 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง (Inner Diameter) 3-6 มม. อาจมีการใช้คอลัมน์ที่ทำจากแก้วในการแยกสารสเตียรอยด์ ยา หรือสารประกอบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีคอลัมน์ชนิดขนาดรูเล็ก (Capillary Column) ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มม. แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

5.1 Wall-Coated Open Tubular (WCOT) คอลัมน์ที่มีเฟสหยุดนิ่งเป็นของเหลวเคลือบเป็นฟิล์มบางๆ (0.1-1 ไมครอน) อยู่ที่ผนังด้านใน ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 10-100 เมตร

5.2 Support Coated Open Tubular (SCOT) คอลัมน์ที่มีตัวรองรับ หรือเมทริกซ์บรรจุอยู่ภายในความยาวของคอลัมน์ ประมาณ 10-100 เมตร

5.3 Micropacked Column คอลัมน์ขนาดเล็ก มีความยาวประมาณ 0.7-1.0 เมตร

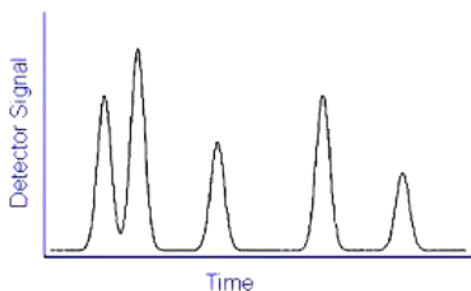
6. Flame Ionization Detector (FID) สารที่ผ่านจากคอลัมน์จะถูกเผาโดยเปลวไฟ (Flame) ทำให้แตกตัวเป็นไอออน ภายในตัวตรวจวัดมีขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่จะจับกับไอออนซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ตัวตรวจวัดชนิด FID นี้เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด



รูปที่ ค. 2 Flame Ionization Detector

สารตัวอย่างที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะถูกฉีดเข้าไปที่ช่องสำหรับฉีดสารตัวอย่าง (Injection Port) เพื่อให้ความร้อนจนเปลี่ยนเป็นเฟสไอ แล้วผ่านเข้าไปในคอลัมน์หลอดแก้วรูเล็ก (Capillary Glass Column) รุ่น CP-SIL5CB เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.25 มิลลิเมตร ความยาว 15 เมตร และความหนาของชั้นฟิล์ม 0.25 ไมครอน โดยอาศัยการพาของเฟสเคลื่อนที่หรือแก๊สพาในที่นี้ ใช้แก๊สฮีเลียม อัตราการไหล 1.5 ไมโครลิตร/นาที ไปยังคอลัมน์ เพื่อแยกสารออกจากกัน อุณหภูมิของเตาอบปรับอุณหภูมิให้มีการเปลี่ยนแปลงได้ในขณะทำการทดลอง (Temperature Programming Operation) โดยตั้งอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที โดยอุณหภูมิ

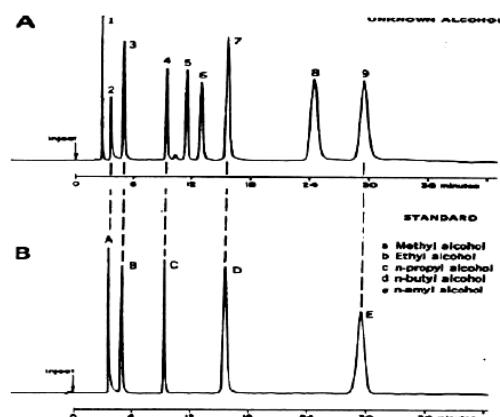
อยู่ในช่วง 30-320 องศาเซลเซียส ใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นสารหล่อเย็น เพื่อควบคุมอุณหภูมิ ตั้งแต่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.01 วินาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที จนถึง อุณหภูมิสุดท้าย 320 องศาเซลเซียส ที่ไว้ที่อุณหภูมินี้ 8.50 นาที มีตัวตรวจวัด ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณที่เกิดขึ้น เมื่อสารแยกออกจากคอลัมน์ จะถูกบันทึก และแสดงออกในรูปแบบโครมาโทแกรม(Chromatogram) แสดงดังรูปที่ ค.3



รูปที่ ค.3 โครมาโทแกรมที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

Retention Time คือ เวลาที่สารแต่ละชนิดใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์นับจากเริ่มต้นของการวิเคราะห์ถึงตำแหน่งเวลาที่ตัวตรวจวัดอ่านค่าสัญญาณสูงสุด (Peak) จากการตรวจวัดของสารตัวอย่างนั้น ซึ่ง Retention Time เป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยขึ้นกับอัตราการไหลของแก๊สพา และอุณหภูมิที่ใช้กับคอลัมน์ เมื่อให้การวิเคราะห์อยู่ในสภาวะคงที่ ค่า Retention Time ของสารต่างๆที่ใช้วิเคราะห์ควรจะต้องมีค่าคงที่หรือใกล้เคียงกันมากที่สุด ดังนั้น การตรวจพิสูจน์องค์ประกอบของสารตัวอย่างต้องทำการวิเคราะห์ทั้งสารตัวอย่างและสารมาตรฐานในภาวะเดียวกัน เมื่อนำค่า Retention Time มาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ ค.4 จะสามารถบอกองค์ประกอบในสารตัวอย่างได้



รูปที่ ค.4 การเปรียบเทียบค่า Retention Time ของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน

การวิเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น จะวิเคราะห์ตามคาบจุดเดือดของสาร ดังนี้

IBP	≤	200 °C	= Naphtha
200 °C	≤	250 °C	= Kerosene
250 °C	≤	350 °C	= Light Gas Oils
350 °C	≤	370 °C	= Heavy Gas Oils
370 °C	≤	FBP	= Long Residue



ภาคผนวก ง.

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลและการใช้โปรแกรม Design Expert

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design) หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ ได้แก่ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากอันตรกิริยาของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ เนื่องจากเป็นการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองทีละปัจจัย และทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยอื่นได้ รวมทั้งทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้ซึ่งการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ได้แก่ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^k และการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ชนิดแรก คือการออกแบบที่ประกอบด้วย 2 ปัจจัย (A และ B) แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ การออกแบบชนิดนี้เรียกว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะอยู่ที่ “ต่ำ” และ “สูง” การทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบสามารถแสดงผลของปัจจัยด้วยตัวอักษรลาตินตัวใหญ่ ดังนั้น A จะแทนผลของปัจจัย A, B แทนผลของปัจจัย B และ AB แทนอันตรกิริยาของปัจจัย AB ในการออกแบบ 2^2 ระดับต่ำและสูงจะแทนด้วยเครื่องหมาย + และ - บนแกน A และ B ตามลำดับ การทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย สำหรับการออกแบบจะแทนด้วยตัวอักษรเล็ก จะเห็นได้ว่าสำหรับระดับสูงของปัจจัยใดๆจะแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็กของปัจจัยนั้น ในการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้นสำหรับระดับต่ำจะไม่ปรากฏตัวอักษรใดๆในการทดลองร่วมปัจจัย ดังนั้นสำหรับการออกแบบ 2^k ในที่นี้ a จะแทนการทดลองร่วมปัจจัยของปัจจัย A ที่ระดับสูงและ B ที่ระดับต่ำ, b แทน A ที่ระดับต่ำและ B ที่ระดับสูง ab แทนทั้ง ปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับสูง และแทนทั้งปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับต่ำ

สูตรการคำนวณ

1. Contrast = (ผลรวมของค่าการทดลองแต่ละ Treatment) \times [สัมประสิทธิ์ (-1 หรือ +1) ของตัวแปรหรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปร]
2. Effect Estimate = $2 \frac{(\text{Contrast}_{AB..K})}{n2^k}$
3. Sum of Squares_{AB..K} (SS) = $\text{Contrast}_{AB..K}^2$
4. Total of sum of squares (SS_T) = $\sum_{i=1} \sum_{j=1} \sum_{k=1} y_{ijk}^2 - y^2 \dots / N$
N = จำนวนค่าสังเกตทั้งหมด
5. Sum of Squares Error (SS_E) = SS_T - SS main effect
6. Mean of Square (MS) = SS/Degree of freedom
7. %Normal Probability = $\frac{(\text{Cumulative frequency} - 0.5) \times 100}{\text{Total Cumulative frequency}}$
8. F₀ = MS effect/MS error

ตัวอย่างงานวิจัย ไพโรไลซิสของน้ำมันปลาเหลือทิ้งเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวบนแมกนีเซียมออกไซด์ ออกแบบการทดลองเป็น 2⁴ แฟกทอเรียลแบบ 2 เรพลิเคต โดยกำหนดสัญลักษณ์และระดับของตัวแปรดังนี้

ตาราง ง. 1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา น้ำมันปลาเหลือทิ้งเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวบนแมกนีเซียมออกไซด์

ตัวแปร	ระดับ	
	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
A อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	420	500
B เวลา (นาที)	30	60
C ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์)	1	5
D ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1	5

การใช้โปรแกรม Design-Expert ในการคำนวณ

- เมื่อเข้าสู่โปรแกรม คลิกไปที่ file ----> New Design และจะแสดงดังรูปที่ ง.1

2 Level Factorial Design
Design for 2 to 15 factors where each factor is varied over 2 levels. Useful for estimating main effects and interactions. Fractional factorials can be used for screening many. The color coding represents the design resolution: Green = Res V, Yellow = Res IV, and Red = Res III.

		Number of Factors													
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Experiments	4	Full	1/2 Fract.												
	8		Full	1/2 Fract.	1/4 Fract.	1/8 Fract.	1/16 Fract.								
	16			Full	1/2 Fract.	1/4 Fract.	1/8 Fract.	1/16 Fract.	1/32 Fract.	1/64 Fract.	1/128 Fract.	1/256 Fract.	1/512 Fract.	1/1024 Fract.	1/2048 Fract.
	32				Full	1/2 Fract.	1/4 Fract.	1/8 Fract.	1/16 Fract.	1/32 Fract.	1/64 Fract.	1/128 Fract.	1/256 Fract.	1/512 Fract.	1/1024 Fract.
	64					Full	1/2 Fract.	1/4 Fract.	1/8 Fract.	1/16 Fract.	1/32 Fract.	1/64 Fract.	1/128 Fract.	1/256 Fract.	1/512 Fract.
	128						Full	1/2 Fract.	1/4 Fract.	1/8 Fract.	1/16 Fract.	1/32 Fract.	1/64 Fract.	1/128 Fract.	1/256 Fract.
	256							Full	1/2 Fract.	1/4 Fract.	1/8 Fract.	1/16 Fract.	1/32 Fract.	1/64 Fract.	1/128 Fract.

รูปที่ ง. 1 ตารางของ 2 level Factorial Design

- เลือกจำนวนตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งหมด 4 ปัจจัย เลือกที่ Full ของช่อง 4 จากนั้นกรอกจำนวนที่ทำการทดลองซ้ำในช่อง Replicates = 2, Center point per block = 3 กดที่ Continue จะปรากฏดังรูปที่ ง.2 เมื่อกรอกตัวแปรเสร็จคลิกที่ Continue

จ. ภาวาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Factors					
	Name	Units	Type	Low	High
A:	A		Numeric	-1	1
B:	B		Numeric	-1	1
C:	C		Numeric	-1	1
D:	D		Numeric	-1	1

	Name	Units	Type	Low	High
A:	Temperature	C	Numeric	-1	1
B:	Time	min	Numeric	-1	1
C:	Pressure	bar	Numeric	-1	1
D:	Catalyst	%wt	Numeric	-1	1

รูปที่ ง.2 ตัวแปรและหน่วยที่ใช้ในการทดลอง

3. กรอกชื่อตัวแปร, หน่วยของตัวแปร และช่วงขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการศึกษาให้ครบ จากนั้นคลิกที่ Continue จะปรากฏดังรูปที่ ง.3

Responses: 3

	Name	Units
	Response 1	
	Response 2	
	Response 3	

รูปที่ ง.3 Response และ หน่วยของตัวแปรที่ทำการทดลอง

4. กรอกชื่อและหน่วยของ Response ที่ต้องการศึกษาทั้งหมด คลิกที่ Continue จะพบปัจจัยที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด เช่น การทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง ค่ากลาง 3 การทดลอง ทำซ้ำ 1 ครั้ง รวมการทดลอง 35 การทดลอง จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลอง กรอกลงในแต่ละช่อง Response ดังแสดงในรูปที่ ง.4

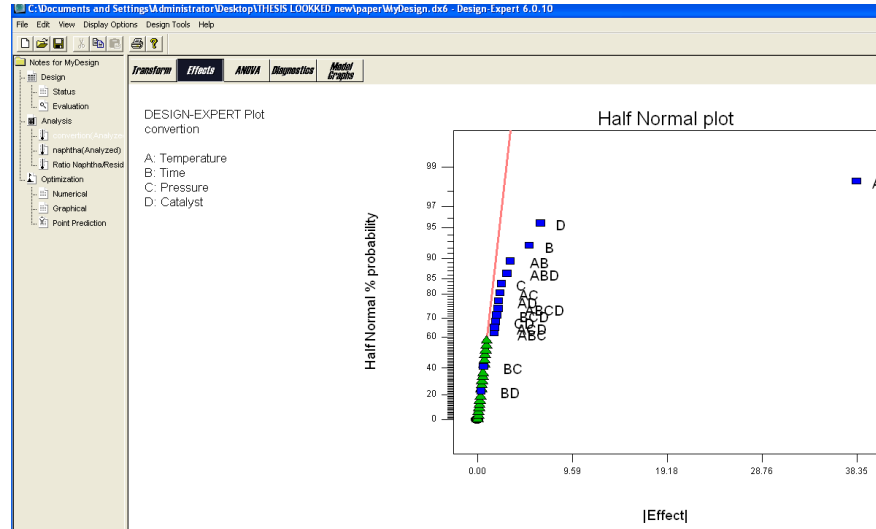
C:\Documents and Settings\Administrator\Desktop\THESIS LOOKKED new\paper\MyDesign.dxd - Design-Expert 6.0.10

File Edit View Display Options Design Tools Help

	Std	Run	Block	Factor 1 A:Temperature C	Factor 2 B:Time min	Factor 3 C:Pressure bar	Factor 4 D:Catalyst %wt	Response 1 conversion %wt	Response 2 naphtha %wt	Response 3 Ratio Naphtha/Residu
	33	1	Block 1	460.00	45.00	3.00	3.00	69.35	26.3	0.98
	30	2	Block 1	420.00	60.00	5.00	5.00	54.01	23.25	0.71
	1	3	Block 1	420.00	30.00	1.00	1.00	33.1	13.3	0.3
	6	4	Block 1	420.00	60.00	1.00	1.00	42.56	14.6	0.35
	15	5	Block 1	500.00	60.00	5.00	1.00	86.73	30.7	1.49
	10	6	Block 1	420.00	30.00	5.00	1.00	49.39	12.67	0.29
	29	7	Block 1	420.00	60.00	5.00	5.00	42.16	16.4	0.43
	32	8	Block 1	500.00	60.00	5.00	5.00	94.05	25.3	1.1
	24	9	Block 1	500.00	60.00	1.00	5.00	96.56	20.33	0.92
	26	10	Block 1	420.00	30.00	5.00	5.00	51.14	11.2	0.26
	17	11	Block 1	420.00	30.00	1.00	5.00	49.87	13.5	0.31
	28	12	Block 1	500.00	30.00	5.00	5.00	83.71	25.75	1.07
	27	13	Block 1	500.00	30.00	5.00	5.00	86.37	25.67	1.22
	23	14	Block 1	500.00	60.00	1.00	5.00	97.27	24.5	1.26
	5	15	Block 1	420.00	60.00	1.00	1.00	45.64	16.4	0.42
	18	16	Block 1	420.00	30.00	1.00	5.00	45.53	13.17	0.29
	8	17	Block 1	500.00	60.00	1.00	1.00	83.23	27.5	1.24
	7	18	Block 1	500.00	60.00	1.00	1.00	78.45	26.5	1.1
	12	19	Block 1	500.00	30.00	5.00	1.00	73.08	22.75	0.83
	13	20	Block 1	420.00	60.00	5.00	1.00	51.97	14	0.33
	34	21	Block 1	460.00	45.00	3.00	3.00	73.95	30	1.29
	11	22	Block 1	500.00	30.00	5.00	1.00	78.73	30.75	1.56

รูปที่ ง.4 ตารางการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองที่ภาวะต่างๆ

5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองโดยโปรแกรม เช่น วิเคราะห์หรือย่อยผลได้ของการเปลี่ยนแปลงไปของเชื้อเพลิงเหลว โดยกตที่ conversion จากนั้นคลิกที่ Effect



รูปที่ ง.5 half normal plot

6. กตที่ค่าว่า ANOVA เพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณและเป็นการยืนยันผลของ Normal probability

ANOVA for Selected Factorial Model

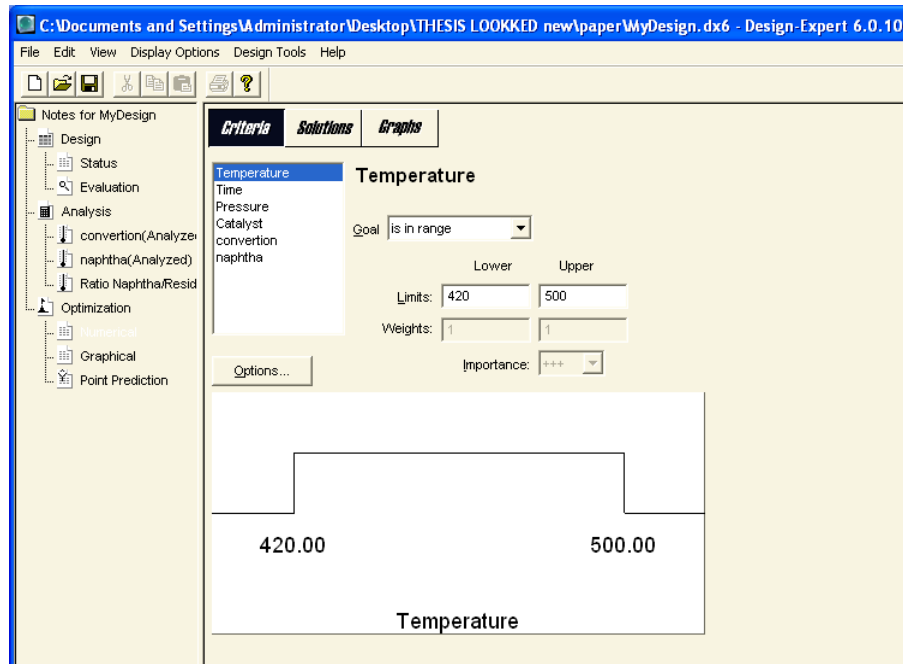
Analysis of variance table [Partial sum of squares]

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	12745.25	15	849.68	85.07	< 0.0001
A	11767.31	1	11767.31	1178.11	< 0.0001
B	220.08	1	220.08	22.03	0.0002
C	47.00	1	47.00	4.71	0.0437
D	327.17	1	327.17	32.76	< 0.0001
AB	87.58	1	87.58	8.77	0.0084
AC	41.40	1	41.40	4.15	0.0567
AD	36.59	1	36.59	3.66	0.0716
BC	3.20	1	3.20	0.32	0.5783
BD	1.06	1	1.06	0.11	0.7485
CD	27.75	1	27.75	2.78	0.1129
ABC	23.22	1	23.22	2.32	0.1447
ABD	71.88	1	71.88	7.20	0.0152
ACD	24.61	1	24.61	2.46	0.1339
BCD	30.77	1	30.77	3.08	0.0962
ABCD	35.62	1	35.62	3.57	0.0752
Curvature	98.93	1	98.93	9.90	0.0056
Pure Error	179.79	18	9.99		
Cor Total	13023.96	34			

รูปที่ ง.6 การคำนวณผลของ ANOVA

จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert ซึ่งบ่งบอกถึงปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ของปัจจัยนั้น เป็นตัวแปรที่มีผลต่อการทดลอง

7. จากนั้นวิเคราะห์ห้ปัจจัยอื่นๆ ตามข้อ 5-6
8. หาภาวะที่เหมาะสมต่อการทดลอง กติ numerical ---> พร้อมกรอกขอบเขตที่ต้องการในช่อง Limit ดังรูปที่ ง. 7



รูปที่ ง. 7 ขอบเขตที่ต้องการในการทดลอง

9. กติ Solution จะได้สภาวะที่เหมาะสม

Constraints		Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
Temperature	is in range	420	500	1	1	3
Time	is in range	30	60	1	1	3
Pressure	is in range	1	5	1	1	3
Catalyst	is in range	1	5	1	1	3
conversion	maximize	33.1	100	1	1	3
naphtha	maximize	11.2	40	1	1	3

Solutions							
Number	Temperature	Time	Pressure	Catalyst	conversion	naphtha	Desirability
1	500.00	60.00	5.00	1.60	87.3889	30.9428	0.746
2	499.94	48.48	5.00	1.00	82.2463	29.9807	0.692
3	500.00	59.98	5.00	4.10	92.2111	26.4352	0.684
4	500.00	54.87	2.54	1.00	82.2377	28.7444	0.669
5	500.00	48.70	2.87	1.00	81.5326	28.7153	0.664
6	500.00	60.00	2.65	3.18	89.935	25.9856	0.660
7	499.96	48.13	2.67	3.67	87.6169	25.9592	0.646
8	500.00	38.50	1.44	1.00	80.5891	28.093	0.645
9	500.00	43.17	1.58	1.00	80.7594	28.0179	0.645
10	499.89	41.93	5.00	4.81	88.1355	25.502	0.639

รูปที่ ง. 8 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสิญจนา มาบุญฉือ เกิดวันที่ 28 พฤศจิกายน 2535 ที่จังหวัดชัยนาท สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2557 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2558

