

ไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ใน  
เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

นายเชษฐา จิ่งเจริญพาณิชย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

CATALYTIC PYROLYSIS OF USED COOKING OIL BY MAGNESIUM OXIDE AND  
ACTIVATED CARBON IN CONTINUOUS REACTOR

Mister Chettha Jungjaroenpanit

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วย  
แมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์  
แบบต่อเนื่อง

โดย

นายเชษฐา จิ่งเจริญพาณิชย์

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ นารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เวียบร้อยเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ)

เชษฐา จิ่งเจริญพาณิชย์ : ไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว  
ด้วยแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง  
(CATALYTIC PYROLYSIS OF USED COOKING OIL BY MAGNESIUM  
OXIDE AND ACTIVATED CARBON IN CONTINUOUS REACTOR) อ.ที่  
ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ธราพงษ์ วิจิตรสานต์, 117 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น  
เชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์  
แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร ทำการศึกษาที่ภาวะอุณหภูมิ 380-430 องศาเซลเซียส อัตราการ  
ป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 60-180 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100-300  
มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ร้อยละ  
30-60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับเพื่อ  
ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน  
และองค์ประกอบที่ดีที่สุด นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณและองค์ประกอบของน้ำมัน  
ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง Simulate Distillation Gas Chromatography (DGC) ภาวะที่เหมาะสม  
จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม design-expert พบว่าภาวะของการแตกตัวเชิงเร่ง  
ปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียม  
ออกไซด์และถ่านกัมมันต์คืออุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้  
แล้ว 66.60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณ  
ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ร้อยละ 60.00 โดยน้ำหนัก จะได้ค่าร้อยละ  
ผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจะ 74.78 โดยน้ำหนัก ผลได้ของแอฟทาร์ร้อยละ 20.17  
โดยน้ำหนัก ผลได้ของเคโรซีนร้อยละ 10.39 โดยน้ำหนักและผลได้ของดีเซลร้อยละ 43.82  
โดยน้ำหนัก

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา..... 2555.....

# # 5472226123: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: CATALYTIC PYROLYSIS/ USED COOKING OIL/ DIESEL FRACTION/  
LIQUID PRODUCT YIELD.

CHETTHA JUNGJAROENPANIT: CATALYTIC PYROLYSIS OF USED  
COOKING OIL BY MAGNESIUM OXIDE AND ACTIVATED CARBON IN  
CONTINUOUS REACTOR. ADVISOR: ASSOC.PROF.THARAPONG  
VITIDSANT, 117 pp.

This research studies the pyrolysis of used cooking oils to liquid fuels by magnesium oxide and activated carbon in a continuous reactor. The objective is to investigate the influence of factors that affect the continuous pyrolysis process and determine the optimum condition that produces the maximum liquid yield. This is achieved with the assistance of the  $2^k$  factorial experimental design. The parameters investigated were reaction temperature (380 - 430 °C), used cooking oil flow rate (60 - 180 ml/hr), the carrier gas ( $N_2$ ) flow rate (100 - 300 ml/min) and the amount of catalyst (30-60 percent by volume of reactor). Used cooking oil and carrier gas was continuously fed into a 3.0 Liter reactor. The obtained product from was analyzed by Simulated Distillation gas chromatography (DGC). According to design-expert program, it was found that reaction of used cooking oil on the reaction temperature of 430 °C, used cooking oil flow rate at 66.60 ml/hr, the carrier gas flow rate at 100 ml/min and catalyst loading of 60 percent by volume of reactor gave the highest yield. The liquid yield at optimum condition is 74.78 percent by weight and contains a naphtha fraction of 20.17 percent by weight, a kerosene fraction of 10.39 percent by weight and a diesel fraction of 43.82 percent by weight.

Department : Chemical Technology..... Student's Signature .....

Field of Study : Chemical Technology..... Advisor's Signature .....

Academic Year : 2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ ความคิดเห็น รวมถึงแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่กรุณาให้ความรู้ ความคิดเห็น รวมถึงแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณ Japan International Cooperation Agency (JICA) สำหรับการให้ทุนสนับสนุนในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและกรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 น้ำมันปิโตรเลียม.....	5
2.2 พลังงานทดแทน.....	6
2.2.1 นโยบายความมั่นคงด้านการจัดหาพลังงาน.....	8
2.2.2 นโยบายด้านการอนุรักษ์พลังงาน พัฒนาและส่งเสริมพลังงานทดแทน.....	8
2.2.3 นโยบายด้านสิ่งแวดล้อมพลังงานโดยพัฒนาพลังงานอย่างมีคุณภาพ.....	9
2.3 น้ำมันปรุงอาหาร.....	10
2.3.1 การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิง.....	10
2.3.2 สมบัติเฉพาะทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช.....	11
2.3.3 น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว.....	12
2.4 เชื้อเพลิงชีวภาพ.....	17
2.5 เทคโนโลยีในการผลิตเชื้อเพลิงเหลว.....	18
2.5.1 เทคโนโลยีในการผลิตเชื้อเพลิงดีเซล.....	20
2.6 ปฏิกริยาการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน.....	21
2.7 ตัวเร่งปฏิกริยา.....	26

2.7.1	เทอมที่เกี่ยวข้องกับการเร่งปฏิกิริยา.....	27
2.7.2	สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	29
2.7.3	การดูดซับและการคายซับ.....	30
2.7.4	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์.....	31
2.7.5	ปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์.....	34
2.8	การวัดพื้นที่ผิวรูพรุนด้วยวิธีบีเอต.....	35
2.9	กระบวนการฟีดแอด .....	37
2.10	กระบวนการไพโรไลซิส.....	38
2.11	การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิง.....	40
2.12	การวิเคราะห์คุณภาพน้ำมัน.....	43
2.13	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44
บทที่ 3	เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	47
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	47
3.2	สารตั้งต้นและสารเคมี.....	51
3.3	การดำเนินการวิจัย.....	51
3.4	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	53
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	55
4.1	การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว.....	55
4.1.1	การวิเคราะห์น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วย Sim-Distillation.....	55
4.1.2	การวิเคราะห์น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเทคนิค GC-MS.....	56
4.1.3	การวิเคราะห์น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเทคนิค FTIR.....	57
4.1.4	การวิเคราะห์ชนิดของกรดไขมัน.....	58
4.1.5	การวิเคราะห์น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเทคนิค TGA.....	59
4.2	การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	60
4.2.1	การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	60
4.2.2	การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	61
4.3	ผลการทดลองที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว.....	62
4.3.1	การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อร้อยละเชื้อเพลิงเหลวที่ได้.....	62



4.3.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อร้อยละดีเซลที่ได้.....	67
4.3.3 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว.....	71
4.3.4 ผลของน้ำมันใช้แล้วต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว.....	73
4.3.5 ผลของแก๊สตัวพาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว.....	75
4.3.6 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว.....	76
4.4 คำแนะนำภาวะเหมาะสมของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา.....	78
4.4.1 คำแนะนำภาวะเหมาะสมด้วยโปรแกรม Design-Expert.....	78
4.5 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด.....	80
4.6 วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ CHNO .....	81
4.7 วิเคราะห์ค่าไอโอดีนและปริมาณน้ำ.....	81
4.8 วิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวด้วย GC-MS.....	82
4.9 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเชื้อเพลิงเหลวด้วยเทคนิค FTIR.....	84
4.10 วิเคราะห์ค่าความร้อนและค่าความหนืด.....	85
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	86
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	87
เอกสารอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก.....	93
ภาคผนวก ก.....	94
ภาคผนวก ข.....	98
ภาคผนวก ค.....	99
ภาคผนวก ง.....	102
ภาคผนวก จ.....	104
ภาคผนวก ฉ.....	105
ภาคผนวก ช.....	110
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	117

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความยากง่ายของการจัดหาวัตถุดิบน้ำมันพืชใช้แล้ว.....	15
2.2 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี.....	31
2.3 กระบวนการฟีดแบล็ค.....	37
2.4 ชนิดของเทคโนโลยีไพโรไลซิส.....	39
2.5 ชนิดและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายน้ำมันพืชด้วยความร้อน.....	42
2.6 สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายด้วยความร้อน.....	42
3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	51
3.2 จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลสองระดับ.....	52
4.1 องค์ประกอบของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วก่อน.....	55
4.2 องค์ประกอบของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วย GC-MS.....	56
4.3 องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว.....	58
4.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	60
4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	61
4.6 ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา.....	63
4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว.....	66
4.8 ร้อยละผลได้ของดีเซลที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา.....	67
4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซล.....	70
4.10 ขอบเขตของการหาภาวะเหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert.....	78
4.11 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert.....	79
4.12 ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง.....	80
4.13 ค่าความเป็นกรด.....	80
4.14 องค์ประกอบธาตุ CHNO จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา.....	81
4.15 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนและปริมาณน้ำ.....	81
4.16 องค์ประกอบของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเครื่อง GC-MS.....	83
4.17 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและค่าความหนืด.....	85

ตารางที่	หน้า
ก1 ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ.....	93
ข1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	110

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟิน.....	5
2.2 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทแนฟทีน.....	6
2.3 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทอโรมาติก.....	6
2.4 แสดงความแตกต่างของน้ำมันบริสุทธิ์กับน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว.....	12
2.5 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์.....	13
2.6 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทอโรมาติก.....	17
2.7 การเกิดกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน.....	20
2.8 การเกิดกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน.....	21
2.9 พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา.....	28
2.10 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์.....	31
2.11 การแพร่จากภายนอกสารตั้งต้น.....	32
2.12 การแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน.....	32
2.13 การดูดซับทางเคมีของสาร A บนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	33
2.14 การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา.....	33
2.15 โครงผลึกของแมกนีเซียมออกไซด์.....	34
2.16 กราฟการวัดพื้นที่ผิวด้วยวิธีบีอีที.....	35
2.17 กราฟเส้นตรงของสมการบีอีที.....	36
2.18 กระบวนการทางความร้อนเคมีในรูปแบบต่างๆ.....	38
2.19 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวล.....	39
3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	47
3.2 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล.....	48
3.3 อุปกรณ์การควบคุมแน่นผลิตภัณฑ์.....	49
3.4 ชุดกรองสูญญากาศ.....	49
3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น.....	50
3.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบกับแมสสเปกโตรมิเตอร์.....	50
4.1 องค์ประกอบของน้ำมันปรุงอาหารเมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย GC-MS.....	56

ภาพที่	หน้า
4.2 แสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบในน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว.....	57
4.3 อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการสลายตัวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเทคนิค TGA.....	60
4.4 Normal probability plot of residuals ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว.....	65
4.5 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว.....	65
4.6 Normal probability plot of residuals ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซล.....	69
4.7 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซล.....	69
4.8 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทดลอง.....	71
4.9 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทดลอง.....	71
4.10 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว.....	73
4.11 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว.....	73
4.12 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนแก๊สตัวพา.....	75
4.13 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนแก๊สตัวพา.....	75
4.14 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์.....	76
4.15 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์.....	77
4.16 องค์ประกอบของน้ำเชื้อเพลิงเหลวเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS.....	82
4.17 แสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบในเชื้อเพลิงเหลวเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค FTIR.....	84
4.18 แสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบในเชื้อเพลิงเหลวเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค FTIR.....	84
ข.1 เครื่อง AUTOSORB-1-CMP, Quantachrome.....	97
ค.1 ส่วนประกอบของเครื่อง Thermogravimetric Analyzer.....	98

ภาพที่	หน้า
จ.1 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	104
จ.2 Flame Ionization Detector.....	105
จ.3 โครมาโทแกรมที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	106
จ.4 การเปรียบเทียบค่า Retention Time ของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน.....	107
จ.5 โครมาโทแกรมจากการแยกองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวจากเครื่องแก๊สโครมาโท กราฟี.....	108
จ.6 การกระจายตัวตามจุดเดือดขององค์ประกอบในเชื้อเพลิงเหลวจากเครื่องแก๊สโครมาโท กราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น.....	108
ช.1 แสดงตารางของ 2 Level Factorial Design.....	111
ช.2 แสดงตัวแปรและหน่วยที่ใช้ในการทดลอง.....	111
ช.3 แสดง Response และ หน่วยของตัวแปรที่ทำการทดลอง.....	112
ช.4 แสดงตารางการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองที่ภาวะต่างๆ.....	112
ช.5 แสดงแถบของ gas liquid kerosene และ diesel.....	113
ช.6 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้เนฟทาจากปฏิกิริยาแตกตัวของน้ำมัน ปรุงอาหารใช้แล้ว.....	113
ช.7 แสดงการคำนวณผลของ ANOVA.....	114
ช.8 ขอบเขตที่ต้องการในการทดลอง.....	114
ช.9 แสดงสภาวะที่เหมาะสมที่ได้.....	115

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันนี้เชื้อเพลิงเหลวเป็นพลังงานสำคัญที่มีบทบาทเป็นอย่างมากสำหรับมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นภาคครัวเรือนหรือภาคอุตสาหกรรมล้วนแล้วแต่มีการใช้เชื้อเพลิงเหลวในปริมาณที่มากขึ้นเป็นอย่างมากซึ่งตรงข้ามกับปริมาณที่ลดน้อยลงของเชื้อเพลิงเหลวที่มีอยู่บนโลก นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลกทำให้ปัญหาวิกฤตทางด้านพลังงานยิ่งทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการแสวงหาพลังงานทางเลือกอื่นๆ เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงทางเลือก เช่น น้ำมันพืชและและอนุพันธ์ของน้ำมันพืช (เอทิลหรือเมทิลเอสเตอ์) ซึ่งเป็นชีวมวลที่หาได้ง่าย เข้ามามีบทบาทต่อการผลิตเชื้อเพลิงเหลวเพื่อใช้แทนที่เชื้อเพลิงฟอสซิลที่กำลังลดปริมาณลงอย่างต่อเนื่อง

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งมีการเพาะปลูกพืชน้ำมันหลายชนิด เช่น ถั่วเหลือง ปาล์มน้ำมัน สนุ่นดำ ถั่วลิสง มะพร้าว ละหุ่ง เป็นต้น ทั้งนี้น้ำมันจากพืชมีค่าความร้อนคิดเป็นร้อยละ 83 - 85 ของน้ำมันดีเซล แต่มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าและมีความหนืดมากกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมถึง 10 เท่า การใช้น้ำมันจากพืชเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง พบว่ามีปัญหาการทำงานของหัวฉีดน้ำมัน การป้อนน้ำมันไม่คงที่ การสันดาปเกิดไม่สมบูรณ์ เกิดคราบเขม่าที่หัวฉีด ผงงูถูกสูบ แหวนและวาล์วหลังการสันดาป ที่อุณหภูมิค่าประมาณ 24 - 26 องศาเซลเซียส น้ำมันจากพืชเกิดเป็นไข จึงเกิดปัญหาการใช้งาน

แต่อย่างไรก็ตามการนำน้ำมันพืชชนิดต่างๆ มาใช้ในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวหรือน้ำมันนั้นยังเป็นสิ่งที่ไม่น่าสนใจเท่าไร เนื่องจากเป็นการแย่งการนำไปบริโภคของภาคครัวเรือน ดังนั้นการนำน้ำมันปรุงอาหารที่ภาคครัวเรือนใช้งานแล้ว (used cooking oil) มาทำเป็นเชื้อเพลิงเหลวหรือน้ำมันจึงได้รับความสนใจมากกว่า ซึ่งเทคโนโลยีในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวแบ่งออกเป็นกระบวนการทางชีวภาพโดยทำการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่เป็นโมเลกุลเล็ก กระบวนการนี้มีข้อเสียคือต้องใช้เวลาในกระบวนการผลิตนาน กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (transesterification) โดยการนำน้ำมันที่สกัดได้จากพืชน้ำมันผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันกับแอลกอฮอล์เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล กระบวนการนี้จะมีเกิดของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการ กระบวนการสุดท้ายคือการใช้ความร้อนสูง เช่น กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นการนำ

สารชีวมวลผ่านความร้อนสูงในสภาพไร้ออกซิเจน จะเกิดการสลายตัวเกิดเป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวและแก๊สผสมกัน ซึ่งกระบวนการที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยตรง ด้วยเหตุผลนี้ กระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็นกระบวนการหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจในแปรรูปน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว เนื่องจากกระบวนการนี้สามารถนำมาใช้งานกับน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วซึ่งมักจะมีองค์ประกอบของกรดไขมันอิสระสูง ไม่มีการเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสียและไม่มีการใช้แอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้น เป็นเปลี่ยนน้ำมันที่ใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยตรง โดยการผลิตเชื้อเพลิงเหลวแบบเดิมซึ่งนิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันจะเป็นการผลิตเชื้อเพลิงเหลวผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันซึ่งไม่สามารถใช้งานกับน้ำมันใช้แล้วเพราะกรดไขมันอิสระที่ผสมอยู่จะไปทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสบู่และทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลง ทำให้เกิดน้ำเสีย เกิดของเสียกลีเซอริน รวมถึงต้องมีการใช้แอลกอฮอล์ เช่น เมทานอลเป็นสารตั้งต้น

ดังนั้นงานวิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาการไพโรไลซิสเพื่อเปลี่ยนน้ำมันพืชที่ใช้แล้วให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากการกลั่นเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการไพโรไลซิสน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) รองรับบนถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคืออุณหภูมิ 380-430 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 60-180 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100-300 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ปริมาณ 30-60% โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของน้ำมัน แก๊ส และของแข็ง และการวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (simulated distillation gas chromatograph) เพื่อให้หาค่าการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันในช่วงจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวผ่านกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์เพื่อให้ได้เป็นเชื้อเพลิงเหลวจำนวนมากที่สุด
2. ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีสมบัติใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์น้ำมันปิโตรเลียมที่ได้จากการกลั่น

### 1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับผลิตเชื้อเพลิงเหลวผ่านกระบวนการไพโรไลซิส
2. ศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันที่ใช้แล้วก่อนทำปฏิกิริยาด้วย
  - ศึกษาคุณสมบัติการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermo gravimetric/Differential Thermal Analyzer (TGA)
  - เครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatograph
  - เครื่องวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อน
  - เครื่องวิเคราะห์กรดไขมันจากสถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
3. วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ด้วย
  - โดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence spectrometry (XRF)
  - วิเคราะห์พื้นที่ผิวบีเอที (BET) ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการดูดซับและคายซับแก๊สไนโตรเจน
4. ออกแบบการทดลองโดยใช้แฟคทอเรียลแบบสองระดับจากโปรแกรม Design-expert โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ
  - อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา
  - อัตราการไหลของสารตั้งต้น
  - อัตราการไหลของแก๊สตัวพา
  - ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
5. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ด้วย
  - เครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatograph เพื่อทราบค่าการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันในช่วงจุดเดือดอุณหภูมิต่างๆ
  - เครื่อง Gas Chromatography Mass spectroscopy (GC-MS) เพื่อวิเคราะห์หาชนิดองค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างละเอียด

6. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของแก๊สที่ได้ โดยใช้เครื่อง Gas Chromatograph เพื่อทราบค่าการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันในช่วงจุดเดือดอุณหภูมิต่างๆ

7. นำผลตอบสนองที่ได้จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำเชื้อเพลิงเหลวมาหาภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วโดยใช้โปรแกรม Design-expert

8. วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง เขียนวิทยานิพนธ์

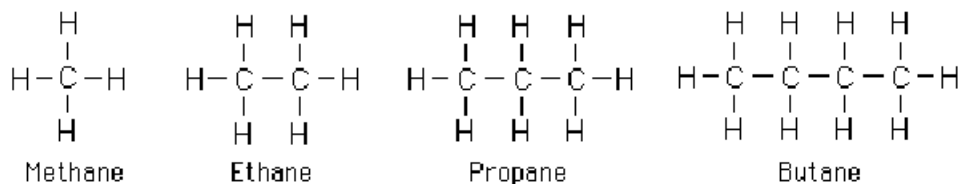
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 น้ำมันปิโตรเลียม [1-4]

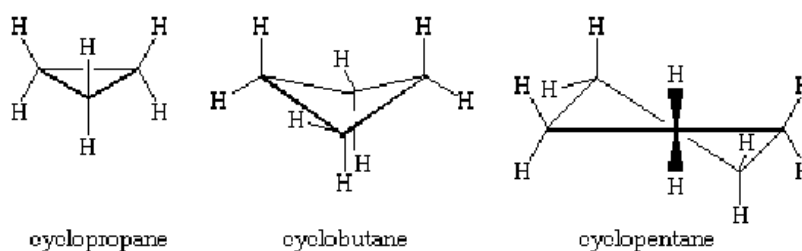
น้ำมันปิโตรเลียม หมายถึง น้ำมันที่ได้มาจากใต้พื้นดินของโลกซึ่งมีอยู่ทั่วไป น้ำมันปิโตรเลียมเกิดจากสัตว์ ทะเลหรือซากพืชและซากสัตว์ ที่ ตายทับถมอยู่ใต้ ทะเลมหาสมุทร ไขมันของสัตว์เหล่านั้น ได้ถูกกักขังด้วยชั้นต่างๆ ตะกอนเหล่านี้จะถูกอัดให้ แน่นขึ้นเรื่อยๆ จนกลายเป็น หินดินดาน หินปูน หินทราย หยดไขมันต่างๆ เคลื่อนผ่านหินเหล่านี้ จนกระทั่งไปพบกับหินที่แน่น ทึบทำให้ไขมันไหลต่อไปไม่ได้ ไขมันที่ ถูกขังจะสลายตัวเป็นน้ำมันปิโตรเลียม และก๊าซต่างๆ โดย ก๊าซเหล่านี้ จะลอยอยู่เหนือน้ำมัน เนื่องจากน้ำมันปิโตรเลียม เมื่อนำมาจากใต้ พื้นดิน มีลักษณะ เป็นของเหลวสีดำ น้ำตาล หรือน้ำตาลเข้ม เรียกว่า "น้ำมันดิบ" (crude oil) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ อยู่ในน้ำมันปิโตรเลียม เป็นสารประกอบจำพวกไฮโดรคาร์บอนมากมายหลายชนิด โดยสามารถ แบ่งออกเป็น 3 จำพวก ได้แก่

1. พาราฟิน (paraffin) เป็นอนุกรมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัวโดยมี ลักษณะ โครงสร้างโมเลกุลเชื่อมต่อกันเป็นเส้น มีสูตรทางเคมี โดยทั่วไปคือ  $C_nH_{2n+2}$  เช่น มีเทน (methane,  $CH_4$ ) อีเทน (ethane,  $C_2H_6$ ) เป็นต้น แสดงได้ดังภาพที่ 2.1



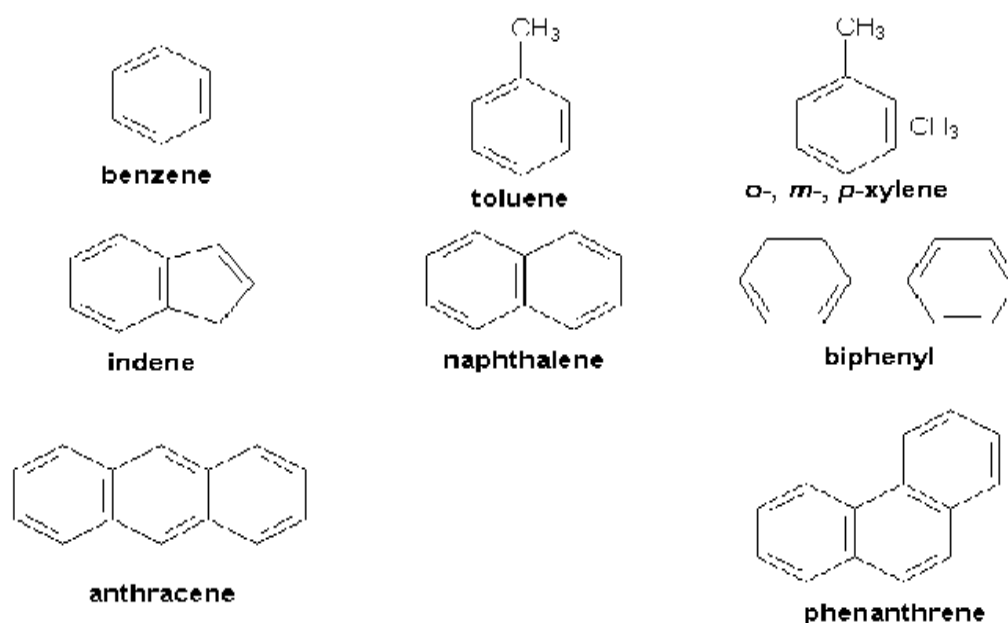
ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟิน [5]

2. แนฟทีน (naphthene) เป็นอนุกรมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัวโดยมีลักษณะ โครงสร้างโมเลกุลเชื่อมต่อกันเป็นวง มี สูตรทางเคมี ทั่วไป คือ  $C_nH_{2n}$  เช่น ไซโคลเพนเทน (cyclopentanes,  $C_5H_{10}$ ) และไซโคลเฮกเซน (cyclohexanes,  $C_6H_{12}$ ) แสดงได้ ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทแนฟทีน [6]

3. อโรมาติก (aromatic) มีโครงสร้างโมเลกุลที่เชื่อมต่อกันเป็นวงไม่อิมตัวหรือไม่มีความเสถียรภาพ มีสูตรทางเคมีทั่วไป คือ  $C_nH_{2n-6}$  เช่น เบนซีน (benzene,  $C_6H_6$ ), โทลูอีน (toluene,  $C_7H_8$ ) และไซลีน (xylene,  $C_8H_{10}$ ) แสดงได้ ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทอโรมาติก [7]

## 2.2 พลังงานทดแทน [8-11]

จาก ปัญหาเรื่องน้ำมันในตลาดโลกมีราคาแพงและประเทศไทยต้องเสียเงินตราต่างประเทศ ในการนำเข้าน้ำมัน ประกอบกับอัตราการใช้น้ำมันของประเทศไทย โดยเฉพาะน้ำมันดีเซลมีอัตราเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว กล่าวคือ ความต้องการน้ำมันดีเซลเป็นปริมาณ 9,928 ล้านลิตร ในปี พ.ศ. 2533 และเพิ่มเป็น 18,273 ล้านลิตร ในปี พ.ศ. 2547 หรือเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเฉลี่ยร้อยละ 4.5 ต่อปี การส่งเสริมและสนับสนุนใช้น้ำมันพืชซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สามารถผลิต ได้เองในประเทศมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน เป็นการรักษาเงินตราต่างประเทศ สร้างความมั่นคงและ

สามารถพึ่งพาตนเองด้านพลังงานของประเทศ อีกทั้งยังช่วยสร้างตลาดที่มั่นคงให้กับผลผลิตทางการเกษตรอีกด้วย

การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลไม่ใช่ของใหม่ มีการใช้มาตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 แต่ด้วยน้ำมันจากปิโตรเลียมยังมีราคาถูกและหาได้ง่าย ทำให้น้ำมันพืชไม่ได้รับความสนใจในการใช้แทนน้ำมันดีเซล หลังจากวิกฤตน้ำมันของโลกในปี พ.ศ. 2514 หรือ ค.ศ. 1971 เป็นต้นมา ได้เริ่มมีความตื่นตัว และความพยายามหาพลังงานทดแทนมาใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) ที่สามารถหาได้ในท้องถิ่น น้ำมันพืชเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งที่ได้รับการสนใจ นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลอีกครั้ง ในต่างประเทศ มีการนำน้ำมันพืชต่างๆ เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน และน้ำมันใช้แล้ว มาใช้ทดลองเดินเครื่องยนต์ดีเซล สำหรับประเทศไทยได้เคยมีงานวิจัยในเรื่องดังกล่าวมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524 โดยทดลองใช้น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันเมล็ดสบู่ดำ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม รวมถึงเอสเตอรืของน้ำมันปาล์ม เป็นพลังงานทดแทนในเครื่องยนต์ดีเซล เมื่อวิกฤตน้ำมันผ่านไป ความสนใจในการวิจัยค้นหา และศึกษาความเหมาะสมในการใช้พลังงานทดแทนจากน้ำมันพืชก็ลดน้อยลง รวมถึงไม่มีการสนับสนุนงบประมาณการวิจัยในด้านนี้อย่างต่อเนื่อง ทำให้ข้อมูลการใช้ น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลของประเทศไทย จำกัด จนถึงเมื่อมีวิกฤตน้ำมันแพงอีกครั้ง เมื่อกลางปี พ.ศ. 2547 ราคาน้ำมันดิบถีบตัวขึ้นสูงถึง 50 เหรียญสหรัฐต่อบาร์เรล และยังไม่มีความโน้มที่จะลดลงไป ทำให้มีการพูดถึงการนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นพลังงานทดแทนกันมากขึ้น

ดังนั้น กระทรวงพลังงานจึงได้ปรับปรุงยุทธศาสตร์พัฒนาและส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซล เสนอคณะรัฐมนตรีเห็นชอบเมื่อวันที่ 18 มกราคม 2548 ทั้งนี้ได้กำหนดเป้าหมายจะส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซลเพิ่มจากวันละ 2.4 ล้านลิตร ในปี พ.ศ. 2554 เป็น วันละ 8.5 ล้านลิตรในปี พ.ศ. 2555 โดยจะร่วมมือกับกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กำหนดพื้นที่ปลูก จัดหาพันธุ์ปาล์มน้ำมันที่เหมาะสมกับพื้นที่ปลูก และถ่ายทอดการบริหารจัดการปลูกปาล์ม ตลอดจนการพัฒนาพืชน้ำมันอื่นสำหรับในพื้นที่ไม่เหมาะสมจะปลูกปาล์มน้ำมัน เพื่อสนับสนุนนโยบายของรัฐบาลที่ประกาศให้เรื่องพลังงานทดแทนเป็นวาระแห่งชาติ

พลังงานทดแทน หรือ พลังงานทางเลือก (alternative energy) คือ พลังงานที่ได้มาจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป หรือแหล่งที่สามารถสร้างขึ้นใหม่เพื่อหมุนเวียนมาใช้ได้อีก เพื่อนำมาใช้แทนพลังงานเชื้อเพลิงหลักพลังงานทดแทนมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อยกว่าพลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิล สามารถแบ่งพลังงานทดแทนออกได้ 2 ประเภท คือ

1. พลังงานทดแทนจากแหล่งที่ใช้หมดไป ได้แก่ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ นิวเคลียร์ หินน้ำมัน และทรายน้ำมัน เป็นต้น
2. พลังงานหมุนเวียน คือ พลังงานทดแทนที่ใช้แล้วสามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานจากชีวมวล และไฮโดรเจน เป็นต้น

### 2.2.1 นโยบายความมั่นคงด้านการจัดหาพลังงาน [12-13]

การสร้างความมั่นคงในการจัดหาพลังงาน เพื่อให้มีปริมาณพลังงานเพียงพอต่อความต้องการของประเทศ โดยลดสัดส่วนการพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศ จะต้องพิจารณาให้ครอบคลุมทั้งด้านการผลิตและการจำหน่าย รวมถึงการจัดหาพลังงานหมุนเวียน หรือพลังงานทดแทน โดยพิจารณาถึง

- มีแหล่งสำรองพลังงานที่มีปริมาณเพียงพอ
- มีการกระจายแหล่งพลังงานและชนิดพลังงานเพื่อลดความเสี่ยง หลีกเลี่ยงการพึ่งพาพลังงานจากแหล่งเดียวหรือพลังงานชนิดเดียว
- คำนึงถึงคุณภาพชีวิตและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของชุมชนและท้องถิ่น
- ใช้ทรัพยากรพลังงานภายในประเทศที่มีอยู่อย่างจำกัด ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เหมาะสมกับคุณค่าของทรัพยากร

### 2.2.2 นโยบายด้านการอนุรักษ์พลังงาน พัฒนาและส่งเสริมพลังงานทดแทน

การอนุรักษ์พลังงาน คือ การส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานอย่างประหยัด และมีประสิทธิภาพ เป็นการเพิ่มต้นทุนทางธรรมชาติ เพิ่มโอกาสมีพลังงานใช้อย่างเพียงพอในอนาคต โดยใช้มาตรการจูงใจผ่านกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ควบคู่กับมาตรการบังคับของกฎหมาย และนโยบายราคาเพื่อให้ราคาพลังงานสะท้อนต้นทุนที่แท้จริง ส่งเสริมและกำหนดเป้าหมายการพัฒนาพลังงานทดแทนให้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและขยายขอบเขตให้กว้างขวางขึ้น ดังนั้นองค์ประกอบของแผนอนุรักษ์พลังงาน ได้แก่

2.2.2.1. แผนงานพัฒนาพลังงานทดแทน การดำเนินงานตามแผนพัฒนาพลังงานได้กำหนดให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่า ปี 2554 การใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น 9.2 % ของการใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ขั้นสุดท้ายประมาณ 7,530 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ พลังงานเชิงพาณิชย์ขั้นสุดท้าย (final commercial energy consumption) หมายถึง พลังงานขั้นสุดท้ายที่ผู้บริโภคใช้โดยไม่รวมเชื้อเพลิงที่นำไปใช้ในการผลิตพลังงานทุติยภูมิหรือทดแทนการใช้พลังงาน

เชิงพาณิชย์ พลังงานเชิงพาณิชย์ขั้นสุดท้าย มักใช้หน่วยเป็น “พันบาร์เรลเทียบเท่าน้ำมันดิบ” หรือ “พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (kilo ton oil equivalent, ktoe)”

2.2.2.2. นอกจากนี้พลังงานทดแทนยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พลังงานทดแทนจากพลังงานชีวมวลเป็นการนำเชื้อเพลิงที่มีอยู่ในประเทศมาเพิ่มมูลค่า และเพิ่มผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจให้แก่ชุมชนอีกด้วย มีแนวทางในการดำเนินงาน ดังนี้

- ศึกษา วิจัยพัฒนา และส่งเสริมเพื่อก่อให้เกิดการใช้พลังงานทดแทนมากขึ้นในการผลิตไฟฟ้า ความร้อน และการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพ เพื่อใช้ในภาคคมนาคมขนส่ง ภาคอุตสาหกรรม และครัวเรือน
- เสริมสร้าง และพัฒนาศักยภาพของบุคลากรที่เกี่ยวข้องกับงานด้านพลังงานหมุนเวียน
- เผยแพร่ข้อมูล และสร้างความเข้าใจให้กับประชาชนทั่วไป ให้รู้จักพลังงานทดแทนและสนับสนุนการดำเนินงานของรัฐ

2.2.2.3. แผนงานเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การดำเนินงานตามแผนเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เป็นการส่งเสริมให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในภาคคมนาคมขนส่ง ภาคอุตสาหกรรม และครัวเรือน โดยมีเป้าหมายลดการใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ ซึ่งคิดเป็นปริมาณพลังงานที่ประหยัดได้ในปี 2554 เท่ากับ 12.7% หรือเทียบเท่ากับพลังงาน 10,354 ktoe โดยมีแนวทางในการดำเนินงาน ดังนี้

- ศึกษา วิจัยพัฒนา และส่งเสริมเพื่อก่อให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในภาคคมนาคมขนส่ง ภาคอุตสาหกรรม และครัวเรือน
- เสริมสร้างและพัฒนาศักยภาพของบุคลากรที่เกี่ยวข้องกับงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน
- สร้างความรู้ความเข้าใจเพื่อให้มีการใช้พลังงานอย่างรู้คุณค่า

### 2.2.3 นโยบายด้านสิ่งแวดล้อมพลังงานโดยพัฒนาพลังงานอย่างมีคุณภาพควบคู่กับการดูแลสิ่งแวดล้อม

นโยบายด้านสิ่งแวดล้อมพลังงานจะให้ความสำคัญกับการป้องกันและแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการผลิตและใช้พลังงาน โดยส่งเสริมให้มีการใช้เชื้อเพลิงที่มีผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อย และส่งเสริมให้มีการควบคุมมลพิษ โดยใช้เทคโนโลยีควบคุม

มลพิษที่มีประสิทธิภาพ และอยู่ภายใต้มาตรฐานที่เหมาะสม รวมทั้งมีการกำหนดมาตรการต่างๆ เพื่อช่วยลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีแนวทางในการดำเนินงาน ดังนี้

- ปรับปรุงกฎระเบียบเรื่องความปลอดภัยและเรื่องปัญหาสิ่งแวดล้อม
- ขยายพื้นที่บังคับใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำ
- ปรับปรุงข้อกำหนดคุณภาพน้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซล
- แก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมจากน้ำมันหล่อลื่น
- ส่งเสริมให้มีการใช้เชื้อเพลิงสะอาดกับรถยนต์
- สนับสนุนการใช้ระบบขนส่งมวลชน

นโยบายพลังงานของประเทศไทยอยู่บนพื้นฐานของแนวคิดการพัฒนาที่ยั่งยืน (sustainable development) เพื่อเป็นแนวทางในการทำให้เกิดความมั่นคงด้านพลังงาน ลดการพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศ เกิดการอนุรักษ์พลังงาน และการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ อันจะนำไปสู่การพัฒนาพลังงานที่ยั่งยืนต่อไป

### 2.3 น้ำมันพืช [14]

น้ำมันจากพืชและสัตว์ มีองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ 1 โมเลกุล และกรดไขมัน 3 โมเลกุล ซึ่งไม่ระเหยที่อุณหภูมิห้อง และไม่ละลายน้ำ น้ำมันพืชให้พลังงานสูง มีวิตามินอี และส่วนใหญ่ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนในปริมาณมาก น้ำมันพืชบางชนิดเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสีและน้ำมันชักเงา เช่น น้ำมันลินสีด ในปัจจุบันน้ำมันพืชส่วนใหญ่นิยมนำไปทำเป็นน้ำมันปรุงอาหาร น้ำมันสลัด และมาการีน เป็นต้น

การสกัดน้ำมันจากพืชนิยมใช้การทุบ สับ หรือบดเมล็ดหรือเนื้อผลให้เซลล์แตก แล้วบีบอัดเอาน้ำมันออกมา กากเมล็ดที่เหลือสามารถนำไปสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลาย เช่น เฮกเซนได้อีก จากนั้นเมื่อระเหยเอาตัวทำละลายออกไปแล้ว จะเป็นขั้นตอนการทำน้ำมันให้บริสุทธิ์ด้วยการเติมต่างให้ความร้อนอบไอน้ำสกัดสีออกด้วยถ่านฯลฯ

#### 2.3.1. การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิง

เนื่องจากน้ำมันพืชมีสมบัติโดยรวมใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากกว่าน้ำมันในเครื่องยนต์เบนซินจึงเหมาะที่จะนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลมากกว่าเครื่องยนต์เบนซิน โดยมักใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ดีเซลที่มีความเร็วรอบต่ำ เช่นเครื่องยนต์สำหรับเกษตรกรรม และการประมง น้ำมันพืชแต่ละชนิดให้ค่าความร้อนต่อน้ำหนักประมาณร้อยละ 83 - 85 ของน้ำมันดีเซล



และมีค่าความหนืดสูงกว่า 10 เท่า ทำให้การฉีดน้ำมันเป็นฝอยได้ยาก ส่งผลต่อการป้อนน้ำมันและการสันดาปภายในเครื่องยนต์เกิดไม่สมบูรณ์ คราบเขม่าเกาะที่หัวฉีด ผนังลูกสูบ แหวนและวาล์ว ภายหลังจากการสันดาป และน้ำมันที่อุณหภูมิต่ำก็อาจจะเกิดเป็นไขขึ้นได้ นับว่าเป็นปัญหาต่อระบบการใช้เชื้อเพลิง และการใช้งานในฤดูหนาว นอกจากนี้การที่น้ำมันพีระเหยได้ช้า ทำให้การจุดระเบิดในเครื่องยนต์ทำได้ไม่ดี และการระเหยตัวกลายเป็นไอต่ำเมื่อใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลที่มีความเร็วรอบสูง

### 2.3.2. สมบัติเฉพาะทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช

1. ค่าแซพอนิฟิเคชัน (saponification number) หมายถึง จำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับน้ำมันหรือไขมัน 1 กรัม เพื่อหาขนาดหรือน้ำหนักของโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในโมเลกุลของไขมันหรือน้ำมันนั้น ไขมันหรือน้ำมันที่โมเลกุลประกอบด้วยกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ หรือมีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลน้อยจะมีค่าแซพอนิฟิเคชันสูง ในทางตรงกันข้ามไขมันหรือน้ำมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะให้ค่าแซพอนิฟิเคชันต่ำ

2. ค่าความเป็นกรด (acid value) หมายถึง การสะเทินของจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในไขมัน 1 กรัม กรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นในน้ำมันได้จากการสลายตัวของกลีเซอไรด์ทางเคมีหรือโดยเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งกรดไขมันจะมีความว่องไวในการในการทำปฏิกิริยากว่าโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์

3. ค่าไอโอดีน (iodine value) หมายถึง จำนวนกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซึมโดยน้ำมัน 100 กรัม ค่าไอโอดีนบ่งบอกถึงการเกิดพอลิเมอร์ไรซ์ของน้ำมันพืช โดยถ้าค่าไอโอดีนสูงการเกิดพอลิเมอร์ไรซ์ของน้ำมันพืชก็สูง แต่ถ้าค่าไอโอดีนของน้ำมันพืชต่ำ จะถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสามารถป้องกันการเกิดพอลิเมอร์ไรซ์ของน้ำมันพืชภายในเครื่องยนต์ได้

### 2.3.3. น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว [15-16]

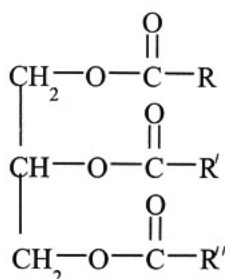


ภาพที่ 2.4 น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว[17]

น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วจัดว่าเป็นของเสียจำพวกหนึ่ง ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มี วิธีการรวบรวมของเสียเพื่อกำจัด หรือทำลายอย่างเหมาะสมบางแห่งได้ มี วิธีการเก็บรวบรวมน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว โดยนำไปกรอง และพอกสี เพื่อนำบรรจุขายใหม่ ในราคาที่ถูกผู้ค้ารายย่อยทั้งในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ และร้านขายอาหารจำพวกทอด เช่น ปาท่องโก๋ ไก่ทอด ก๋วยเตี๋ยว เป็นต้น ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค และเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดโรคมะเร็ง และอาจถึงขั้นยับยั้งการเจริญเติบโตหรือในกรณีที่โรงงานอุตสาหกรรมอาหารทอดกรอบบางแห่งได้ปล่อยน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วลงสู่ที่ดินรกร้างซึ่งเป็นวิธีกำจัดอย่างไม่ถูกวิธี และเป็นผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมน้ำมันพืชประกอบด้วยกรดไขมันประเภทไตรกลีเซอไรด์ เมื่อได้รับความร้อนจากการใช้งานหรือทอดหลายๆ ครั้ง กรดไขมันจะแตกตัวทำให้น้ำมันจะมีกรดไขมันอิสระที่เพิ่มขึ้นมีโมโนกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงเกิดสารที่ออกซิเดชันได้หลายตัว ซึ่งรวมเรียกว่า “สารโพลาร์” หรือ สารมีขั้ว ดังนั้นน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วจึงมีความเป็นโพลาร์ที่มากขึ้น โดยมาตรฐานแล้วนานาชาติ กำหนดให้ความเป็นโพลาร์ ไม่ควรมีค่าเกินร้อยละ 25 นอกจากนี้เมื่อน้ำมันพืชใช้แล้วได้รับความร้อน กรดไขมันต่างๆ นอกจากจะแตกตัวแล้วก็อาจเกิดการรวมตัวกันเป็นพอลิเมอร์ หรือเกิดปฏิกิริยาสร้างสารบางชนิดที่ทำให้กลิ่นรสของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไป น้ำมันอาจจะเหนียวขึ้น ส่งผลให้คุณสมบัติบางอย่างเปลี่ยนแปลงไป อย่างเช่น เป็นควันได้ง่ายขึ้น เนื่องจากน้ำมันเหล่านี้แตกตัวเปลี่ยนสภาพไปบางส่วน ซึ่งทั้งสารโพลาร์ สารพอลิเมอร์ สารเหม็นหืน เหล่านี้ อาจจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภคโดยมีข้อพิสูจน์ แล้วอย่างชัดเจน ได้แก่สารจำพวกกลุ่มที่เรียกว่า สารไดออกซินและสารพีเอเอช ซึ่งสารเหล่านี้ อาจเกิดขึ้นในน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว สารสองกลุ่มนี้ล้วนเป็นสารก่อมะเร็งทั้งสิ้น สารไดออกซินจะเกิดขึ้นได้เมื่อน้ำมันพืชสัมผัสอยู่ในภาวะที่อุณหภูมิสูงโดยใช้เวลาในน้ำมันปรุง

อาหารใช้แล้วยังมีโอกาสที่จะเกิดอนุมูลอิสระมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับพันธะคู่ในน้ำมัน โดยน้ำมันที่มีพันธะคู่จำนวนมาก เช่น น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน น้ำมันดอกคำฝอย น้ำมันถั่วเหลืองที่มีความไม่อิ่มตัวมาก ซึ่งส่งผลให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระในน้ำมันได้มาก ดังนั้นน้ำมันปรุงอาหารที่ผ่านการใช้แล้วจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ ในการทอดอาหารด้วยความร้อนสูงเป็นเวลานาน ส่วนการใช้้ำมันที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงอย่างเช่น น้ำมันมะกอก น้ำมันปาล์ม โอเลอีน น้ำมันถั่วลิสง และน้ำมันงา จะเหมาะสมกับการทอดอาหารโดยใช้ความร้อนสูงมากกว่า การบริโภคสารอนุมูลอิสระเข้าไปบ่อยๆ ย่อมเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด ต้อกระจก ความชรา เป็นต้น

### 2.3.3.1. การนำน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นพลังงานทดแทน [18-20]



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ [21]

น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วมีไตรกลีเซอไรด์ (ดังรูปที่ 2.5) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และมีโมเลกุลของกรดไขมันหลายชนิด เช่น กรดโอเลอิก (C18:1, Oleic Acid) ร้อยละ 52.9 กรดปาล์มมิติก (C16:0, Palmitic Acid) ร้อยละ 20.4 และกรดไลโนเลอิก (C18:2, Linoleic Acid) ร้อยละ 13.5 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชใช้แล้ว ดังนั้นถ้าน้ำมันพืชใช้แล้วอยู่ในภาวะที่เหมาะสมจะสามารถแตกตัวให้เชื้อเพลิงเหลวได้

นอกจากนี้องค์ประกอบที่มีอยู่ในน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วประกอบไปด้วย กรดไขมัน น้ำ สเตอรอยด์ ฟอสฟอลิปิด ยาง กลิ่น และสิ่งแปลกปลอมต่างๆ นอกเหนือไปจากหมู่ไตรกลีเซอไรด์ รวมถึงน้ำมันปรุงอาหารที่ต่างชนิดกันจะมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวที่แตกต่างกัน โดยน้ำมันพืชนั้นจัดเป็นพลังงานสำรองชนิดหนึ่งของโลกที่สามารถผลิตขึ้นเอง ซึ่งสมบัติทางกายภาพและเคมีนั้นมีความใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และน้ำมันพืชนั้นยังไม่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ได้โดยตรง เนื่องจากคุณสมบัติยังไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ เป็นเชื้อเพลิงได้ แต่ก็สามารถนำมาปรับปรุงผ่านกระบวนการต่างๆ ใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ การนำน้ำมันพืชมาใช้

โดยตรง มีการนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนโดยตรง ซึ่งข้อดีของการนำน้ำมันพืชมาใช้โดยตรงนั้นมีข้อดีดังนี้

- มีลักษณะเป็นของเหลว นำมาทดแทนน้ำมันดีเซลได้ โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อให้เป็นของเหลว

- ผลิตได้จากเกษตรกรรม สามารถเพิ่มผลผลิตได้ หากมีปริมาณที่ไม่เพียงพอ

- ปริมาณกำมะถันและสารอะโรมาติกที่ต่ำ ส่งผลให้การปล่อยมลพิษที่ต่ำกว่าการใช้เชื้อเพลิงปกติ

การแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว นำน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วมาผ่านการแตกตัวจากสารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ ไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กในที่อับอากาศ เรียกว่า ไพโรไลซิส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ ประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก กรดคาร์บอนิก และสารประกอบอะโรมาติก ซึ่งวิธีนี้ได้มีการนำมาใช้ 100 กว่าปี แล้วในที่ขาดแคลนน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งปริมาณและองค์ประกอบของน้ำมันที่ได้ จะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และแก๊สตัวกลาง

การใช้น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วกับเครื่องยนต์ดีเซล จากความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงและภาวะขาดแคลนน้ำมันในอนาคต จึงมีความต้องการพยายามหาพลังงานอื่นมาทดแทน เช่น การนำแอลกอฮอล์ หรือพวกแก๊สชีวภาพกับเครื่องยนต์เบนซิน ซึ่งก็นับว่ามีความก้าวหน้าในการพัฒนาพอสมควร แต่ก็ยังหาพลังงานที่ราคาเหมาะสมมาใช้ทดแทนไม่ได้ เนื่องจากมีการพัฒนาให้เครื่องยนต์เหมาะแก่การใช้กับน้ำมันจากปิโตรเลียมมากกว่า ดังนั้นเมื่อนำพลังงานทดแทนเหล่านี้มาใช้ทดแทนจึงเกิดปัญหาข้อขัดข้องทางเทคนิคค่อนข้างมาก ทางเลือกของการผลิตน้ำมันดีเซลที่สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม คือ น้ำมันพืช แต่เนื่องจากน้ำมันพืชเมื่อใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรง จะเกิดปัญหาด้านจุดวาบไฟ และค่าความหนืดซึ่งเป็นปัญหาหลัก ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงด้วยเทคนิควิธีต่างๆ ให้มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับกับน้ำมันดีเซล

**ตารางที่ 2.1** ความยากง่ายของการจัดหาวัตถุดิบน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วหลังอุปโภคบริโภคภายในประเทศ

แหล่งของน้ำมันพืชใช้แล้ว	จำนวน (ล้านลิตร)	ความยากง่ายของการจัดหาวัตถุดิบ
ครัวเรือน	47.2	ยาก
กลุ่มสถานประกอบการ	22.5	ปานกลาง
โรงงานอุตสาหกรรม	3.4	ง่าย
ผู้จำหน่ายของทอดในตลาด	1.3	ยาก

น้ำมันปรุงอาหารที่เราใช้อยู่ในชีวิตประจำวัน มีด้วยกัน 2 ชนิด คือ

1. น้ำมันจากไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันหมู และน้ำมันวัว เป็นต้น ซึ่งมีกรดไขมันอิ่มตัว และโคเลสเตอรอลสูง

2. น้ำมันพืช แบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

2.1 น้ำมันพืชชนิดที่เป็นไขเมื่อนำไปแช่ตู้เย็น หรือถูกอากาศเย็น น้ำมันพืชชนิดนี้จะประกอบไปด้วย กรดไขมันอิ่มตัวผสมอยู่ในปริมาณมาก ได้แก่ น้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันมะพร้าว ซึ่งข้อเสีย คือ ทำให้โคเลสเตอรอลในเลือดสูง เสี่ยงต่อการเกิดโรคหลอดเลือด และหัวใจ แต่ก็มีข้อดีคือ น้ำมันชนิดนี้จะทนความร้อน ความชื้น และออกซิเจน ไม่เหม็นหืนง่าย เหมาะที่จะใช้ทอดอาหารที่ต้องใช้ความร้อนสูงนานๆ เช่น ปลาทั้งตัว ไก่ หมู หรือเนื้อชิ้นใหญ่ๆ

2.2 น้ำมันพืชชนิดที่ไม่เป็นไขเมื่ออยู่ในที่เย็น น้ำมันพืชชนิดนี้ประกอบด้วย ไขมันชนิดไม่อิ่มตัวในปริมาณที่สูง ได้แก่ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันเมล็ดทานตะวัน น้ำมันดอกคำฝอย น้ำมันข้าวโพด น้ำมันฝ้าย ไขมันชนิดนี้ย่อยง่าย ร่างกายสามารถนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ต่างๆ จึงเหมาะสมกับเด็กที่กำลังเจริญเติบโต และยังช่วยลดโคเลสเตอรอลในเลือด ผู้ที่มีปัญหาโคเลสเตอรอลในเลือดสูงจึงควรเลือกใช้น้ำมันชนิดนี้ แต่ข้อเสียของน้ำมันชนิดนี้คือ ไม่ค่อยเสถียร จึงแตกตัวให้สาร polar ซึ่งทำให้น้ำมันเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล มีกลิ่นเหม็นหืน ซึ่งสาร polar นี้ ทำให้เป็นมะเร็งในกระเพาะอาหาร ทำให้ตับเสื่อมได้ ใช้ทอดอาหารได้ไม่นาน จึงเหมาะกับที่จะใช้ผัดอาหาร หรือทอดเนื้อชนิดบาง ๆ เช่น หมูแฮม หมูเบคอน

## การเสื่อมสภาพของน้ำมันจากการทอดซ้ำ [22]

อาจดูได้ด้วยสายตา น้ำมันทอดซ้ำที่เสื่อมคุณภาพ จะมีลักษณะ หนืดข้นผิดปกติ มีสีดำ เกิดฟองมาก มีกลิ่นเหม็นไหม้ เกิดควันมากขณะทอด น้ำมันที่ใช้ปรุงอาหารจะเสื่อมคุณภาพ เมื่อถูกความร้อนสูง และมีความชื้น จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดสาร polar (polar compounds) เครื่องปรุงต่างๆ และเกลือ ยิ่งเป็นการเร่งให้เกิดสาร polar เพิ่มขึ้น น้ำมันปรุงอาหารใหม่ จะมีสาร polar อยู่ระหว่าง 3 - 8 %

## ผลกระทบต่อสุขภาพของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วทอดซ้ำ

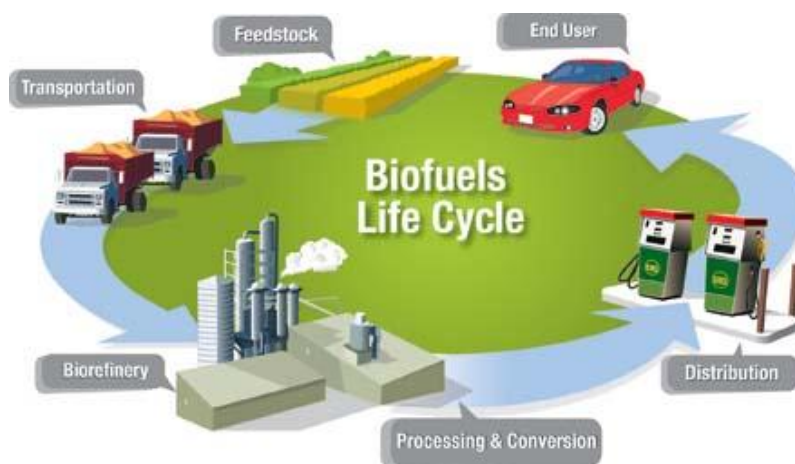
การใช้น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วซ้ำทำให้เกิดการเจริญเติบโตลดลง ตับ และไตมีขนาดใหญ่ มีการสะสมไขมันในตับ การหลั่งน้ำย่อยทำลายสารพิษในกระเพาะอาหารเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ไขมันที่ถูก oxidized ปริมาณสูงอาจทำให้ lipoprotein ชนิด LDL มีโอกาสเกิดอนุมูลอิสระมากขึ้น จึงมีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจ และหลอดเลือดได้ ส่วนไอระเหยจกน้ำมันทอดอาหาร หากสูดดมเป็นระยะเวลานานอาจมีอันตรายต่อสุขภาพ เนื่องจากพบความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโรคมะเร็งที่ปอด

จากการศึกษาพบว่า มีกลุ่มสารก่อมะเร็งเกิดขึ้นในน้ำมันทอดซ้ำ ได้แก่ Cyclic fatty acids, Aldehydic triglycerides, Triglyceride hydroperoxides, Aldehydes และ Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) มีการทดลองในต่างประเทศเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมันทอดเฟรนช์ ฟรายจากน้ำมันพืชชนิดต่างๆ พบว่า เฟรนช์ฟรายจะดูดซับน้ำมันโดยเฉลี่ยประมาณ 10% และพบว่าปริมาณสาร polar (total polar material, TPM) ที่พบในน้ำมันที่ใช้ทอดจะสะท้อนถึงปริมาณสาร polar ในน้ำมันที่ถูกดูดซับในอาหาร เมื่อคำนึงถึงปริมาณสาร polar ในน้ำมันที่ใช้ทอด จากการสำรวจพบว่าหากเป็นการบริโภคในบ้านเรือนการใช้ใช้น้ำมันทอดซ้ำ 2 - 3 ครั้งถือว่าค่อนข้างปลอดภัย เนื่องจากไม่มีน้ำมันพืชชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการสำรวจมีปริมาณสาร polar เกินขีดจำกัด ที่มีอันตรายต่อสุขภาพ (25 - 27 %) ส่วนการบริโภคในร้านอาหาร และอาหารจานด่วนทั้งหลาย พบว่า ค่อนข้างอันตรายต่อสุขภาพ เนื่องจากพบปริมาณสาร polar มากกว่า 25 % ในตัวอย่างอาหารค่อนข้างมาก

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่า การทานอาหารที่ประกอบด้วยสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidants) ปริมาณมากร่วมกับอาหารประเภททอด จะช่วยป้องกันผลเสียที่เกิดจากสาร polar ได้ เช่น วิตามินอีสามารถช่วยลดการเกิดปฏิกิริยา oxidized ของ lipoprotein ชนิด LDL ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจ และหลอดเลือดได้ เป็นต้น

ดังนั้น การรับประทานอาหารที่มีการใช้น้ำมันทอดซ้ำ หรือในน้ำมันที่ใช้ทอดมีปริมาณสาร polar เกินกว่า 25 % จะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย อาทิเช่น ทำให้เกิดโรคหัวใจ ทำให้เกิดโรคมะเร็งปอด มะเร็งตับ และมะเร็งกระเพาะปัสสาวะ เป็นต้น

## 2.4 เชื้อเพลิงชีวภาพ [23-25]



ภาพที่ 2.6 วัฏจักรของเชื้อเพลิงชีวภาพ [26]

เชื้อเพลิงชีวภาพ (biofuel) คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากชีวมวล เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่กักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์โดยการสังเคราะห์แสง พืชที่มีคลอโรฟิลล์จะดูดพลังงานจากแสงอาทิตย์แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมี เพื่อให้ประโยชน์ในการเจริญเติบโตของพืชด้วยการสร้างอาหารจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รูปที่ 2.6 แสดงวัฏจักรของเชื้อเพลิงชีวภาพ ชีวมวลเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ไม่มีวันหมดไปแตกต่างจากเชื้อเพลิงจากฟอสซิล เพราะวงจรการผลิตชีวมวลสามารถเกิดขึ้นทดแทนได้ในเวลาสั้น ต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี ดังนั้นไม่ว่าจะนำพืชไปทำอาหารหรือพลังงานก็ตาม ถ้าปริมาณการใช้สมดุลกับการเกิดชีวมวลใหม่ จะทำให้มีชีวมวลใช้ไปตลอด นอกจากนี้การใช้ชีวมวลที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ ทำให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้ และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย ข้อดีของเชื้อเพลิงชีวภาพคือมีหลายสถานะ เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส จึงสะดวกในการใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ต่างๆ และที่สำคัญคือไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก เพราะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณแก๊สที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลชนิดนั้น เชื้อเพลิงชีวภาพมี 3 รูปแบบ

1. ของแข็ง ได้แก่ ไม้ ชี้อ้อย ฟางข้าว ชังข้าวโพด ชานอ้อย มูลสัตว์ ถ่าน เขา เปลือกสัตว์ หรือเปลือกพืช เช่น แกลบข้าว ฝ้าย ถังลึง เป็นต้น เนื้อไม้ประกอบด้วยสารประกอบต่างๆ โดยมี เซลลูโลส (Cellulose) เป็นสารประกอบหลักประมาณร้อยละ 50 สารประกอบแต่ละชนิดจะให้ความร้อนแตกต่างกัน ไม้ที่มีความชื้นต่ำจะให้ค่าความร้อนสูงกว่าไม้ที่มีความชื้นสูง จะเห็นได้ว่าการนำไม้สดไปใช้เป็นฟืนโดยตรงจะให้ความร้อนหรือค่าความร้อนที่ต่ำ

2. เชื้อเพลิงชีวภาพที่อยู่ในรูปของเหลวแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่

- แอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์มีสถานะเป็นของเหลวระเหยง่าย แอลกอฮอล์ที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมี 2 ชนิดคือ เอทานอล และเมทานอล
- น้ำมันจากพืชและสัตว์ ได้แก่ น้ำมันพืชบริสุทธิ์ น้ำมันพืชใช้แล้ว (used vegetable oils) ไชสัตว์ และไบโอดีเซล (ที่ผลิตจากน้ำมันพืช ไชสัตว์ และน้ำมันพืชใช้แล้วโดยผ่านกรรมวิธีทางเคมี)
- น้ำมันจากขยะ น้ำมันซึ่งมีคุณลักษณะทางเคมีและกายภาพคล้ายคลึงกับปิโตรเลียม สามารถสกัดจากขยะชีวมวลมาใช้งานได้

3. แก๊สชีวภาพ (biogas) ส่วนใหญ่ คือ แก๊สมีเทนที่ได้จากการหมักมูลสัตว์หรือของเสียจากโรงเลี้ยงสัตว์ เช่น สุกร โค กระบือ โดยรวบรวมของเสียเหล่านี้ใส่ในถังหมักที่มีเชื้อจุลินทรีย์เมื่อทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาในที่ไม่มีอากาศ จุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ในของเสียและเกิดแก๊สมีเทนขึ้นซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการปรุงอาหาร หรือกระบวนการอื่นที่ต้องการใช้ความร้อน ส่วนของเหลือที่สะสมจากถังหมักยังสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยได้

## 2.5 เทคโนโลยีในการผลิตเชื้อเพลิงเหลว

1. การสันดาป (combustion technology) เมื่อนำสารชีวมวลมาเผาที่อุณหภูมิสูง จะได้ความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดสารชีวมวล ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการรวมตัวกันของเชื้อเพลิงออกซิเจนอย่างรวดเร็วพร้อมเกิดการลุกไหม้และคายความร้อน ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่ จะไม่ใช่ ออกซิเจนล้วนๆ แต่จะใช้อากาศแทนเนื่องจากอากาศมีออกซิเจนอยู่ 21% โดยปริมาณ หรือ 23% โดยน้ำหนัก ความร้อนที่ได้นำไปใช้ต้มน้ำเพื่อผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า ตัวอย่างสารชีวมวลประเภทนี้คือ เศษวัสดุทางการเกษตร และเศษไม้

2. การผลิตแก๊ส (gasification technology) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่มีอยู่ในสารชีวมวล เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ Thermal Conversion เพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือสาร



ชีวมวลให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง เรียกว่าก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีองค์ประกอบของแก๊ส คือแก๊สมีเทน แก๊สไฮโดรเจน และ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งสามารถนำไปใช้กับกังหันแก๊สได้

3. การหมัก (anaerobic digestion technology) เป็นการผลิตแก๊สจากชีวมวลทางเคมี ด้วยการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยเชื้อแบคทีเรียในที่ที่ไม่มีอากาศหรือไม่มีออกซิเจน สารชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแตกตัวเกิดแก๊สชีวภาพ ที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้าเป็นหลัก

4. การผลิตเชื้อเพลิงเหลว (liquidification technology) คือการนำสารชีวมวลไปผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปจากเป็นของเหลวโดยใช้ความร้อน ซึ่งสามารถเปลี่ยนให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงน้ำมันปิโตรเลียมที่ใช้งาน มีกระบวนการที่สามารถใช้ผลิตดังนี้

1. กระบวนการทางชีวภาพ ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ คือแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชผลทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ให้เป็นเอทานอล เพื่อนำมาผสมกับน้ำมันเบนซินในอัตราส่วนต่างๆ หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน ซึ่งต้องใช้เวลาในกระบวนการผลิตนาน

2. กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยทำการสกัดน้ำมันออกจากพืชน้ำมัน จากนั้นนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านปฏิกิริยา การทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกับแอลกอฮอล์เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล กระบวนการนี้จะมีเกิดของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการ

3. กระบวนการใช้ความร้อนสูง เช่น กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) เมื่อสารชีวมวลได้รับความร้อนสูงในสภาพไร้ออกซิเจน จะเกิดการสลายตัวเกิดเป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวและแก๊สผสมกัน ซึ่งกระบวนการที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยตรง ใช้เวลาน้อยและไม่เกิดของเสีย โดยกระบวนการในการไพโรไลซิสสารชีวมวลแบ่งออกเป็น

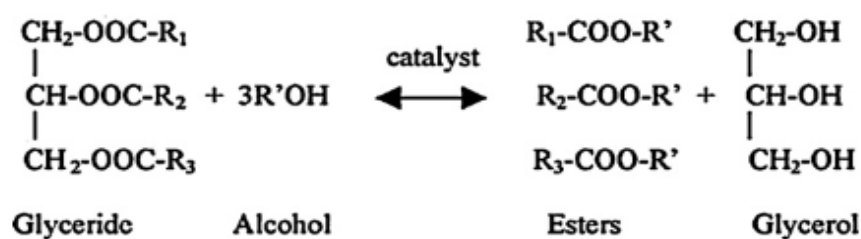
5. การผลิตไฟฟ้าโดยใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง โรงไฟฟ้าชีวมวล มี 2 ระบบซึ่งส่วนมากในโลกนี้มักจะใช้ระบบการเผาไหม้โดยตรง (direct-fired) โดยการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเผาไหม้โดยตรงในหม้อไอน้ำ (boiler) และถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นให้แก่ น้ำในหม้อไอน้ำจนกลายเป็นไอน้ำที่ร้อนและมีความดันสูง ซึ่งไอน้ำนี้จะถูกนำไปปั่นกังหันที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ได้กระแสไฟฟ้าออกมา นอกเหนือจากการผลิตไฟฟ้าแล้ว ในโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น โรงงานน้ำตาล โรงงานผลิตกระดาษ ก็สามารถใช้ประโยชน์จากไอน้ำในขั้นตอนการผลิตของโรงงานด้วย ซึ่งการผลิตไอน้ำและไฟฟ้าวร่วมกันนี้เรียกว่าระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม (cogeneration) ซึ่งเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการใช้เชื้อเพลิงสูง

6. เตาแก๊สชีวมวล สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับการหุงต้มอาหารในครัวเรือน โดยใช้เศษไม้และเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง โดยมีหลักการทำงานแบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวล (gasifier) แบบอากาศไหลขึ้น (updraft gasifier) เป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงในในที่จำกัดปริมาณอากาศให้เกิดความร้อนบางส่วนแล้วไปเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องอื่นๆ เพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิง ที่สามารถติดไฟได้ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และแก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) เป็นต้น

### 2.5.1. เทคโนโลยีในการผลิตเชื้อเพลิงดีเซล [27]

กระบวนการที่นิยมในการผลิตเชื้อเพลิงดีเซลในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

2.5.1.1. กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมสูงที่สุดในการนำมาผลิตเชื้อเพลิงดีเซลในปัจจุบัน เป็นกระบวนการที่ต้องใช้แอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้นในการผลิต โดยจะควบคุมให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นภายใต้ภาวะบรรยากาศ อุณหภูมิประมาณ 37-87 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจากกระบวนการจะแบ่งเป็น 2 ชั้น ชั้นแรกคือฟัทตี้เอซิกเมทิลเอสเตอร์ (FAME) และชั้นที่สองคือ กลีเซอรอล ซึ่งจะถูกปั่นเปื้อนด้วยน้ำ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว กรดไขมันอิสระ ซึ่งยากในการกำจัด กระบวนการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 2.7



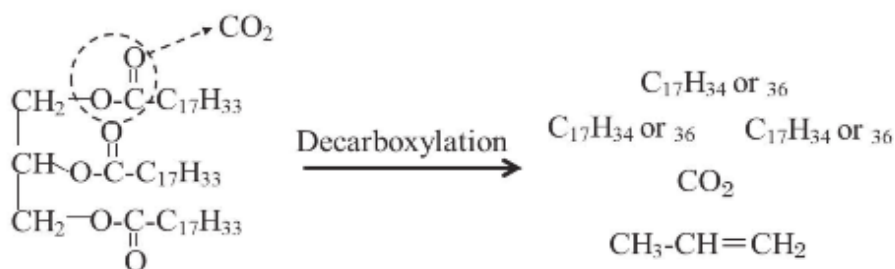
ภาพที่ 2.7 การเกิดกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน [28]

2.5.1.2. กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ ไฮโดรเจนร่วม (hydrocracking) คือการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการที่ใช้บทบาทในด้านของคุณสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาและไฮโดรเจนที่เติมลงไปทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีแขนแตกแขนงจำนวนมากซึ่งเป็นพวกพาราฟิน และแนฟทีน

2.5.1.3. กระบวนการไพโรไลซิสเชิงเร่ง (catalytic pyrolysis reaction) เป็นกระบวนการในการแตกสลายโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ความร้อนสูง โดยแบ่งออกเป็น

1. กระบวนการไพโรไลซิสของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน (thermal cracking) คือการแตกตัวด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงหากมีการควบคุมให้เกิดการแตกตัวอย่างพอดีจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ เนื่องจากถ้าให้ความร้อนที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการแตกตัวได้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กเกินไปจนอยู่ในสถานะที่เป็นแก๊ส ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการและนำมาใช้ประโยชน์ไม่ได้

2. กระบวนการไพโรไลซิสของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic pyrolysis cracking) คือการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามามีบทบาทในการช่วยแตกย่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงในสภาพไร้อากาศด้วยกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation reaction) ให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสม เพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ตามต้องการ โดยเชื้อเพลิงเหลวที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้งานดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การเกิดกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน [27]

## 2.6 ปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน [29]

ปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนแบ่งออกเป็น 3 ชนิด

### 2.6.1 กระบวนการแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน

การแตกตัวด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้มีขนาดโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเล็กลง และหากมีการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงได้ดี จะทำให้การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงที่ต้องการได้มากที่สุด แต่ถ้าหากมีการให้ความร้อนมากเกินไป อาจทำให้การแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมาก

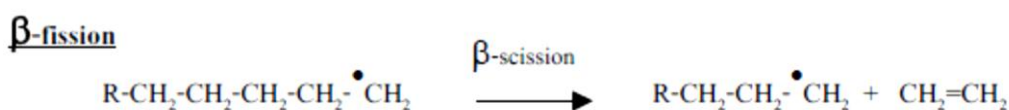
เกินไป จนได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนสถานะแก๊ส  $C_1 - C_4$  ซึ่งไม่ต้องการและไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ทั้งนี้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนส่วนที่มีแซนโอเลฟิน (olefin) และไดโอเลฟิน (diolefin) จะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาซึ่งอาจจะทำปฏิกิริยากันเองได้

กระบวนการแตกตัวโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (free radical) แบบห่วงโซ่ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

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



2. ขั้นการเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (propagation step) เกิดจากอนุมูลอิสระทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง เกิดการเปลี่ยนรูปของไอโซเมอร์และแตกพันธะเป็นโมเลกุลที่สายโซ่สั้นลง พร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้น นอกจากนี้อนุมูลอิสระนั้นอาจทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นเกิดเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้นอีก ได้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่สายโซ่สั้นลงต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ดังสมการ 2.2



**Chain transfer**



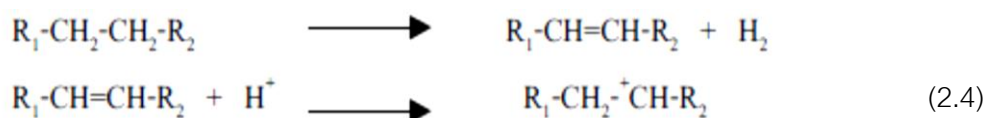
3. ขั้นหยุดปฏิกิริยา (termination step) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากันเองเพื่อหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่อง เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยอาจเกิดเป็นโมเลกุลใหม่ โมเลกุลเดี่ยวหรือเกิดเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล ดังสมการ 2.3



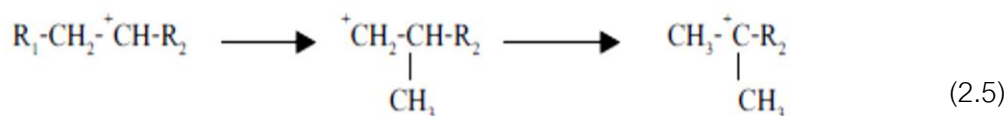
### 2.6.2 กระบวนการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking)

เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการแตกพันธะสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ประโยชน์ตามต้องการได้ กลไกของการแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย

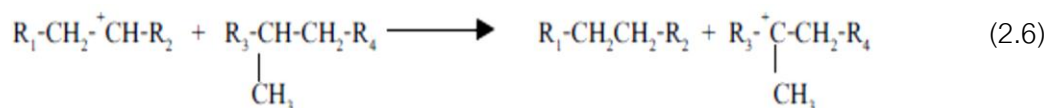
1. การเกิดไฮโดรจีเนชัน (dehydrogenation) และปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนเนียมไอออน (carbonium ion) เกิดจากการที่โมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรด์ไอออนที่มีประจุลบให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด ทำให้คาร์บอนเนียมไอออนมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้าโดยคาร์บอนเนียมไอออนที่เกิดขึ้นจะมีเสถียรภาพแตกต่างกันตามโครงสร้างของไอออนโดย tertiary ion จะมีเสถียรภาพมากกว่า secondary ion และ primary ion ดังสมการ 2.4



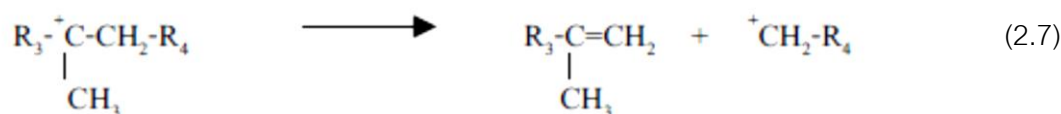
2. การเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลคาร์บอนเนียมไอออน เกิดจากการที่โครงสร้างของคาร์บอนเนียมไอออนมีความเสถียรแตกต่างกันตามโครงสร้างของไอออน ดังสมการ 2.5



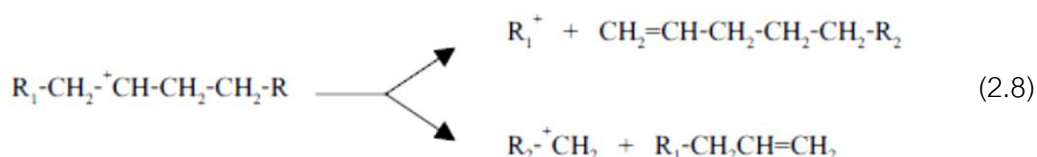
และเกิดการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ (hydride transfer) โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนเนียมไอออนกับโมเลกุลของสายโซ่สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังสมการ 2.6



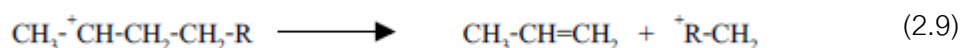
สำหรับคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยา หรือการแตกตัวที่ตำแหน่ง  $\beta$  ที่นับจากจุดที่มีประจุบวก ซึ่งจะให้สารประกอบโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดเล็กลง โดยมักจะเป็น primary carbonium ion ดังสมการ 2.7



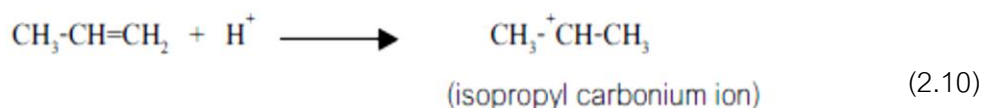
ในบางกรณีคาร์บอนเนียมไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้มากกว่า 1 รูปแบบ เช่น ในตัวอย่างของ secondary carbonium ion ดังสมการ 2.8



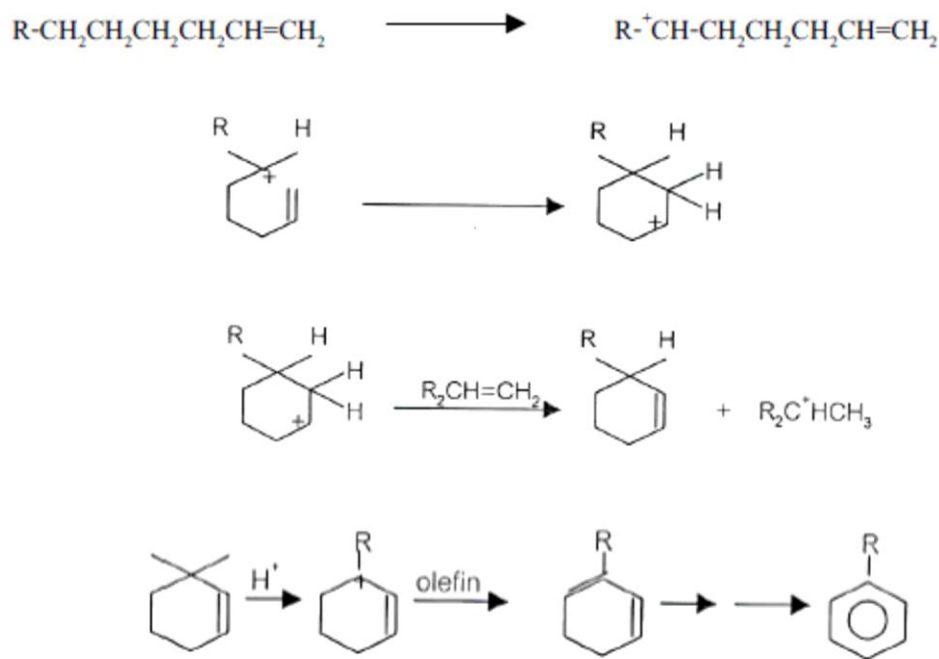
ถ้า  $\text{R}_1 = \text{H}$  การเกิด จะสามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว ดังสมการ 2.9



โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือโพर्फินจะเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอนและอยู่ในรูปคาร์บอนเนียมไอออนซึ่งจะไม่สามารถเกิด  $\beta$ -scission ต่อไปได้ ดังสมการ 2.10



Isopropyl carbonium ion จะเกิดปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายไฮโดรด์กับโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพर्फิน หรืออาจเกิดการสูญเสียโปรตอน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพर्फิน ในการเกิดวงแหวนแอโรแมติกจากปฏิกิริยา dehydrocyclization โดยโอเลฟินเกิดเป็นคาร์บอนเนียมไอออนแล้วเกิดปฏิกิริยา  $\beta$ -scission ได้สารประกอบ olefin carbonium ion ที่มีลักษณะเป็นวงแหวน จากนั้นเกิดปฏิกิริยากับโอเลฟิน เกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ไอออนจากบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะได้ allylic carbonium ion ที่มีเสถียรภาพและเกิดการรับโปรตอนจาก cyclohexadiene ซึ่งในขั้นสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะโรมาติก ดังสมการ 2.11



(2.11)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกพันธะโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยแก๊สที่มีโอเลฟินสูง องค์ประกอบของวงเบนซีนที่มีค่าออกเทนสูงเนื่องจากมีสารจำพวกอะโรแมติกและโอเลฟินมาก องค์ประกอบของน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนต่ำ กากน้ำมันชนิดใส และโค้ก (coke) ที่เกาะบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้พื้นที่ผิววูพรุนและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงจนเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

### 2.6.3 กระบวนการแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (hydrocracking)

การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการที่รวมระหว่างการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา และการเติมแก๊สไฮโดรเจน ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีกิ่งจำนวนมาก เกิดเป็นพาราฟินและแนฟทีน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นประเภท 2 หน้าที่ (dual function) ช่วยในการแตกพันธะคาร์บอน - คาร์บอนของโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและช่วยเติมแก๊สไฮโดรเจน จึงมักประกอบด้วยสารจำพวกซิลิกา-อะลูมินาที่สามารถช่วยในการแตกพันธะคาร์บอนได้พร้อมๆ กับการเติมแก๊สไฮโดรเจน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเริ่มต้นจากการเกิดโอเลฟินขึ้นที่พื้นผิวส่วนที่เป็นโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยโอเลฟินไปทำให้เกิดคาร์บอนเนียมไฮดรอนตรงบริเวณที่เป็นกรดบนพื้นผิวของ

ตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นจะเกิดการแตกตัวบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา การเติมแก๊สไฮโดรเจนทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นพันธะอิ่มตัว และการเติมแก๊สไฮโดรเจนบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกำจัดไคบอนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วย

กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมนี้เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ทำให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์สูง จำเป็นต้องมีการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิให้เหมาะสม เพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดไคคและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาได้ หรือทำให้เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความเสียหายรวมทั้งไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

## 2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) [30-39]

ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารที่ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้เข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น เนื่องจากช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา (activation Energy) ให้ต่ำลง ทำให้โมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าหรือเท่ากับพลังงานก่อกัมมันต์มีจำนวนมากขึ้น จึงเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เร็วขึ้น ข้อดีของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมในกระบวนการ คือ

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

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

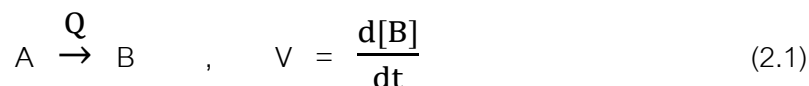
- ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในวัฏภาคเดียวกับสารตั้งต้น มีข้อดีคือประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูง และสามารถเลือกให้เร่งปฏิกิริยาที่ต้องการได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นที่เหลือและผลิตภัณฑ์ยาก และอายุการใช้งานสั้นกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์

- ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์ (heterogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในวัฏภาคแตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยา มีข้อดีคือใช้ในภาวะที่มีอุณหภูมิหรือความดันสูงได้ สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นที่เหลือและผลิตภัณฑ์ได้ง่าย มีอายุการใช้งานนาน



### 2.7.1 เทอมที่เกี่ยวข้องกับการเร่งปฏิกิริยา

1. ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic efficiency) ในปฏิกิริยาเปลี่ยนสารตั้งต้น A ไปเป็นผลิตภัณฑ์ B โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Q ด้วยอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา V โดยค่า V หาได้จากสมการที่ (2.1)

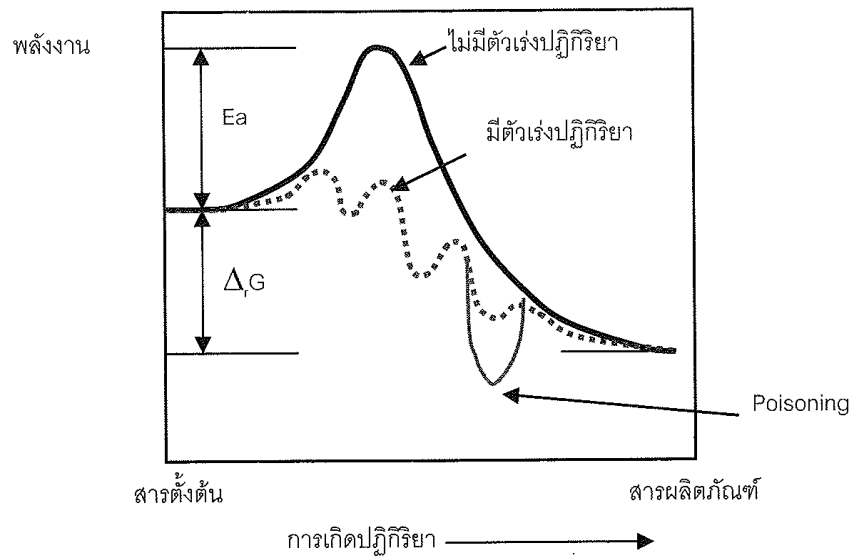


ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถสังเกตได้โดยตรงจากค่าความถี่ผันเวียน (Turnover Frequency) ซึ่งแสดงโดยค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งกัมมันต์ คือ อัตราเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาต่อหน่วยเวลา ค่าความถี่ผันเวียน แทนด้วย N หาได้จากสมการที่ (2.2) จากอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา V ต่อความเข้มข้นของสาร  $C_A$  ซึ่งในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์สามารถแทนด้วยค่าพื้นที่กัมมันต์ได้

$$N = \frac{V}{C_A} \quad (2.2)$$

2. วัฏจักรของการเร่งปฏิกิริยา (catalytic cycle) หลักของการเร่งปฏิกิริยา คือ การที่สารตั้งต้นถูกเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ และได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ วัฏจักรของการเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยกลไกปฏิกิริยา (reaction mechanism) ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นไปเป็นสารมัธยันตร์ (intermediates) และผลิตภัณฑ์ โดยอาจมีการเปลี่ยนแปลงของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย และเมื่อวัฏจักรของปฏิกิริยาครบรอบแล้วจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับคืนสู่รูปเดิมหรือปริมาณเท่ากับตอนเริ่มต้น

3. การเปลี่ยนแปลงพลังงาน (energetics) ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้โดยการเปลี่ยนวิถีของปฏิกิริยา (chemical Path) โดยวิถีใหม่จะมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกิบส์ (gibbs energy of activation,  $\Delta G$ ) ต่ำกว่าวิถีเดิม ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.9 พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยา [40]

ผลิตภัณฑ์ต้องมีเสถียรภาพในเชิงเทอร์โมไดนามิกส์ ถ้าวิถีใหม่ที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์มีพลังงานต่ำกว่าวิถีของผลิตภัณฑ์ปกติ จะเรียกว่าเกิดพอยซันนิง (poisoning) จะทำให้วัฏจักรของปฏิกิริยาถูกทำลาย และไม่เกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ พอยซันนิงเป็นสาเหตุหนึ่งของการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

4. กัมมันตภาพ (activity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อเข้าสู่สมดุล เป็นการวัดเชิงปริมาณว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้มากเท่าใดในการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ โดยอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะขึ้นกับตัวแปรต่างๆ เช่น ความดัน อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์

การหำร้อยละกัมมันตภาพแบบที่ง่ายที่สุดทำได้โดยหาผลต่างของปริมาณสารตั้งต้นที่เข้าและออกจากระบบ (input reactant – output reactant) เทียบกับปริมาณสารตั้งต้นที่ใส่เข้าไป ดังสมการที่ (2.3)

$$\% \text{ Activity} = \frac{(\text{Input Reactant} - \text{Output Reactant}) * 100}{\text{Input Reactant}} \quad (2.3)$$

5. สัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา (selectivity) คือ ความสามารถในการเลือกเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการโดยเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง (side reaction) น้อยที่สุด สัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยาจะขึ้นกับตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ความดัน อุณหภูมิ

องค์ประกอบของสารแต่ละตัว และการเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยา ดังสมการที่ (2.4) แสดงการหาสัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา คือ สัดส่วนของปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิด (desired reaction) ต่อปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งหมด (all reactions)

$$\% \text{ Selectivity} = \frac{(\text{Desired reaction}) * 100}{\text{All Reactions}} \quad (2.4)$$

6. อายุการใช้งาน (lifetime) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีต้องมีอายุการใช้งานนาน สามารถใช้ในการเร่งปฏิกิริยาได้หลายรอบโดยไม่เสื่อมสภาพ ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเร่งปฏิกิริยาได้หลายปฏิกิริยาและปฏิกิริยาข้างเคียงบางปฏิกิริยาอาจทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้อีกต่อไป กล่าวคือ เปลี่ยนเป็นสารที่หยุดกัมมันต์ (inactive substance) หรือเสื่อมสภาพ (deactivation) จึงต้องคำนึงถึงการเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยา

7. การทำให้คืนสภาพ (regeneration) คือ การนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เสื่อมสภาพแล้ว หลังจากการใช้งาน มาทำให้กลับไปอยู่ในสภาพที่ว่องไวและใช้งานได้เหมือนเดิม

8. ตัวยับยั้ง (inhibitor) คือ สารที่ทำให้อัตราของปฏิกิริยาเกิดช้าลง ตัวยับยั้งปฏิกิริยาที่แข็งแรงจะเกิดพันธะกับตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้สารตั้งต้นไม่สามารถเกิดพันธะกับตัวเร่งปฏิกิริยาได้อีกต่อไป

### 2.7.2 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

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

**พื้นที่ผิว (surface area)** ของตัวเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญมาก เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การเพิ่มพื้นที่ผิวทำได้ด้วยการลดขนาดของวัสดุให้เล็กลงจนเป็นผงละเอียด แต่วิธีนี้ทำได้ค่อนข้างยาก วิธีเพิ่มพื้นที่ผิวที่ดีที่สุดจึงได้แก่การทำวัสดุให้พรุนโดยทำให้เกิดโพรงเล็กๆ จำนวนมาก

**ขนาดและจำนวนรูพรุน (size and number of pores)** สามารถบอกปริมาณพื้นที่ผิวภายในของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวภายในสูงจะมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่อย่างหนาแน่น ซึ่งจะทำให้การกระจายตัวของตำแหน่งกัมมันต์ (active site) สูง และขนาดของรูพรุนที่เลือกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับโมเลกุลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่

ต้องการ จึงทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากตำแหน่งกัมมันต์ได้ดีที่สุด เนื่องจากขนาดของโพรงของตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีความสำคัญต่อความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขนาดของโพรงแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ

1. โพรงชนิดแมคโครพอร์ (macropores) เป็นกลุ่มที่มีขนาดของโพรงใหญ่กว่า 50 nm หรือมีรัศมีเฉลี่ยของโพรงใหญ่กว่า 25 nm
2. โพรงชนิดมีโซพอร์ (mesopores) เป็นกลุ่มที่มีขนาดของโพรงระหว่าง 2 และ 50 nm หรือมีรัศมีเฉลี่ยของโพรงระหว่าง 1 และ 25 nm
3. โพรงชนิดไมโครพอร์ (micropores) หรือโพรงระดับอะตอม เป็นกลุ่มที่มีขนาดของโพรงเล็กกว่า 2 nm หรือมีรัศมีเฉลี่ยของโพรงน้อยกว่า 1 nm

### 2.7.3 การดูดซับและการคายซับ

การดูดซับ (adsorption) และการคายซับ (desorption) เป็นขั้นตอนที่สำคัญของการเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ลักษณะที่สำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ มีพื้นผิวที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับของตัวทำปฏิกิริยา การดูดซับ คือ การเกิดพันธะเคมีระหว่าง ตัวดูดซับ (adsorbent) กับ ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) บนตำแหน่งกัมมันต์ (active site) เพื่อให้โมเลกุลเหล่านั้นเกิดปฏิกิริยาต่อไป การคายซับ คือ การแตกออกของพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ทำให้ได้ตำแหน่งกัมมันต์กลับคืนมา การดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

- การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

การดูดซับทางกายภาพเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (vander waals forces) จึงมีค่าความร้อนของการดูดซับต่ำ (น้อยกว่า 25 กิโลจูลต่อโมล) เป็นกระบวนการคายความร้อน ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์ และไม่มีการแตกพันธะ ปฏิกิริยาจึงสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเมื่อโมเลกุลเคลื่อนที่มาถึงผิวหน้าตัวดูดซับ และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ทำให้สามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่าย

- การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption)

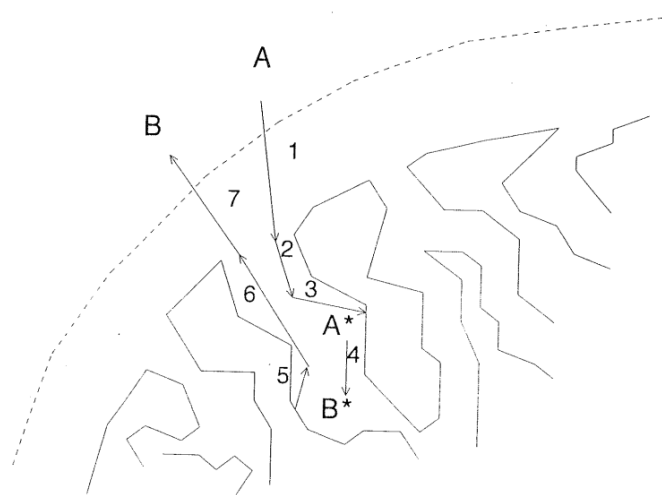
การดูดซับทางเคมีอย่างง่ายเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) หรือโมโนเลเยอร์ (mono layer) โดยตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมสร้างเป็นสารประกอบใหม่ขึ้นด้วยพันธะเคมีที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 60-

85 กิโลจูลต่อโมล ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำได้ยาก ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ตารางที่ 2.2 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 25 กิโลจูลต่อโมล	60-85 กิโลจูลต่อโมล
อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	อุณหภูมิต่ำ ประมาณจุดเดือดของตัวถูกดูดซับ	โดยทั่วไปอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของตัวถูกดูดซับ
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนมากผันกลับไม่ได้
อัตราเร็ว พลังงานกระตุ้น	เร็วมาก ไม่มีการกระตุ้น	บางครั้งช้า ต้องการการกระตุ้น
รูปแบบของการดูดซับ	หลายชั้น ไม่เฉพาะเจาะจง	ชั้นเดียว เฉพาะเจาะจง
ผลของความดัน	มีผลมาก	มีผลน้อย

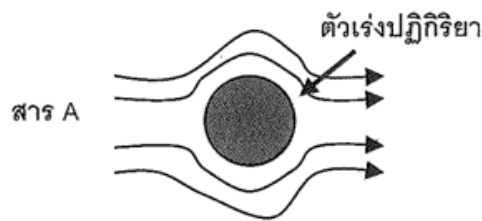
#### 2.7.4 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในปฏิกิริยาวีรัพันธ์



ภาพที่ 2.10 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาวีรัพันธ์ (\*: active site) [32]

ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาวิวิพันธุ์จากสารตั้งต้น A เป็นผลิตภัณฑ์ B บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา 7 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแพร่ของสารตั้งต้นจากภายนอก (external diffusion) เป็นการแพร่ของสารตั้งต้น A จากกระแสของไหลผ่านผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังชั้นขอบเขต (boundary layer) ที่ล้อมรอบตัวเร่งปฏิกิริยา ดังภาพที่ 2.10 ขั้นตอนนี้ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี



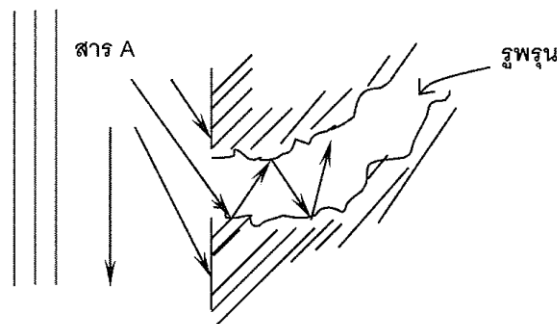
ภาพที่ 2.11 การแพร่จากภายนอกสารตั้งต้น [30]

จากรูปสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.5)

$$k_{\text{exit. diff.}} = k_g S_{\text{exit}} \quad (2.5)$$

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

2. การแพร่ของสารตั้งต้นเข้าไปภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (internal pore diffusion) เป็นการแพร่ของสารตั้งต้น A จากผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านเข้าไปภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังภาพที่ 2.11 เนื่องจากรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดและรูปร่างที่ไม่แน่นอน ทำให้การแพร่ในขั้นตอนนี้มีการชนกัน ทั้งการชนกันระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น A และการชนกับผนังของรูพรุน



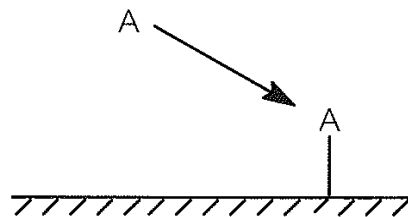
ภาพที่ 2.12 การแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา [30]

ค่าคงตัวของกาแพร่ภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา หาได้จากสมการที่ (2.6)

$$k_{\text{int. diff.}} = k_s S_{\text{int}} \eta \quad (2.6)$$

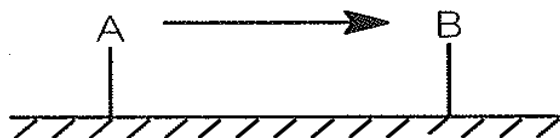
เมื่อ	$k_s$	คือ ค่าคงตัวของกาแพร่ต่อหน่วยของพื้นที่ผิว
	$k_{\text{int. diff.}}$	คือ ค่าคงตัวของกาแพร่ภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (internal diffusion coefficient)
	$S_{\text{int}}$	คือ พื้นที่ผิวภายในของอนุภาคต่อปริมาตรของอนุภาค
	$\eta$	คือ ประสิทธิภาพของการแพร่ (diffusion effectiveness)

3. การดูดซับ (adsorption) เป็นการดูดซับของสารตั้งต้น A ไปยังผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ในการเร่งปฏิกิริยาจะเป็นการดูดซับทางเคมีเสมอ คือ เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น A ในกรณีนี้เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) กับผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง ในกรณีนี้เรียกว่าตัวดูดซับ (adsorbent) ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.12 การดูดซับนี้ทำให้เกิดการจับติดของสารตั้งต้นเป็นชั้นเดียวที่ผิวนำของตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 2.13 การดูดซับทางเคมีของสาร A บนผิวนำของตัวเร่งปฏิกิริยา [30]

4. ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ขั้นตอนนี้ปฏิกิริยาเกิดที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โมเลกุลของสารตั้งต้น A เกิดปฏิกิริยาเคมีไปเป็นผลิตภัณฑ์ B ที่ตำแหน่งซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา หรือบริเวณที่เกิดการเร่งปฏิกิริยา (active sites) ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.14 การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจากโมเลกุล A ไปเป็น B [30]

5. การคายซับ (desorption) ขั้นตอนนี้โมเลกุลของผลิตภัณฑ์ B จะเกิดการคายหรือหลุดออกจากผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการสิ้นสุดของปฏิกิริยาเป็นการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีขั้นตอนนี้สุดท้าย

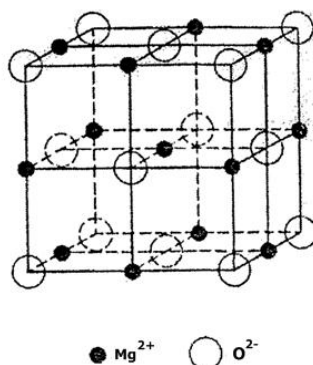
6. การแพร่ของผลิตภัณฑ์ออกจากภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นการแพร่ของผลิตภัณฑ์ B ผ่านรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยากลับไปสู่ผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้าปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 4 เกิดไม่สมบูรณ์ ในขั้นตอนนี้ก็จะมีสารตั้งต้น A แพร่ออกมาด้วย

7. การแพร่ของผลิตภัณฑ์ B จากผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังชั้นขอบเขตที่ล้อมรอบตัวเร่งปฏิกิริยา และกระแสของไหล ถ้าปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์จะมีสารตั้งต้น A แพร่ออกมาด้วยเช่นกัน

กระบวนการทั้ง 7 ขั้นตอนนี้ จะเกิดขึ้นสมบูรณ์บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นรูพรุน ถ้าตัวเร่งปฏิกิริยาใดก็ตามที่มีขนาดรูพรุนใหญ่หรือมีรูพรุนน้อยมากๆ จนนับไม่ได้ว่ามีรูพรุนอยู่ จะทำให้การแพร่หรือการถ่ายเทมวลเกิดได้อย่างรวดเร็ว และถือได้ว่ากระบวนการโดยรวมไม่มีขั้นตอนที่ 2 และ 6

### 2.7.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO Catalyst)

เป็นโลหะออกไซด์มีความเป็นเบส มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาสูง เช่น ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของเบนซัลดีไฮด์ (benzaldehyde) ปฏิกิริยาการสลายตัวของไดอะซีโตนแอลกอฮอล์ (diacetonealcohol) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของอะคริโลไนไตรล์ (acrylonitrile) และปฏิกิริยาแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันพืช เป็นต้น โครงสร้างผลึกของ แมกนีเซียมออกไซด์ มีโครงสร้างผลึกดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.15 โครงสร้างผลึกของแมกนีเซียมออกไซด์ [38]



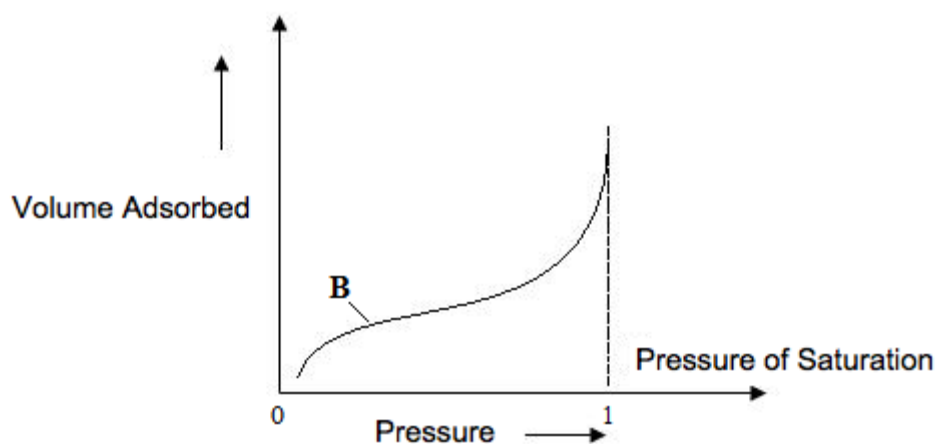
## 2.8 การวัดพื้นที่ผิวรูพรุนด้วยวิธีบีอีที (brunauer, emmett and teller: BET) [41]

พื้นที่ผิว (surface area) ของสาร เป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญ เนื่องจากเป็นบริเวณที่ใช้วางองค์ประกอบกัมมันต์ (active species) ที่จะใช้ในการช่วยให้เกิดปฏิกิริยา พื้นที่ผิวนำไปใช้ประกอบการพิจารณาเมื่อต้องการนำสารนั้นไปใช้งาน หรือพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีคุณภาพตามต้องการหรือตามที่มาตรฐานกำหนด การวัดพื้นที่ผิวภายในวัสดุที่มีความพรุนทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่จะกล่าวในที่นี้ทำโดยการดูดซับของแก๊ส เช่น ไนโตรเจนหรือแก๊สอื่นที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เช่น อาร์กอน ซึ่งขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ

ไอโซเทิร์มแบบบีอีที ใช้สำหรับการดูดซับแบบหลายชั้น และการดูดซับทางกายภาพ สมมุติฐานของไอโซเทิร์มนี้เหมือนกับของแลงเมียร์ และมีข้อพิจารณาเพิ่มเติมคือ

1. ตัวถูกดูดซับอยู่ในผิวหน้าชั้นแรกจะเป็นตำแหน่งสำหรับตัวถูกดูดซับในชั้นถัดไป
2. อัตราเร็วของการดูดซับในชั้นที่  $i$  จะเท่ากับอัตราเร็วของการคายในชั้นที่  $i+1$
3. เอนทัลปีของการดูดซับ  $\Delta H_{\text{abs}}$  มีค่าเท่ากันสำหรับชั้นที่สอง และชั้นต่อมา และจะเท่ากับความร้อนของการควบแน่น (heat of condensation) ของแก๊ส

การคำนวณพื้นที่ผิวภายใน หาได้จากจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว การดูดซับของแก๊สไนโตรเจน ดัง-ภาพที่ 2.15 จะเกิดเร็วในช่วงแรกโดยจะเพิ่มตามความดันจนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนแปลง (ตำแหน่ง B) และเกิดการควบแน่นของแก๊สไนโตรเจนในรูพรุนของวัสดุที่มีความพรุนที่ต้องการหาพื้นที่ผิว ทำให้ปริมาตรของการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



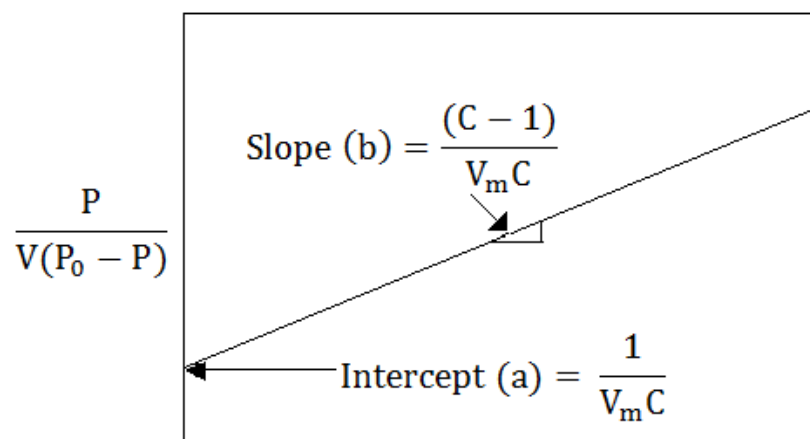
ภาพที่ 2.16 กราฟการวัดพื้นที่ผิวด้วยวิธีบีอีที [42]

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดันย่อยต่างๆ และปริมาตรที่ถูกดูดซับแล้วเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว คือ สมการของบีอีที แสดงดังสมการที่ (2.7)

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{CV_m} + \frac{(C-1)P}{V_m CP_0} \quad (2.7)$$

เมื่อ	P	คือ ความดันย่อยของแก๊สที่ถูกดูดซับ
	P <sub>0</sub>	คือ ความดันอิ่มตัวของแก๊สที่ถูกดูดซับ ณ อุณหภูมิที่ศึกษา
	V	คือ ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ความดัน P
	V <sub>m</sub>	คือ ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ทำให้เกิดการปกคลุมชั้นเดียว
	C	คือ ค่าคงที่

สมการที่ (2.7) นี้ 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  $(C-1)/V_m C$  จากนั้นเขียนกราฟที่ได้จากการคำนวณในรูปเส้นตรงของสมการบีอีที ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.17 กราฟเส้นตรงของสมการบีอีที [42]

จากสมการของบีอีที สามารถคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะของสารได้ โดยนำปริมาตรของแก๊สที่ปกคลุมผิวของสาร หรือ  $V_m$  ที่ได้จากสมการที่ (2.7) ไปคำนวณจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ 1 ชั้นโมเลกุล แล้วจึงนำไปคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้สมการที่ (2.8) ดังนี้

$$S_{sp} = \frac{N_A a_{max} S_0}{W} \quad (2.8)$$

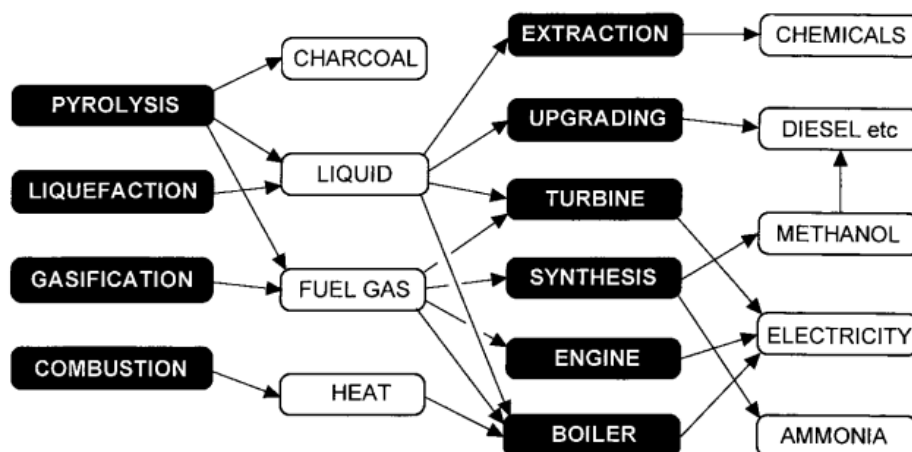
เมื่อ	$S_{sp}$	คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของสาร (ตารางเมตรต่อกรัม)
	$N_A$	คือ เลขอาโวกาโดร เท่ากับ $6.02 \times 10^{23}$ (จำนวนโมเลกุลต่อกรัมโมล)
	$a_{mas}$	คือ จำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ 1 ชั้นโมเลกุล เท่ากับ $V_m/22,414$
	$S_0$	คือ พื้นที่ผิวหน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ เท่ากับ $1.62 \times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

## 2.9 กระบวนการพีจีแอล (PGL process) [43]

ในการเปลี่ยนชีวมวล ขยะ หรือเศษวัสดุให้เป็นพลังงานแปรรูปที่มีค่าความร้อนที่สูงกว่าอย่าง เชื้อเพลิงเหลวและแก๊สชีวภาพ คือกระบวนการรวมกันที่เรียกว่า กระบวนการพีจีแอล ในตารางที่ 2.3 ย่อมาจาก 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการไพโรไลซิส แก๊สซิฟิเคชัน (gasification) และลิกวิแฟกชัน (liquefaction) โดยทั้งสามกระบวนการมีความเหมือนกันคือเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนแก่สารใดสารหนึ่ง (thermal processes) แต่ด้วยกระบวนการผลิตและภาวะที่แตกต่างกันดังนั้นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสจะได้แก๊สและเชื้อเพลิงเหลว ส่วนกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะให้แก๊สสังเคราะห์ (ไฮโดรเจนรวมกับคาร์บอนไดออกไซด์) สำหรับการทำลิกวิแฟกชันนั้นอาจจะมีการเติมตัวทำละลายเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเพื่อวัตถุประสงค์ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ดังภาพที่ 2.17

ตารางที่ 2.3 กระบวนการพีจีแอล

ชนิดของกระบวนการ	อุณหภูมิ	ผลิตภัณฑ์หลัก
Pyrolysis	400 – 1,000 °C	แก๊สชีวภาพ เชื้อเพลิงเหลว
Gasification	500 – 1,400 °C	แก๊สสังเคราะห์
Liquefaction	200 – 400 °C	เชื้อเพลิงเหลว

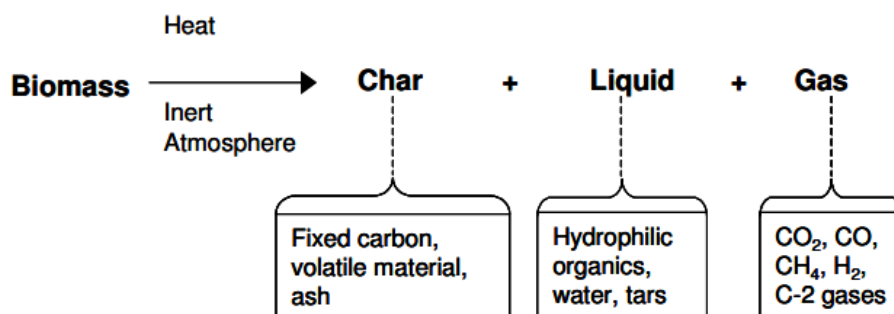


ภาพที่ 2.18 กระบวนการทางความร้อนเคมีในรูปแบบต่างๆ และการนำไปประยุกต์ใช้ [43]

## 2.10 กระบวนการไพโรไลซิส และผลิตภัณฑ์ที่ได้ [44-45]

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการแตกสลายทางความร้อนเคมี (thermochemical decomposition) ของสารอินทรีย์ด้วยความร้อนหรือความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ณ อุณหภูมิสูงในที่ปราศจากออกซิเจนหรือในที่ที่จำกัดและควบคุมปริมาณออกซิเจนให้เหลือน้อยที่สุด ทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์มีขนาดเล็กลงได้ผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของของแข็ง ของเหลว และแก๊ส เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ (primary products) เมื่อใช้ผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น การนำเอาเชื้อเพลิงเหลวที่เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิมาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงเพื่อผลิตคาร์บอนแบล็คซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิ (secondary products)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วย ขั้นแรก การสลายตัวของสารที่ระเหยง่ายออกจากวัตถุดิบ (devolatilization) ขั้นที่สอง เป็นการแตกตัวของวัตถุดิบ โดยองค์ประกอบที่สามารถแตกตัวได้ที่ภาวะที่ใช้จะแตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลงตามเวลาที่ให้หรืออุณหภูมิที่กำหนด จนกระทั่งเกิดการแตกตัวที่สมบูรณ์ ดังนั้นโดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสมักอยู่ในช่วง 400–1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งจะใช้อุณหภูมิสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับชนิดและพันธะเคมีที่อยู่ในสารอินทรีย์นั้น ในบางครั้งอาจเติมไฮโดรเจนเข้าไปในกระบวนการไพโรไลซิสด้วย ทั้งนี้เพื่อเปลี่ยนการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ และบางครั้งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีความเสถียรมากขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนที่เติมเข้าไปจะรบกวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยออกซิเจนที่มีอยู่ในเนื้อวัตถุดิบ ตารางที่ 2.4 แสดงกระบวนการไพโรไลซิสที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งมวลแสดงดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.19 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวล [45]

ตารางที่ 2.4 ชนิดของเทคโนโลยีไพโรไลซิส

เทคโนโลยีไพโรไลซิส	เวลาคงอยู่ (Residence Time)	อัตราการให้ความร้อน (Heating Rate)	อุณหภูมิ	ผลิตภัณฑ์หลัก
Carbonization	ชั่วโมง – วัน	ต่ำมาก	300 – 500 °C	ถ่าน
Pressure Carbonization	15 นาที – 2 ชั่วโมง	ปานกลาง	450 °C	ถ่าน
Conventional Pyrolysis	ชั่วโมง	ต่ำ	400 – 600 °C	ถ่าน เชื้อเพลิงเหลว แก๊สสังเคราะห์
	5 – 30 นาที	ปานกลาง	700 – 900 °C	ถ่าน แก๊สสังเคราะห์
Vacuum Pyrolysis	2 – 30 วินาที	สูง	350 – 450 °C	เชื้อเพลิงเหลว
Flash Pyrolysis	0.1 – 2 วินาที	สูง	400 – 650 °C	เชื้อเพลิงเหลว
	< 1 วินาที	สูง	650 – 900 °C	เชื้อเพลิงเหลว แก๊สสังเคราะห์
	< 1 วินาที	สูง	1,000 – 3,000 °C	แก๊สสังเคราะห์

## 2.11 การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิง

### 2.11.1 การใช้น้ำมันพืชโดยตรง

ประโยชน์ของการใช้น้ำมันพืชในเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรง คือ

1. เป็นของเหลวที่ได้จากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่ต้องผ่านการปรับปรุง
2. น้ำมันพืชมีค่าความร้อน (heat value) สูง
3. มีปริมาณกำมะถันและสารอะโรมาติกต่ำ สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ แต่การใช้น้ำมันพืชในเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรงนำมาซึ่งปัญหาที่เกี่ยวข้องกับชนิดและคุณภาพของน้ำมัน

4. ความหนืดของน้ำมันพืชสูง (high viscosity) ทำให้ระบบหัวฉีดของเครื่องยนต์ทำงานอย่างหนักและได้หยดของน้ำมันขนาดใหญ่ การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ในการจุดระเบิดแต่ละครั้ง ซึ่งจะเกิดการสะสมจนเป็นคราบเขม่าจนทำให้ลูกสูบเกิดความเสียหายได้

5. จุดวาบไฟของน้ำมันพืชสูง เนื่องจากความสามารถในการระเหยต่ำ ทำให้การจุดระเบิดต้องใช้อุณหภูมิสูงในตอนเริ่มเดินเครื่อง

6. ความไม่อิ่มตัวของน้ำมันพืช (polyunsaturated character) ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างพันธะคู่ในโมเลกุลของน้ำมันพืช เกิดเป็นยางเหนียวทำให้กระบอกสูบและลูกสูบเสียหาย

ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นได้โดยการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันพืชเพื่อใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวทดแทนได้โดยผ่านกระบวนการต่างๆ

### 2.11.2 การปรับปรุงน้ำมันพืชเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง

การใช้น้ำมันพืชเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงโดยตรงในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นมีปัญหา เนื่องจากความหนืดของน้ำมันพืชสูง ความสามารถในการระเหยได้ต่ำ และมีลักษณะเฉพาะของสารที่มีพันธะไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง (polyunsaturated character) ซึ่งสามารถแก้ปัญหที่เกิดขึ้นได้โดยการปรับปรุงน้ำมันพืชเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้ดังต่อไปนี้

#### 2.11.2.1 การผสมน้ำมันพืชกับน้ำมันดีเซล (blending)

การผสมระหว่างน้ำมันพืชกับน้ำมันดีเซลหรือผสมกับตัวทำละลายอื่นๆ เช่น เอทานอลโดยใช้อัตราส่วนที่เหมาะสม เช่นการผสมน้ำมันดอกทานตะวันกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 1:3 โดยปริมาตร และนำไปทดสอบกับเครื่องยนต์ พบว่าน้ำมันผสมที่ได้มีความหนืด 4.88 เซนติสโตก ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่เหมาะกับการใช้งานในระยะ

ยาวของเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ก่อให้เกิดโค้กที่หัวฉีด แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันดอกคำฝอยกับน้ำมันดีเซล พบว่าไม่เหมาะสมกับการใช้งานในระยะยาวเช่นกัน เนื่องจากเกิดยางเหนียวติดของน้ำมันหล่อลื่น และการผสมของน้ำมันถั่วเหลืองกับตัวทำละลาย (ร้อยละ 48 พาราฟินผสมร้อยละ 52 แนฟทาลิน) ในอัตราส่วน 1:1 พบว่ามีค่าความหนืด 5.12 เซนติสโตก ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส เมื่อนำไปใช้ในเครื่องยนต์มีคราบเขม่าเกาะติดที่วาล์วและหัวฉีด ดังนั้นการใช้น้ำมันพืชผสมน้ำมันดีเซลโดยตรงนั้น ก่อให้เกิดปัญหาอันเนื่องมาจากความหนืดและสิ่งเจือปน ซึ่งเกิดผลเสียทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

#### 2.11.2.2 การทำเป็นของผสมไมโครอิมัลชัน (microemulsion)

การทำไมโครอิมัลชัน เป็นการกระจายอนุภาคของเหลวที่แขวนลอยในตัวกลางของเหลวอีกชนิดหนึ่งอย่างสมดุล โดยการผสมน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์โดยของเหลวทั้งสองชนิดไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แต่สามารถกระจายในของเหลวได้ด้วยสารลดแรงตึงผิว วิธีนี้ทำให้สามารถฉีดละอองฝอยได้เนื่องจากตัวทำละลายมีจุดเดือดต่ำเมื่อเทียบกับน้ำมันพืช พบว่าไมโครอิมัลชันของน้ำมันพืชที่ผสมเมทานอลจะได้เชื้อเพลิงที่มีสมบัติใกล้เคียงน้ำมันดีเซล การทำไมโครอิมัลชันของเอทานอล เมทานอล ไตรโอลีนและน้ำมันถั่วเหลืองในอัตราส่วน 52.7:13.3:33.3:1 เมื่อนำไปทดสอบกับเครื่องยนต์ พบว่ามีปัญหาการเกิดคราบเขม่าขึ้นที่หัวฉีดและวาล์วจำนวนมาก

#### 2.11.2.3 การสลายน้ำมันพืชด้วยความร้อน

ปฏิกิริยาการสลายน้ำมันพืชด้วยความร้อน คือการเปลี่ยนแปลงสารโมเลกุลใหญ่เป็นสารโมเลกุลขนาดเล็กโดยใช้ความร้อน และอาจมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยไร้แก๊ส ออกซิเจนหรืออากาศเข้าร่วมในปฏิกิริยา การเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาอื่นได้หลายปฏิกิริยาพร้อมกัน ผลิตรังสีที่ได้จะเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเหลว กลุ่มดีเซลเป็นส่วนใหญ่ และอาจเกิดแก๊สโซลีนและเคโรซีนด้วย ชนิดและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันพืชเมื่อผ่านการสลายตัวด้วยความร้อนและใช้ในโตรเจนและอากาศเป็นแก๊สตัวกลาง แสดงดังตารางที่ 2.5 ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือแอลเคน (alkanes) และแอลคีน (alkenes) ประมาณร้อยละ 60 ของน้ำหนักสารทั้งหมด นอกจากนี้ยังได้กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) ประมาณร้อยละ 9.6 – 16.1 สมบัติของ

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์มและน้ำมันละหุ่งด้วยความร้อน  
ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ชนิดและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายน้ำมันพืชด้วยความร้อนสำหรับการใช้ในโตรเจนและอากาศเป็นแก๊สตัวกลาง

Compound	High oleic acid sunflower oil		Soybean oil	
	N <sub>2</sub> sparge	Air	N <sub>2</sub> sparge	Air
Alkanes	37.5	40.9	31.1	29.9
Alkenes	22.2	22.0	28.3	24.9
Alkakienes	8.1	13.0	9.4	10.9
Carboxylic acids	11.5	16.1	12.2	9.6
Unresolved unsaturates	9.7	10.1	5.5	5.1
Aromatics	2.3	2.2	2.3	1.9
Unidentified	8.7	12.7	10.9	12.6

ตารางที่ 2.6 สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม และน้ำมันละหุ่งด้วยความร้อน

Properties	Cracked vegetable oil			Diesel Fuel	ASTM
	Soybean	Palm	Castor		
Cetane number	50.1	52.7	30.9	45	D613
Density at 20°C, (g/ml)	0.844	0.818	0.882	0.82-0.88	D1298
Viscosity, 40°C,cSt	3.5	2.7	3.7	2.5-5.5	D445
Acid index	116.2	133.0	207.5	-	D465.9
Sulfur, (wt%)	0.008	0.010	0.013	0.2	D1552



## 2.12 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำมัน [46-47]

วิเคราะห์หาคุณภาพของน้ำมันดิบอย่างละเอียด เพื่อหาองค์ประกอบและสมบัติต่างๆในน้ำมันดิบ เริ่มต้นเพื่อหาปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สที่มีอยู่ด้วยเทคนิค Gas chromatography และนำน้ำมันมากลั่นแยกตามคาบจุดเดือด (boiling range) อย่างละเอียดโดยแบ่งเป็นส่วนแคบๆ 5 - 10 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่สูงมากและใช้เวลานานจึงไม่นิยมทำกัน ปัจจุบันจึงใช้วิธีแยกน้ำมันดิบออกตามคาบจุดเดือดกว้างพอดีกับที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวสำเร็จรูป สามารถแบ่งได้เป็น

1. พวกที่มีคาบจุดเดือดตั้งแต่ IBP (Initial boiling point) จนถึง 200 องศาเซลเซียส เรียกว่าแก๊สโซลีน (gasoline fraction) มักใช้ในการผลิตน้ำมันเบนซิน
2. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 200 - 250 องศาเซลเซียส เรียกว่าน้ำมันก๊าด (kerosene fraction) มักใช้น้ำมันก๊าดเพื่อให้แสงสว่าง ถ้าจุดเกิดควันไม่ต่ำจนเกินไป น้ำมันก๊าดที่ได้จะมีคุณภาพดี แต่ถ้าจุดเยือกแข็งต่ำจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงอากาศยานไอพ่นได้ แต่ต้องขึ้นอยู่กัสมบัติเชื้อเพลิงอื่นๆด้วย
3. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 250 - 350 องศาเซลเซียส เราเรียกกันว่าแก๊สออยล์ชนิดเบา (light gas oil fraction) มักนำมาใช้เป็นน้ำมันเครื่องยนต์
4. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 350 - 370 องศาเซลเซียส เราเรียกว่าแก๊สออยล์ (gas oil fraction) มักนำมาใช้เป็นน้ำมันเครื่องยนต์ดีเซล
5. พวกที่มีคาบจุดเดือดสูงกว่า 370 องศาเซลเซียส เรียกว่ากากน้ำมัน (residue) นำไปใช้งานได้หลายอย่างขึ้นอยู่กัสมบัติของกากน้ำมัน เช่น นำมาใช้เป็นน้ำมันเตา ผลิตเป็นยางมะตอย หรือนำมาเป็นน้ำมันเครื่อง

### 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Haruki Tani และคณะ [27] ได้ทำการพัฒนากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงดีเซลจากน้ำมันพืชชนิดต่างๆ เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันสบู่ดำ น้ำมันดำ น้ำมันคาโนลา และน้ำมันใช้แล้ว ผ่านกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงดีเซลคุณภาพสูงจากน้ำมันและไขมัน โดยในกระบวนการนี้จะมีควบคุมอยู่ในสภาวะบรรยากาศไม่มีการใช้ทั้งเมทานอลและไฮโดรเจน และไม่เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นกลีเซอริน (glycerin) แต่จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโมเลกุลแก๊สเล็กๆ (คาร์บอนไดออกไซด์ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็ก และคาร์บอนมอนอกไซด์ปริมาณเล็กน้อย) และผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนเหลว ( $C_{10}$ - $C_{20}$ ) ซึ่งผลิตภัณฑ์ของเหลวจะประกอบไปด้วยโอเลฟิน และพาราฟิน ทั้งโครงสร้างแบบกิ่งและสายโซ่ตรง

งานวิจัยของ Takuya Ito และคณะ [48] ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนน้ำมันใช้แล้วเป็นไบโอดีเซล ซึ่งน้ำมันใช้แล้วจะประกอบไปด้วยกรดไขมันอิสระและโมเลกุลโซ่ตรงยาวจากไขมันสัตว์ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส พบว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของเวลาในการทำการทดลองจะทำให้เกิดองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กเพิ่มมากขึ้นผ่านกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ของกรดไขมัน และเมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาพลาเดียมและถ่านกัมมันต์ (Pd/C) ลงไป ทำให้ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเป็น 85% โดยน้ำหนัก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะไปช่วยให้กระบวนการดีคาร์บอกซิเลชันเกิดเพิ่มมากขึ้น

งานวิจัยของ Xu Junming และคณะ [49] ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลจากกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ เช่น น้ำมันตุง น้ำมันปาล์ม น้ำมันสบู่ดำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) MCM-41 และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) พบว่าแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนดีที่สุดใน และให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติคล้ายเชื้อเพลิงปิโตรเลียม

งานวิจัยของ Xu Junming และคณะ [50] ได้ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนจากน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง การทดลองทำเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ทั้งตัวเร่งที่เป็นกรดและ

เป็นเบสดังนี้ อะลูมิเนียมออกไซด์ MCM-41 โพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) โซเดียมคาร์บอเนต ( $Na_2CO_3$ ) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$ ) และแคลเซียมออกไซด์ ในสถานะต่างๆ ซึ่งผลการทดลองพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสจะได้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่มีค่าความเป็นกรดลดลง และได้เชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันถั่วเหลืองที่มีคุณลักษณะคล้ายเชื้อเพลิงปิโตรเลียม

งานวิจัยของ H. Tani และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการเลือกเกิดกระบวนการดีคาร์บอกซีแครกกิง (decarboxy-cracking) ของน้ำมันปาล์มเพื่อให้ได้เป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการศึกษาคือ ซิลิคอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) แมกนีเซียมออกไซด์และซิลิคอนไดออกไซด์ ( $MgO-SiO_2$ ) คาร์บอน (carbon) แมกนีเซียมและคาร์บอน (MgO-carbon) Spent FCC แมกนีเซียมออกไซด์ พบว่า การใช้แมกนีเซียมออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) จากน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืชอื่นๆ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ซึ่งผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่ได้ประกอบไปด้วยพาราฟิน และโอเลฟิน ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ จะช่วยสนับสนุนการเกิดกระบวนการดีคาร์บอกซีแครกกิงของไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) และกรดไขมันอิสระ ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่ได้จะมีค่าความกรดที่ต่ำ และสามารถใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลได้

งานวิจัยของ Denghui Wang และคณะ [51] ได้ทำการเปรียบเทียบการแตกตัวเชิงเร่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง MCM-41 และแคลเซียมออกไซด์ โดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสชีวมวล พบว่าเมื่อไพโรไลซิสแกนข้าวโพดโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดคือ MCM-41 จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนิวลดลง แต่ได้องค์ประกอบของฟีนอล และไฮโดรคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสคือ แคลเซียมออกไซด์ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนิวและฟีนอลลดลง แต่ได้องค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น สรุปได้ว่าเมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบที่เป็นกรดลดลง

งานวิจัยของ วิชชากร จารุศิริ [52] ศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน และอัตราการไหลของสารป้อนผสมระหว่างน้ำมันพืชใช้แล้ว น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว และโพพิลีนต่อการแตกตัวด้วยความร้อน และตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่าที่

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารป้อน ได้แก่ น้ำมันพืชใช้แล้ว น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว และโพรพิลีน เท่ากับ 0.7 : 0.1 : 0.2 อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราไหลของแก๊สไฮโดรเจน 5 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของสารป้อนเข้า 1.23 กรัมต่อนาที บนตัวเร่งปฏิกิริยา 5 wt% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ได้ร้อยละของแกโซลีนสูงที่สุด 50.95 เคโรซีน 10.38 แก๊สออยล์เบา 21.68 แก๊สออยล์หนัก และ Long Residue 16.99 โดยน้ำหนัก

งานวิจัยของ มารินา มงคล [53] ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 เพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวและองค์ประกอบสูงที่สุด ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาที่ทำปฏิกิริยา น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา และความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้น พบว่าที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที HZSM-5 0.05 กรัม และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์เกจ ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวมีค่าสูงสุด 83.59 โดยน้ำหนัก (ประกอบด้วยแกโซลีน 26.75 เคโรซีน 13.79 แก๊สออยล์เบา 22.99 แก๊สออยล์หนัก 3.76 และ Long Residue 16.30)

งานวิจัยของ นิสา วิสุทธีรังษีอุไร [54] ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วผสมเม็ดพลาสติกพอลิสไตรีน (อัตราส่วน 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30 และ 60 : 40 โดยน้ำหนัก) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ ที่อุณหภูมิช่วง 350-600 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารป้อน 4.14, 9.04 และ 15.49 กรัมต่อนาที พบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำมันพืชใช้แล้วผสมพอลิสไตรีน 60 : 40 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารป้อน 9.04 กรัมต่อนาที ได้ค่าการแปลงผันเท่ากับ 91.79 % ได้เชื้อเพลิงเหลว 98.55 wt% แก๊สและของแข็ง 1.45 wt% มีองค์ประกอบในส่วนของเชื้อเพลิงเหลว ดังนี้ แกโซลีน 57.16 เคโรซีน 5.62 แก๊สออยล์เบา 22.05 แก๊สออยล์หนัก 7.27 และ Long Residue 6.45 wt% สำหรับกรณีการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วที่ภาวะเดียวกัน ได้ค่าการแปลงผันเท่ากับ 85.85 % เชื้อเพลิงเหลวที่ได้เท่ากับ 99.17 wt% แก๊สและของแข็ง 0.83 wt% มีองค์ประกอบในส่วนของเชื้อเพลิงเหลว ดังนี้ แกโซลีน 41.15 เคโรซีน 8.72 แก๊สออยล์เบา 28.26 แก๊สออยล์หนัก 9.92 และ Long Residue 11.12 wt% และพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 600 องศาเซลเซียส แทบไม่มีผลต่อผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวในการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วผสมพอลิสไตรีนอัตราส่วน 60 : 40 และการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้ว (เชื้อเพลิงเหลว 97.89 และ 98.31 wt% ตามลำดับ)

งานวิจัยของ Raphael O. Idem et al. [55] ศึกษาผลของอุณหภูมิช่วง 400-500 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารป้อนต่อการแตกตัวของน้ำมันคาโนลาเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยตัวเร่ง

ปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้แคลเซียมออกไซด์ที่ได้เชื้อเพลิงเหลวและค่าการแปลงผันสูงสุด คือ อัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์ต่อน้ำมันคาโนลา 2 wt% อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารป้อนเข้า  $12.1 \text{ ช.ม.}^{-1}$  ด้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวเท่ากับ 37.2 Residual Oil 4.3 แก๊ส 56.2 และของแข็ง 2.2 โดยน้ำหนัก และค่าการแปลงผัน 95.7 % กรณีของแมกนีเซียมออกไซด์ภาวะที่เหมาะสมเช่นเดียวกัน แต่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้เท่ากับ 36.8 Residual Oil 33.7 แก๊ส 19.8 และของแข็ง 8.0 โดยน้ำหนัก และค่าการแปลงผันของน้ำมันคาโนลา 56.3 %

งานวิจัยของ Niken Taufiqurrahmi et al. [56] ศึกษาผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ต่อน้ำมันปาล์มใช้แล้ว 6-14 wt% อุณหภูมิ 450-500 องศาเซลเซียส และ Residence Time 20 วินาที ต่อการแตกตัวของน้ำมันปาล์มใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีขนาดรูพรุน 0.54-0.80 nm ไปเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่าที่อุณหภูมิ 458 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันปาล์มใช้แล้ว 6 wt% ด้วยซีโอไลต์ Y ขนาดรูพรุน 0.67 nm เกิดการแปลงผันของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว 87.50 % ได้เชื้อเพลิงเหลว 46.5 โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยแก๊ส 34.96

งานวิจัยของ Stella Bezergianni et al. [57] ศึกษาผลของอุณหภูมิ 330-390 องศาเซลเซียส ความดัน 8.27-13.79 MPa และอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมันพีซีใช้แล้ว 506-1,013  $\text{Nm}^3/\text{m}^3$  ต่อการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HDT (Ni/Mo Catalyst) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่าสารป้อนเข้าน้ำมันพีซีใช้แล้ว ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ความดัน 8.27 MPa อัตราการไหลของสารป้อนเข้า 114 กรัมต่อชั่วโมง อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันพีซีใช้แล้ว 506  $\text{Nm}^3/\text{m}^3$  ได้ค่าการแปลงผันของน้ำมันพีซีใช้แล้วสูงสุดร้อยละ 83 เป็นร้อยละของดีเซลสูงสุด 79 โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลว

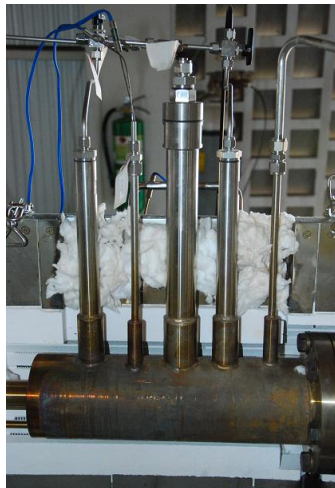
## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว และศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวผ่านกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ปริมาตร 3.0 ลิตร ทำจากเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิม โดยเตาปฏิกรณ์ถูกจัดวางในลักษณะแนวนอน มีแกนใบกวนอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยเครื่องปฏิกรณ์สามารถทนความร้อนได้ถึง 500 องศาเซลเซียส และจะมีช่องเสียบเทอร์โมคัปเปิลเปิดทางด้านข้างสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิภายในของผลิตภัณฑ์ที่ได้ รวมถึงอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาของตัวตัวเร่งปฏิกิริยาดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ปริมาตร 3.0 ลิตร

3.1.2 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล (temperature controller) ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังขดลวดให้ความร้อนในส่วนต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ และสามารถตัดการจ่ายกระแสเมื่อได้อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ โดยแบ่งการควบคุมอุณหภูมิออกเป็น

- ควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์

- ควบคุมอุณหภูมิประเภททั้งสองด้าน
- ควบคุมอุณหภูมิแก๊สตัวพา

รวมถึงมีหน้าจอแสดงอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล (digital controller)

3.1.3 ขดลวดความร้อนแบบ Injection แรงดัน 230 โวลต์ กำลัง 400 วัตต์ เพื่อให้ความร้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์

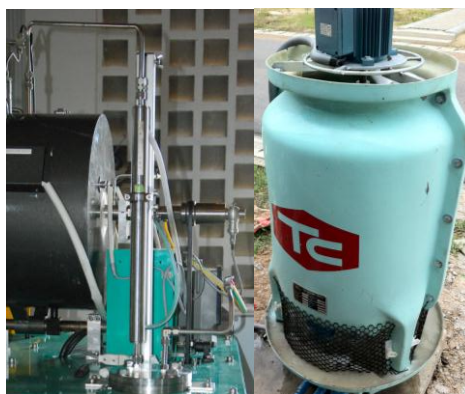
3.1.4 เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ เป็นแบบเค (K-type) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร เพื่อวัดอุณหภูมิในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ และอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1.5 ชุดควบคุมแก๊สตัวพา (carrier gas) โดยใช้แก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ ) เป็นแก๊สตัวพา ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยมีส่วนควบคุมการป้อนแก๊สตัวพาดังนี้

- ส่วนควบคุมการป้อนแก๊สตัวพาบริเวณประเภททั้งสองด้าน
- ส่วนควบคุมการป้อนแก๊สตัวพาภายในเครื่องปฏิกรณ์

3.1.6 อุปกรณ์ควบแน่นผลิตภัณฑ์ (condenser) ประกอบด้วย

- ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนของผลิตภัณฑ์ (heat exchanger) แบบไหลสวนทางกัน (counter-current)
- ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำที่มาจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (cooling tower)
- เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สให้เป็นของเหลว ดังภาพที่ 3.3



(ก)

(ข)

### ภาพที่ 3.3 อุปกรณ์การควบแน่นผลิตภัณฑ์

(ก) ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนของผลิตภัณฑ์ (ข) ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำ

3.1.7 ชุดกรองสุญญากาศ ประกอบด้วยชุดเครื่องแก้วต่อกับเครื่องดูดอากาศ เพื่อทำการกรองแยกแบบสุญญากาศสำหรับแยกส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวออกจากส่วนที่เป็นกากของแข็ง โดยผ่านการกรองโดยใช้กระดาษกรอง ดังภาพที่ 3.3

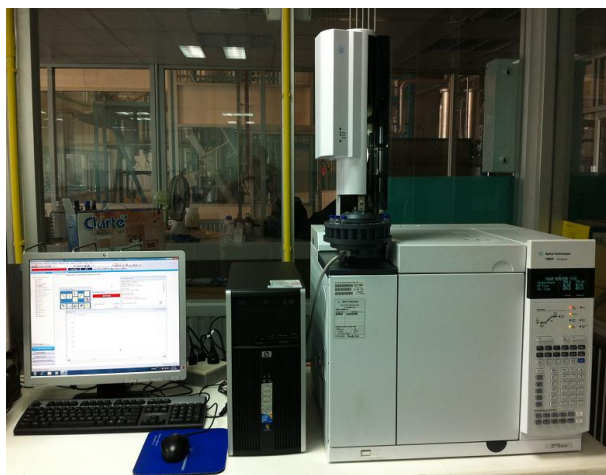


ภาพที่ 3.4 ชุดกรองสุญญากาศ

- 3.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 3.1.9 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3.1.10 นาฬิกาจับเวลา
- 3.1.11 ตู้อบ (oven)
- 3.1.12 เครื่องแก้ว ประกอบด้วยบีกเกอร์ ขวดใส่ตัวอย่าง



3.1.13 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (simulated distillation) สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวตามจุดเดือด แสดงดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (simulated distillation gas chromatography)

3.1.14 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ (gas chromatography – mass spectrometer, GC-MS) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC2010 โดยมีเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น GCMSQP2010 เป็นดีเทคเตอร์ 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



ภาพที่ 3.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ (gas chromatography – mass spectrometer, GC-MS)

### 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

3.2.1 น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว จากร้านทอดลูกชิ้นคลองถม เก็บตัวอย่างเมื่อวันที่ 15 เมษายน 2555 บรรจุในภาชนะทึบแสงเพื่อป้องกันการเกิดออกซิไดซ์

3.2.2 แก๊สไนโตรเจน 99.99% บรรจุในถังเก็บแบบ high pressure ขนาด 6 ลูกบาศก์เมตร จากบริษัท Paxair

3.2.3 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) 99.9%

3.2.4 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

### 3.3 การดำเนินการวิจัย

3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วก่อนการทดลอง โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น รวมถึงวัดปริมาณกรดไขมัน

3.3.2 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับประสมกลาง เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ โดยการทดลองเป็น  $2^4$  แฟกทอเรียล ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วและอัตราการป้อนแก๊สตัวพา ดังแสดงในตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

ตัวแปร	ระดับ	
	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
A อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)	60	180
B อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	380	430
C อัตราการป้อนแก๊สตัวพา (มิลลิลิตรต่อนาที)	100	300
D ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์)	30	60

ตารางที่ 3.2 จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลสองระดับของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์บนถ่านกัมมันต์

ตัวแปร			
อัตราการป้อน น้ำมันปรุงอาหาร ใช้แล้ว (มิลลิลิตร ต่อนาที), A	อุณหภูมิในการทำ ปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส), B	อัตราการป้อน แก๊สตัวพา (มิลลิลิตรต่อ นาที), C	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยปริมาตรของ เครื่องปฏิกรณ์), D
60	380	100	30
180	380	100	30
60	430	100	30
180	430	100	30
60	380	300	30
180	380	300	30
60	430	300	30
180	430	300	30
60	380	100	60
180	380	100	60
60	430	100	60
180	430	100	60
60	380	300	60
180	380	300	60
60	430	300	60
180	430	300	60
120	405	200	45
120	405	200	45
120	405	200	45

### 3.3.3 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมัน

- วิเคราะห์ปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการแตกตัวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว
- วิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatography

### 3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.4.1 ชั่งน้ำหนักน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วก่อนป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง และชั่งน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ตามปริมาณที่ต้องการด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ในอัตราส่วนแมกนีเซียมออกไซด์ต่อถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส โดยผสมกันในอัตราส่วน 1 ต่อ 9

3.4.2 ต่อเครื่องปฏิกรณ์ ปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ และปิดส่วนฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง จากนั้นต่อเทอร์โมคัพเปิดเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์

3.4.3 เติมตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ที่ผสมแล้ว ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย

3.4.4 เปิดไบกวณพร้อมกับการป้อนแก๊สตัวพาด้วยอัตราที่ต้องการ โดยปรับตั้งค่าที่ชุดควบคุม หลังจากนั้นปรับกระแสไฟฟ้าจากหน้าจอบเพื่อจ่ายกระแสไฟเข้าสู่ขดลวดให้ความร้อน รอจนถึงอุณหภูมิตามต้องการ

3.4.5 เริ่มทำการจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์คงที่ตามที่กำหนด เก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้ แยกผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวออกจากตะกอนของแข็งที่หลุดออกมา โดยการกรองผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยอุปกรณ์การกรองแบบสุญญากาศ ใช้กระดาษกรองเพื่อแยกส่วนที่เป็นของเหลวเก็บไว้ในขวดแก้ว เพื่อรอการวิเคราะห์

3.4.6 ล้างเครื่องปฏิกรณ์ด้วยสารละลายโทลูอีน เช็ดทำความสะอาดด้วยกระดาษที่ชั่งน้ำหนักเตรียมไว้ จากนั้นนำส่วนที่เป็นของแข็งและกระดาษซับไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งเพื่อคำนวณหาร้อยละของการเปลี่ยนต่อไป

3.4.7 นำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatography เพื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวในช่วงคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆ และวิเคราะห์องค์ประกอบสารเคมีที่เกิดขึ้น

### 3.4.8 คำนวณร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว

ร้อยละผลได้น้ำมัน (% oil yield)

$$= \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้} \times 100}{\text{น้ำหนักสารตั้งต้น}}$$

ร้อยละผลได้ของดีเซลทั้งหมด (% overall diesel yield)

$$= \text{ร้อยละผลได้เชื้อเพลิงเหลว} \times \text{ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน}$$

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาการไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ ภายใต้ภาวะบรรยากาศในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วประกอบด้วย อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว และอัตราการป้อนแก๊สตัวพา เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวและองค์ประกอบที่ดีที่สุด ด้วยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ ( $2^k$  Full Factorial Design)

#### 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

##### 4.1.1 วิเคราะห์น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น

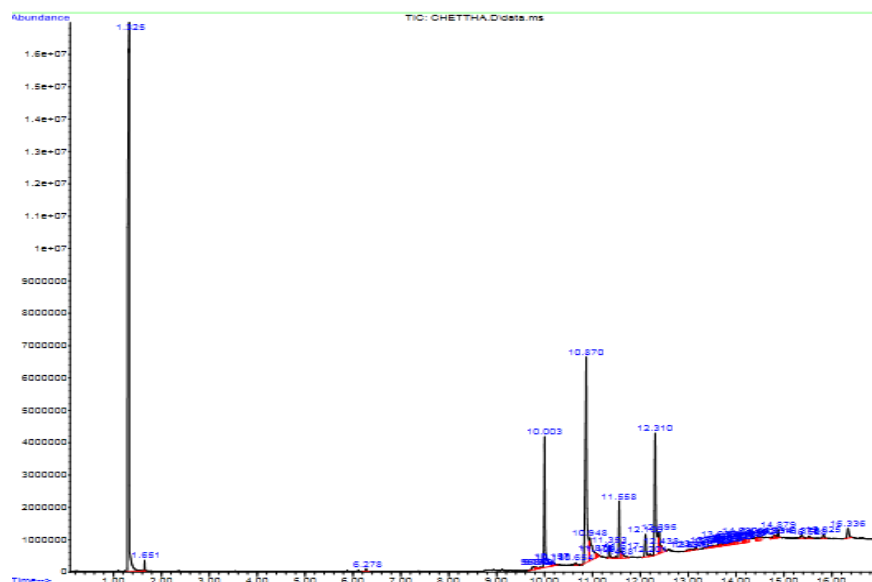
##### ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
IBP - 200	Naphtha ( $C_5 - C_{12}$ )	9.00
200 - 250	Kerosene ( $C_{12} - C_{15}$ )	2.25
250 - 370	gas oil ( $C_{15} - C_{33}$ )	20.00
370 - FBP	Long Residue ( $>C_{33}$ )	68.75

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น ก่อนการศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา พบว่ามีปริมาณขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวในช่วงแคโรซีนน้อยที่สุดคือร้อยละ 2.25 โดยน้ำหนัก แต่ได้ปริมาณของไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลยาว(Long residue) มากที่สุดคือร้อยละ 68.75 โดยน้ำหนัก

#### 4.1.2 การวิเคราะห์น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเทคนิค GC-MS

จากการวิเคราะห์น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography – Mass spectrometer, GC-MS: QP2010)



ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันปรุงอาหารจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS

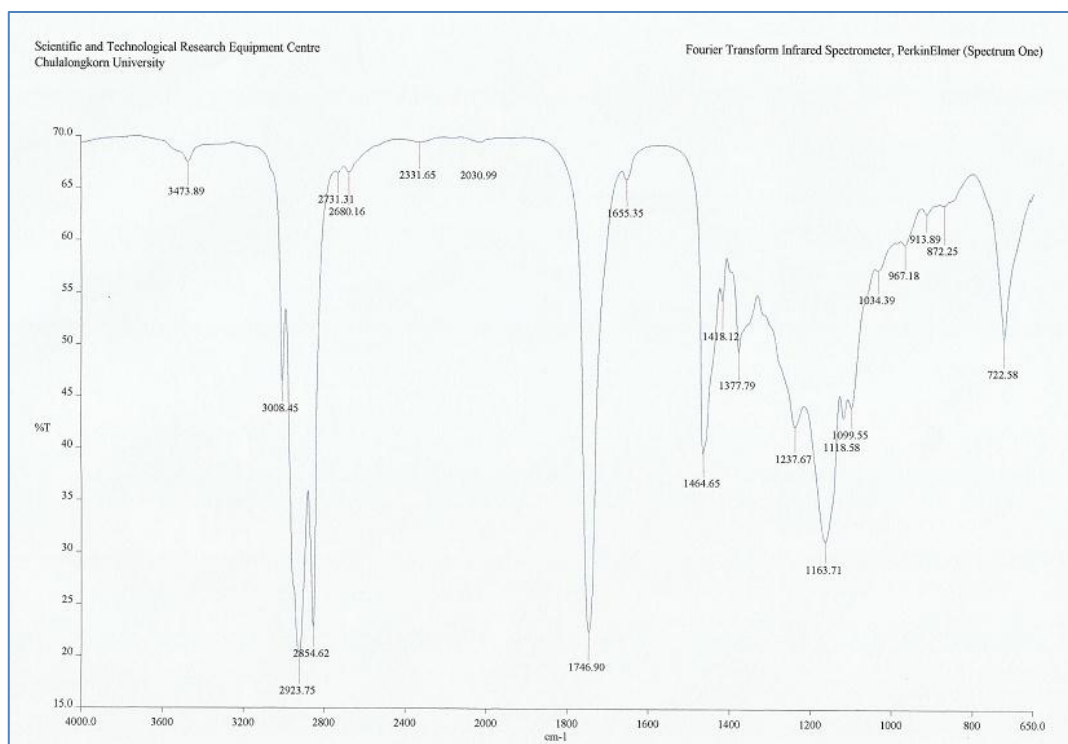
ภาพที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว ซึ่งจะแสดงพีคที่เวลา 1.125 10.003 10.870 11.558 และ 12.310 สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วได้แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเทคนิค GC-MS

พีค	องค์ประกอบ	สูตรเคมี
1.325	Carbon disulfide	CS <sub>2</sub>
10.003	n-Hexadecanoic acid	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>
10.869	n-Octadecenoic acid	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>
11.558	Palmitoyl chloride	C <sub>16</sub> H <sub>31</sub> O <sub>1</sub> Cl
12.310	9-Octadecenal	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วที่ยังไม่ผ่านกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบคาร์บอกซิลิก ซึ่งเกิดจากการแตกตัวขั้นแรกเมื่อผ่านความร้อนในการปรุงอาหาร

#### 4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเทคนิค FTIR



ภาพที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันที่พบในน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเทคนิค FTIR

ภาพที่ 4.2 จะพบว่าหมู่ฟังก์ชันหลักที่พบในน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วจะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิวที่  $1746\text{ cm}^{-1}$  หมู่ฟังก์ชัน C=C แอโรแมติกที่  $1464\text{ cm}^{-1}$  หมู่ฟังก์ชัน CH ในอะลิฟาติกที่  $2800\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$  และหมู่ฟังก์ชัน CH ในแอโรแมติกที่  $3000\text{-}3100\text{ cm}^{-1}$



## 4.1.4 วิเคราะห์ชนิดของกรดไขมันของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

องค์ประกอบของกรดไขมัน	กรัม/ 100 มิลลิลิตร
Caprylic acid (C 8:0)	0.06
Capric acid (C10:0)	0.03
Lauric acid (C12:0)	0.28
Myristic acid (C14:0)	0.96
Pentadecanoic acid (C15:0)	0.06
Palmitic acid (C16:0)	36.89
Heptadecanoic acid (C17:0)	0.12
Stearic acid (C18:0)	0.15
Arachidic acid (C20:0)	0.30
Heneicosonic acid (C21:0)	0.02
Behenic acid (C22:0)	0.06
Lignoceric acid (C24:0)	0.06
<b>Total saturated fatty acid</b>	<b>38.99</b>
Palmitelaidic methyl ester (C16:1 t9)	0.10
Palmitoleic acid (C16:1 n-7)	0.84
Cis-10-Heptadecenoic acid (C17:1)	0.05
Cis-9-Octadecenoic acid (C18:1 n-9)	41.81
Cis-Vaccenic acid (C18:1 n-7)	0.80
Cis-9,12-Octadecadienoic acid (C18:2 n-6)	10.87
Cis-9,12,15-Octadecadienoic acid (C18:3 n-3)	0.31

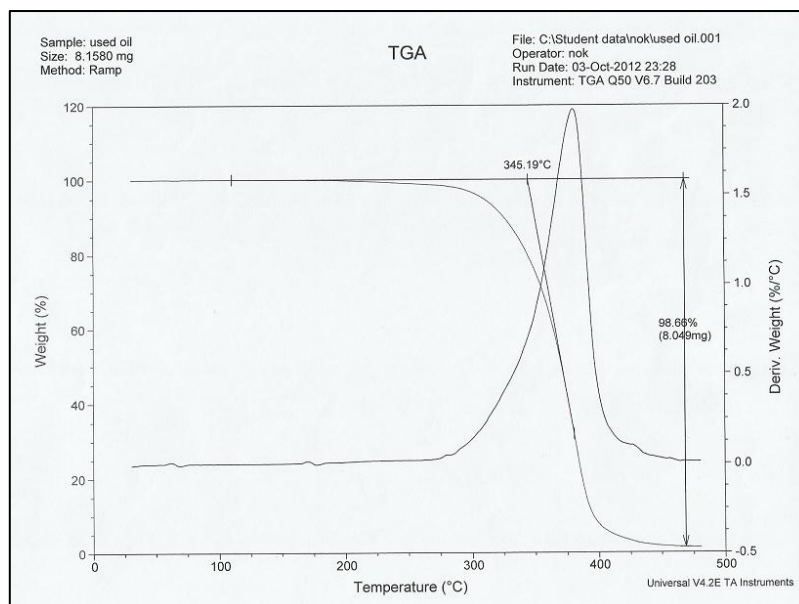
ตารางที่ 4.3(ต่อ) องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

	กรัม/ 100 มิลลิลิตร
องค์ประกอบของกรดไขมัน	
Cis-6,9,12-Octadecadienoic acid (C18:3 n-6)	0.02
Cis-11-Eicosenoic (C20:1 n-9)	0.22
Cis-11,14-Eicosadienoic (C20:2 n-6)	0.06
Cis-5,8,11,14-Eicosatetraenoic (C20:4 n-6)	0.05
Cis-5,8,11,14,17-Eicosapentraenoic(C20:5n-3)(EPA)	0.02
Cis-13-Docosenoic (C22:1 n-9)	0.03
Cis-4,7,10,13,16,19-Docosahexaenoic (C22:6 n-3)(DHA)	0.08
Cis-15-Tetracosenoic (C24:1)	0.05
<b>Total unsaturated fatty acid</b>	<b>55.31</b>

ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วพบว่า มีปริมาณของกรดไขมันอิ่มตัวในน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 38.99 กรัม/100 มิลลิลิตร ซึ่งมีองค์ประกอบของ Palmitic acid (C16:0) มากที่สุดและมีปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว อยู่ 55.31 กรัม/100 มิลลิลิตร ซึ่งมีองค์ประกอบของ Cis-9-Octadecenoic acid (C18:1 n-9) มากที่สุด

#### 4.1.5 วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเทคนิค TGA

ภาพที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการสลายตัวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วสลายตัวได้คือที่อุณหภูมิ 345.19 องศาเซลเซียส และจะสลายตัวโดยสมบูรณ์ในช่วง 380 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการทดลองอุณหภูมิที่จะใช้ในการทดลองควรมีค่ามากกว่า 380 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.3 การสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเทคนิค TGA

#### 4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.2.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (Surface Area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุน (Surface Area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวรูพรุน ( $S_{BET}$ ) (ตารางเมตร/กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)
แมกนีเซียมออกไซด์	89.00	0.076
แมกนีเซียมออกไซด์และ ถ่านกัมมันต์ (1:9)	320.40	0.023

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์บนถ่านกัมมันต์พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวรูพรุนมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียม

ออกไซด์มาก ซึ่งส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์บนถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ว่างไว (active site) ที่จะสามารถสัมผัสกับสารตั้งต้นได้มากกว่าทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากกว่า รวมถึงมีปริมาตรรูพรุนลดลงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ทำให้เกิดการเลือกเกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นโมเลกุลเล็กซึ่งอาจเป็นช่วงที่เหมาะสมได้มากกว่า

#### 4.2.2 วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

**ตารางที่ 4.5** ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

Magnesium oxide supported on activated carbon (Element)	Compound	Concentration (%weight)	
		Before used	After used
C	C	89.20	93.99
Mg	MgO	9.75	4.92
Na	NaO	0.09	0.08
Si	SiO <sub>2</sub>	0.03	0.07
P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.03
S	SO <sub>3</sub>	0.03	0.08
Cl	Cl	0.15	0.14
K	K <sub>2</sub> O	0.67	0.62
Ca	CaO	0.03	0.04
Fe	SrO	0.02	0.03

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค XRF พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์มีปริมาณแมกนีเซียมร้อยละ 9.75 โดยน้ำหนักและมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 89.20 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากหลังการใช้งานจะเกิดโค้กไปเกาะที่บริเวณตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ซึ่งมีอนุภาคเล็กหลุดออกมากับสารผลิตภัณฑ์บางส่วน

#### 4.3 ผลการทดลองที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

4.3.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

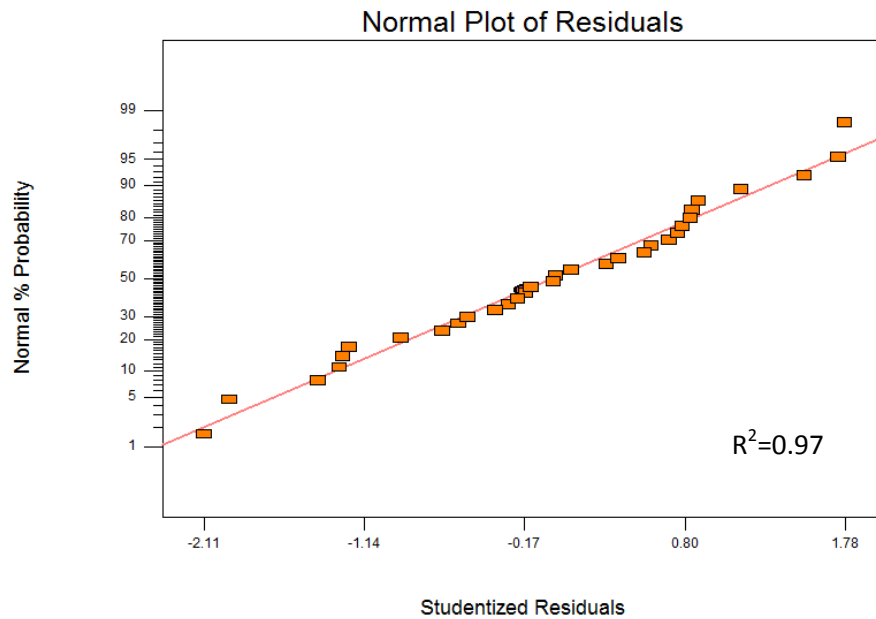
การออกแบบการทดลองแบบ  $2^4$  แฟกทอเรียลเพื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์มากที่สุด โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว และอัตราการป้อนแก๊สตัวพา ตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวอยู่ในช่วงร้อยละ 51.88 – 78.94 โดยน้ำหนัก

**ตารางที่ 4.6** ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้เชื้อเพลิงเหลว (%wt)
	อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว (mL/hr), A	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C), B	อัตราการป้อนแก๊สตัวพา (mL/min), C	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%v/v), D	
1					65.75
2	60	380	100	30	66.67
3					64.17
4	180	380	100	30	63.77
5					70.83
6	60	430	100	30	71.54
7					66.13
8	180	430	100	30	64.55
9					74.33
10	60	380	300	30	76.23
11					68.78
12	180	380	300	30	67.88
13					53.50
14	60	430	300	30	51.88
15					71.77
16	180	430	300	30	73.09
17					67.36
18	60	380	100	60	67.44
19					71.85
20	180	380	100	60	73.19
21					68.18
22	60	430	100	60	69.04

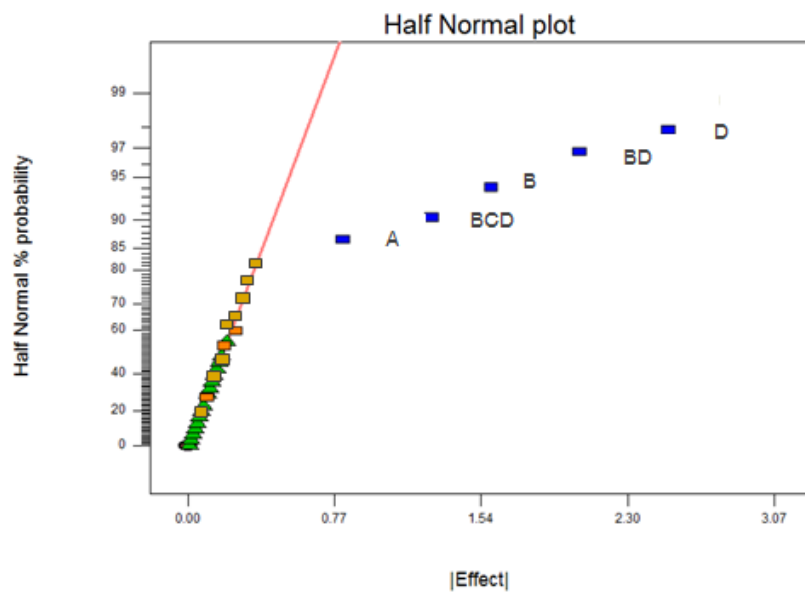
ตารางที่ 4.6 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมัน  
ปฏุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ เชื้อเพลิงเหลว (%wt)
	อัตราการป้อนน้ำมัน ปฏุงอาหารใช้แล้ว (mL/hr), A	อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา (°C), B	อัตราการป้อน แก๊สตัวพา (mL/min), C	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (%v/v), D	
23	180	430	100	60	65.90
24	180	430	100	60	64.08
25	60	380	300	60	78.94
26	60	380	300	60	76.57
27	180	380	300	60	68.50
28	180	380	300	60	69.08
29	60	430	300	60	76.55
30	60	430	300	60	77.65
31	180	430	300	60	69.79
32	180	430	300	60	70.86
33	120	405	200	45	72.75
34	120	405	200	45	71.17
35	120	405	200	45	70.83



ภาพที่ 4.4 Normal probability plot of residuals ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

ภาพที่ 4.4 แสดงถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ถูกนำมาทำการศึกษา ซึ่งพบว่าค่า  $R^2=0.97$  มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่นำมาทำการศึกษามีความน่าเชื่อถือ และนำมาวิเคราะห์ทางสถิติต่อไปได้



ภาพที่ 4.5 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว



**ตารางที่ 4.7** การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F value	Prob >F value
Model	623.6	5	103.93	21.31	<0.0001
A	170.96	1	170.96	35.05	0.0002
B	207.36	1	207.36	42.51	<0.0001
D	70.39	1	70.39	14.43	<0.0001
BD	46.24	1	46.24	9.48	<0.0001
BCD	27.14	1	27.14	5.56	<0.0001
Residual	13.95	9	1.45		
Total	667.50	15			

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.7 สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่างๆโดยใช้โปรแกรม Design-Expert พบว่าจากการคำนวณจะบ่งบอกถึงปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ซึ่งจะได้ว่าปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วกับอัตราการป้อนก็สตัวพากับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Liquid yield} = 68.93 + 2.58A - 1.10B + 2.38D - 1.10BD + 2.00BCD$$

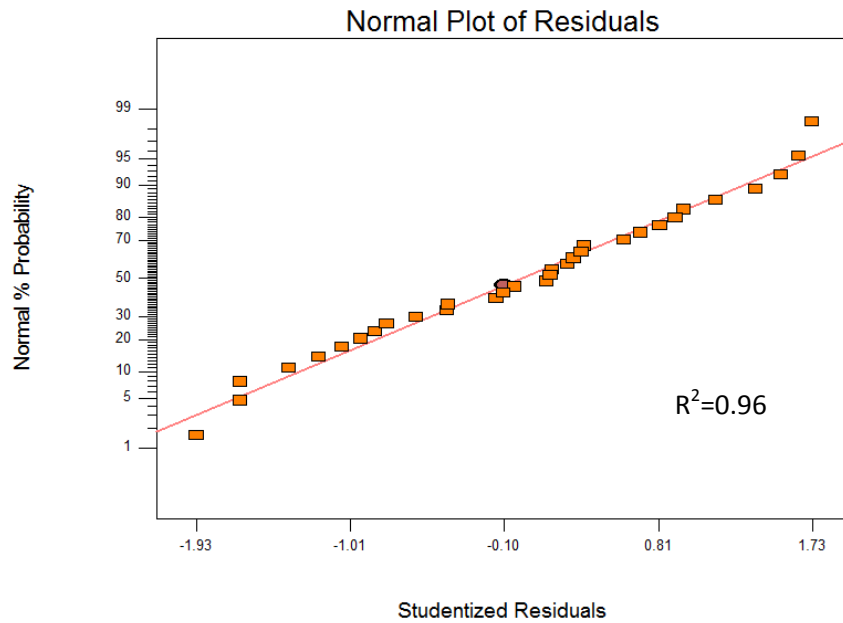
4.3.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

**ตารางที่ 4.8** ร้อยละผลได้ของดีเซลที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของดีเซล (%wt)
	อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว (mL/hr), A	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C), B	อัตราการป้อนแก๊สตัวพา (mL/min), C	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%v/v), D	
	1	60	380	100	
2	60	380	100	30	25.67
3	180	380	100	30	21.82
4	180	380	100	30	22.89
5	60	430	100	30	36.48
6	60	430	100	30	37.74
7	180	430	100	30	21.66
8	180	430	100	30	19.78
9	60	380	300	30	40.51
10	60	380	300	30	41.32
11	180	380	300	30	32.50
12	180	380	300	30	35.13
13	60	430	300	30	17.12
14	60	430	300	30	18.74
15	180	430	300	30	30.14
16	180	430	300	30	29.97
17	60	380	100	60	31.66
18	60	380	100	60	30.97

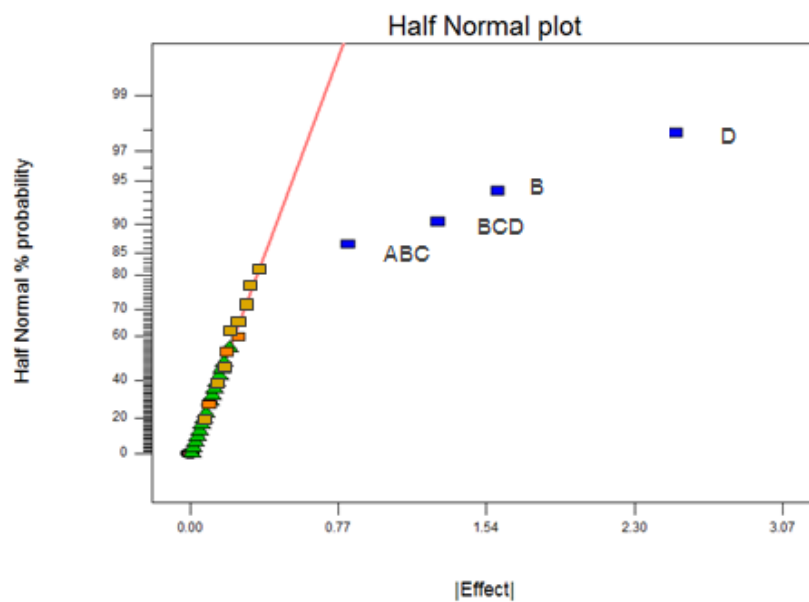
ตารางที่ 4.8 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของดีเซลที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหาร  
ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของดีเซล (%wt)
	อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว (mL/hr), A	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C), B	อัตราการป้อนแก๊สตัวพา (mL/min), C	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%v/v), D	
19	180	380	100	60	42.75
20	180	380	100	60	43.98
21	60	430	100	60	29.83
22	60	430	100	60	31.05
23	180	430	100	60	26.69
24	180	430	100	60	24.06
25	60	380	300	60	43.81
26	60	380	300	60	42.98
27	180	380	300	60	23.98
28	180	380	300	60	25.67
29	60	430	300	60	33.49
30	60	430	300	60	35.03
31	180	430	300	60	26.17
32	180	430	300	60	27.98
33	120	405	200	45	28.75
34	120	405	200	45	29.17
35	120	405	200	45	30.83



ภาพที่ 4.6 Normal probability plot of residuals ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซล

ภาพที่ 4.6 แสดงความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ถูกนำมาทำการศึกษ พบว่าค่า  $R^2=0.96$  และเข้าใกล้ 1 สามารถบอกได้ว่าข้อมูลที่เราศึกษามีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปศึกษาได้



ภาพที่ 4.7 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซล

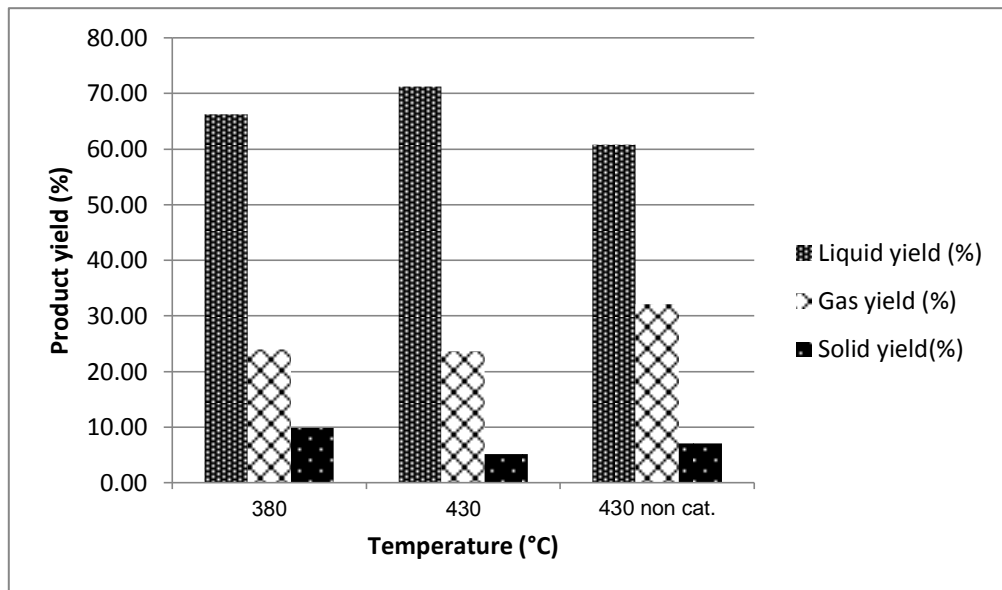
ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซล

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F value	Prob >F value
Model	1743.08	4	249.01	42.98	<0.0001
B	133.70	1	133.70	23.08	<0.0001
D	219.84	1	219.84	37.95	<0.0001
ABC	129.90	1	129.90	22.42	<0.0001
BCD	80.14	1	80.14	13.83	<0.0001
Residual	139.04	14	0.79		
Total	1882.12	19			

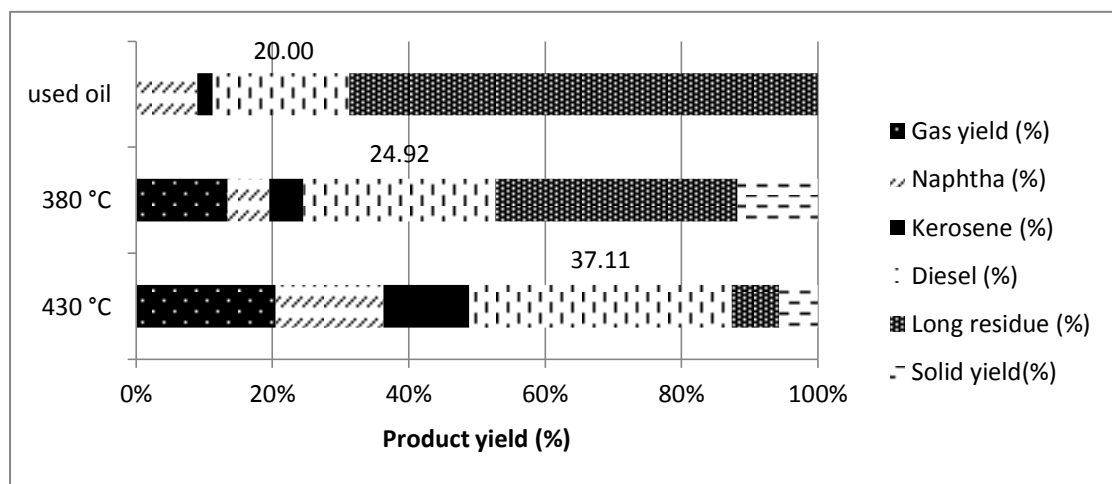
ตารางที่ 4.9 สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่างๆโดยใช้โปรแกรม Design-Expert พบว่าจากการคำนวณจะบ่งบอกถึงปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ซึ่งจะได้ว่าปัจจัยอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว อัตราการป้อนแก๊สตัวพา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอัตราการป้อนแก๊สตัวพากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอัตราการป้อนแก๊สตัวพากับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซล ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Diesel yield} = 30.49 - 2.62B + 2.01D - 1.58ABC + 3.08BCD$$

#### 4.3.3 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว



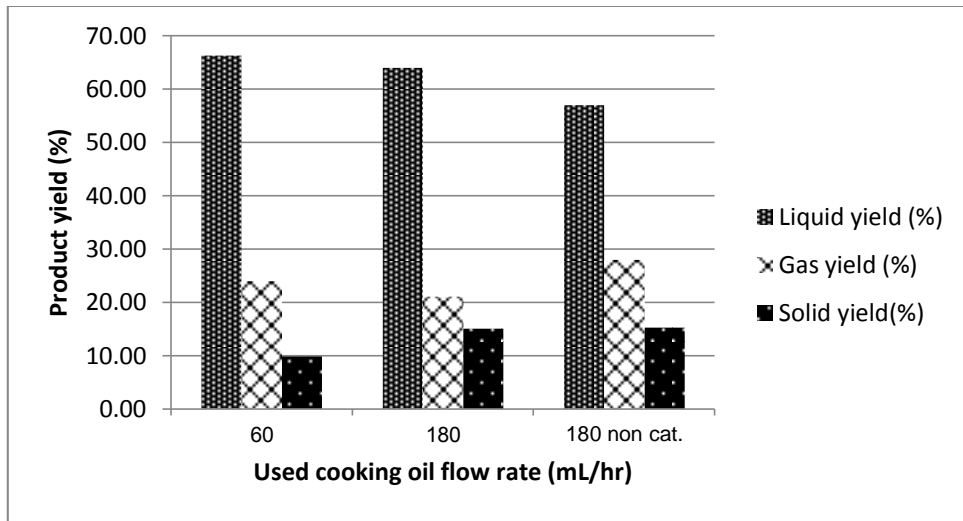
**ภาพที่ 4.8** ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหาร 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100 มิลลิลิตรต่อ นาที และอุณหภูมิ 380 และ 430 องศาเซลเซียส เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับ บนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 30 โดยปริมาตรและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (\*))



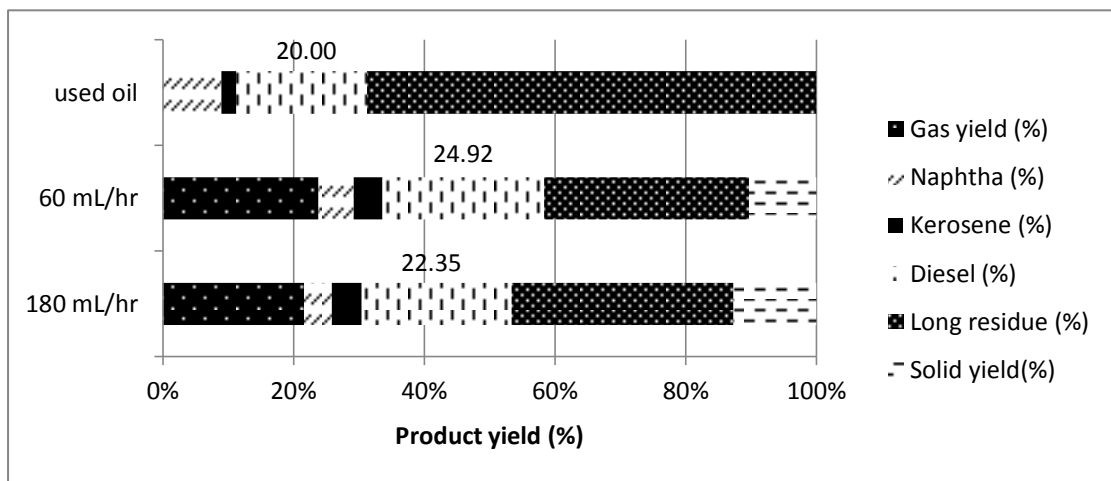
**ภาพที่ 4.9** องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหาร 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100 มิลลิลิตรต่อ นาที และอุณหภูมิ 380 และ 430 องศาเซลเซียส เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับ บนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 30 โดยปริมาตร)

จากภาพแสดงผลการศึกษาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วที่อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเริ่มต้น 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงอัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100 มิลลิลิตรต่อนาที และอุณหภูมิ 380 และ 430 องศาเซลเซียส เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 30 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 380 องศาเซลเซียสเป็น 430 องศาเซลเซียสจะได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเพิ่มขึ้นจาก 66.21 เป็น 71.19 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียสจะได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวลดลง 60.75 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้การแตกตัวโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวผ่านกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชันมากขึ้น ทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลยาวเกิดการแตกตัวเป็นสายโซ่ที่มีขนาดกลางได้มากขึ้น ก่อนที่อุณหภูมิที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวด้วยความร้อนจะมีผลต่อการแตกตัวต่อไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก จึงส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสูงมากขึ้น และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลว พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 380 องศาเซลเซียสเป็น 430 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์ดีเซลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 24.92 เป็น 37.11 โดยน้ำหนักและเมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ร้อยละ 31.75 โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิมิผลต่อการแตกตัวอย่างมาก โดยเกิดเป็นเรดิเคิลต่อเนื่องทำให้ได้โมเลกุลขนาดเล็ก ในขณะที่ยังให้อุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่องจะทำให้โมเลกุลขนาดเล็กไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน ในขณะที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีส่วนช่วยในการแตกตัว โดยจะมีบทบาทในการถ่ายโอนไฮโดรเจนและเกิดการแตกตัวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

4.3.4 ผลของความอัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว



ภาพที่ 4.10 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนน้ำมันใช้แล้ว (อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 60 และ 180 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 30 โดยปริมาตรและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (\*))

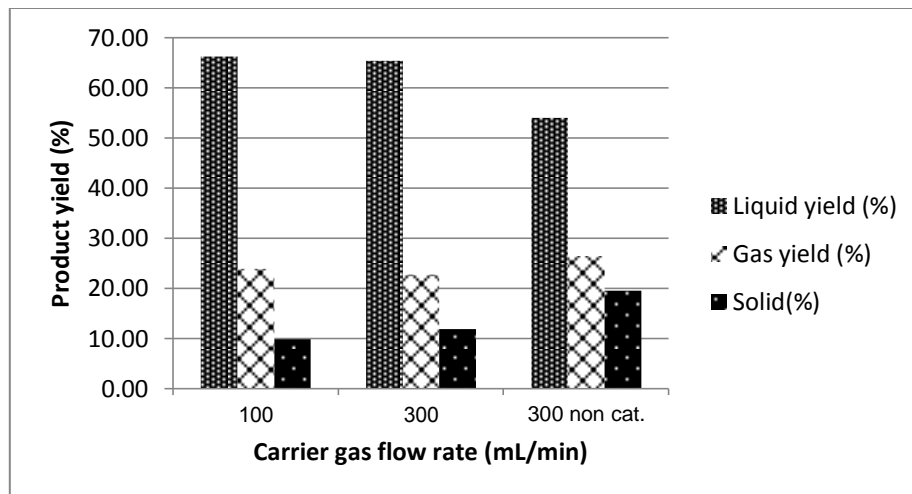


ภาพที่ 4.11 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนน้ำมันใช้แล้ว (อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 30 โดยปริมาตรและอัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 60 และ 180 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)

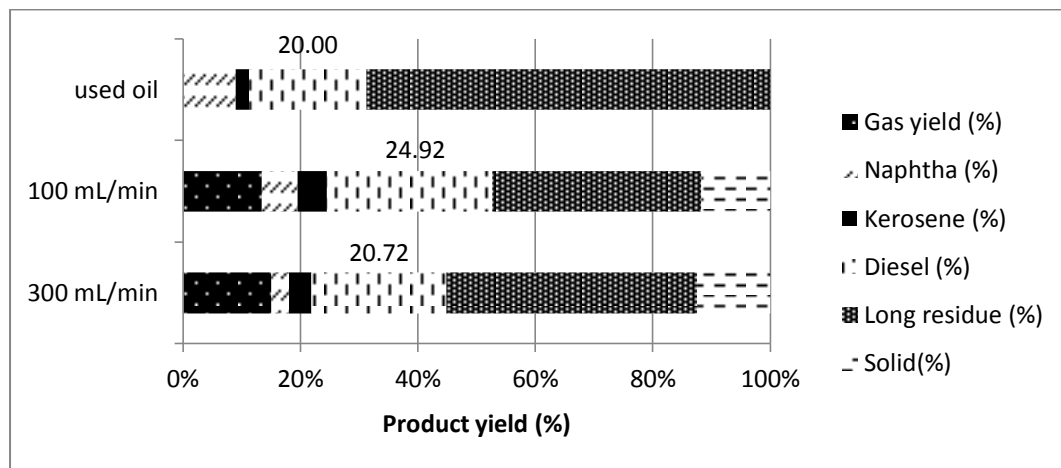


ภาพที่ 4.10 แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 30 โดยปริมาตรและอัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 60 และ 180 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 30 โดยปริมาตร และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่ออัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเพิ่มขึ้นจะได้อัตราผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวลดลงจาก 66.21 เป็น 63.97 โดยน้ำหนัก และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว พบว่าเมื่ออัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเพิ่มขึ้นจะได้ผลิตภัณฑ์ดีเซลลดลงจากร้อยละ 24.92 เป็น 22.35 โดยน้ำหนัก เพราะการเพิ่มอัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็นการเพิ่มปริมาณสารในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลใหญ่เป็นโมเลกุลเล็กไม่สมบูรณ์ และถูกพาออกไป ในขณะที่บางโมเลกุลอาจจะยังไม่เกิดกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน ทำให้ยังคงเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ซึ่งจะสังเกตได้ว่าองค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวยังคงเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่เมื่อมีการเพิ่มอัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

4.3.5 ผลของอัตราการป้อนแก๊สดั่วพาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว



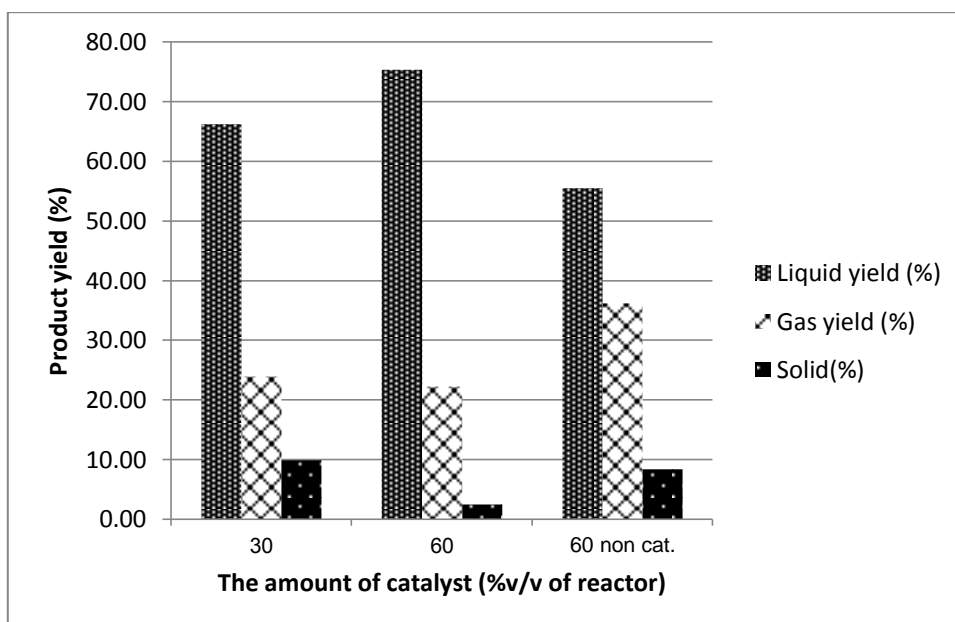
ภาพที่ 4.12 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนแก๊สดั่วพา (อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง โดยปริมาตรและอัตราการป้อนแก๊สดั่วพา 100 และ 300 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 30 โดยปริมาตรและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (\*))



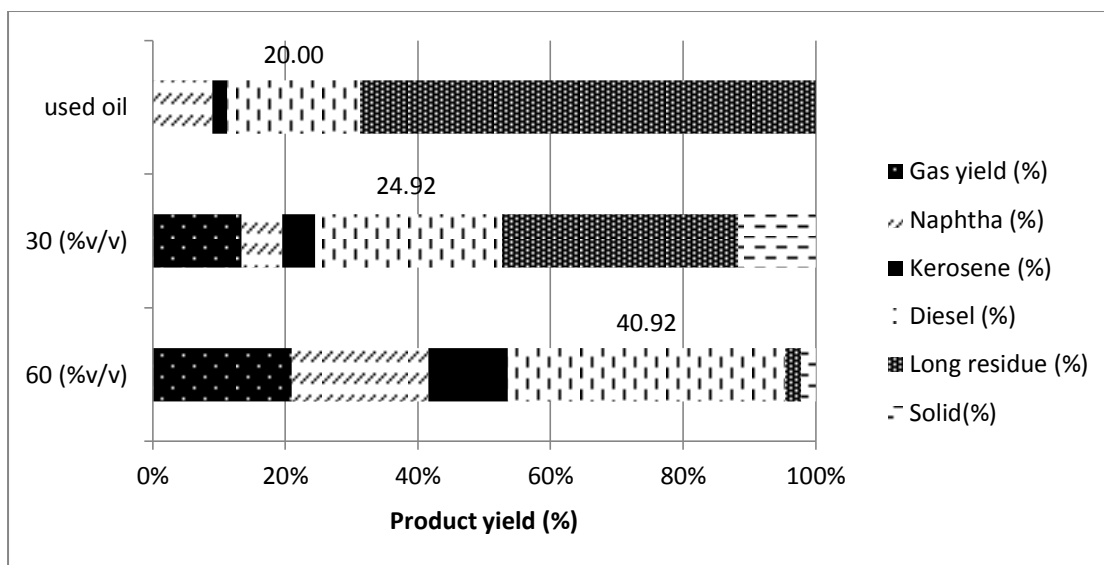
ภาพที่ 4.13 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนแก๊สดั่วพา (อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 30 โดยปริมาตรและอัตราการป้อนแก๊สดั่วพา 100 และ 300 มิลลิลิตรต่อนาที)

ภาพที่ 4.12 แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100 และ 300 มิลลิลิตรต่ออนาที เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 30 โดยปริมาตรและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่ออัตราการป้อนแก๊สตัวพาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวลดน้อยลงจาก 66.21 เป็น 65.34 โดยน้ำหนัก และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนแก๊สตัวพาในการทำปฏิกิริยาจะทำให้เวลาในการทำปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ทำให้การเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันยังเกิดได้ไม่สมบูรณ์ทำให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลลดน้อยลง แต่ยังคงเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่อยู่ซึ่งจะลดลงจาก 24.92 เป็น 20.72 โดยน้ำหนัก

#### 4.3.6 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว



ภาพที่ 4.14 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 100 มิลลิลิตรต่ออนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 30 และ 60 โดยปริมาตรและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (\*))



ภาพที่ 4.15 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 100 มิลลิลิตรต่อนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 30 และ 60 โดยปริมาตร)

ภาพที่ 4.14 แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 100 มิลลิลิตรต่อนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 30 และ 60 โดยปริมาตรและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเพิ่มขึ้น จาก 66.21 เป็น 75.18 โดยน้ำหนัก และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว พบว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ได้ปริมาณร้อยละผลได้ของดีเซลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 24.92 เป็น 40.92 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นทำให้มีประสิทธิภาพในการสับสนูให้เกิดกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชันทำให้เกิดการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลที่เล็กลง ทำให้ได้องค์ประกอบดีเซลเพิ่มมากขึ้น และจะสังเกตได้ว่าองค์ประกอบของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวลดน้อยลง

#### 4.4 คำแนะนำภาวะเหมาะสมของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว เป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ด้วยโปรแกรม Design-Expert

4.4.1 คำแนะนำภาวะเหมาะสมของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ด้วยโปรแกรม Design-Expert

**ตารางที่ 4.10** ขอบเขตของการหาภาวะเหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert ของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Unit
Temperature	is in range	380	430	°C
Used oil flow rate	is in range	60	180	mL/hr
Catalyst	is in range	30	60	%v/v
Carrier gas flow rate	is in range	100	300	mL/min
Yield Liquid	minimize	53.50	78.94	%wt
Yield Gas	maximize	11.46	20.54	%wt
Yield Naphtha	maximize	1.74	20.17	%wt
Yield Kerosene	maximize	3.08	11.86	%wt
Yield Diesel	maximize	17.12	43.82	%wt

เมื่อหาภาวะที่เหมาะสม โดยพิจารณาค่าตอบสนองของเพียง 5 ค่าคือค่าร้อยละผลได้ของแก๊ส ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทา ค่าร้อยละผลได้ของเคโรซีนและค่าร้อยละผลได้ของดีเซล โดยจะพิจารณาให้มีค่าร้อยละผลได้ของแก๊สที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด โดยค่าตอบสนองที่เหลือ ได้แก่ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทา ค่าร้อยละผลได้ของเคโรซีนและค่าร้อยละผลได้ของดีเซลพิจารณาให้ได้ค่ามากที่สุดโดยใช้โปรแกรม Design-Expert ในการหาภาวะที่เหมาะสม สำหรับการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรมแสดงดังตารางที่ 4.10 ภาวะที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.11 คือ ที่อุณหภูมิ 429.99 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 66.60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100.03 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบน

ถ่านกัมมันต์ร้อยละ 60.00 โดยน้ำหนัก จะทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้ของแก๊ส 15.42 โดยน้ำหนัก และค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจะได้ร้อยละ 74.78 โดยน้ำหนัก ผลได้ของแอฟทาร้อยละ 20.17 โดยน้ำหนัก ผลได้ของเคโรซีนร้อยละ 10.39 โดยน้ำหนักและผลได้ของดีเซลร้อยละ 43.82 โดยน้ำหนัก

**ตารางที่ 4.11** ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert ของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

ตัวแปร	ภาวะจากโปรแกรม
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	429.99
อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)	66.60
อัตราการป้อนแก๊สตัวพา (มิลลิลิตรต่อนาที)	100.03
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยปริมาตร)	60.00
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	74.78
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	15.42
ร้อยละผลได้แอฟทา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	20.17
ร้อยละผลได้เคโรซีน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	10.39
ร้อยละผลได้ดีเซล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	43.82

หลังจากได้ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรมแล้วจึงนำมาทำการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโปรแกรม แสดงดังตารางที่ 4.12 ซึ่งจะพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert

ตารางที่ 4.12 ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง

ตัวแปร	ภาวะจากโปรแกรม	ทดลองจริง
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	429.99	430
อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)	66.60	60
อัตราการป้อนแก๊สตัวพา (มิลลิลิตรต่อนาที)	100.03	100
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยปริมาตร)	60.00	60
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	74.78	72.50
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	15.42	16.35
ร้อยละผลได้เนฟทา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	20.17	19.85
ร้อยละผลได้เคโรซีน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	10.39	8.08
ร้อยละผลได้ดีเซล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	43.82	42.75

#### 4.5 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Total acid value) ของเชื้อเพลิงเหลว

ตารางที่ 4.13 ค่าความเป็นกรด (Total acid value) ของเชื้อเพลิงเหลว

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)
ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา	20.35
แมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์	0.35

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการแก๊สตัวพา 100 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าเมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาค่าความเป็นกรดของเชื้อเพลิงเหลวมีค่าสูงถึง 20.35 mg KOH/g แต่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสทำให้ได้ค่าความเป็นกรดของเชื้อเพลิงเหลวลดลงอย่างมาก โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ได้ค่าความเป็นกรดต่ำที่สุดคือ 0.35 mg KOH/g เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียม

ออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์มีความเป็นเบสสูง และทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลิกในสารตั้งต้นทำให้ความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง

#### 4.6 วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ CHO ของเชื้อเพลิงเหลว

ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบธาตุ CHO ของเชื้อเพลิงเหลว

ตัวเร่งปฏิกิริยา	C	H	O
Pure oil	78.32	11.615	10.065
แมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์	80.765	12.93	6.305
ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา	80.82	11.28	7.9

ตารางที่ 4.14 แสดงองค์ประกอบธาตุ CHO พบว่าออกซิเจนของ pure oil มีปริมาณสูง แต่เมื่อทำปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาปริมาณธาตุลดลง ทั้งนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมัน ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดน้อยลง เนื่องจากสารตั้งต้นมีหมู่คาร์บอกซิลิกทำให้มีองค์ประกอบของออกซิเจนจำนวนมาก แต่เมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ จะเกิดการแตกโมเลกุลของหมู่คาร์บอกซิลิกเป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีองค์ประกอบของออกซิเจนต่ำลง

#### 4.7 วิเคราะห์ค่าไอโอดีนและปริมาณน้ำของเชื้อเพลิงเหลว

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนและปริมาณน้ำในเชื้อเพลิงเหลว

ชนิดน้ำมัน	ค่าไอโอดีน (g/100g)	ปริมาณน้ำ (%wt)
เชื้อเพลิงเหลว	35.48	0.41

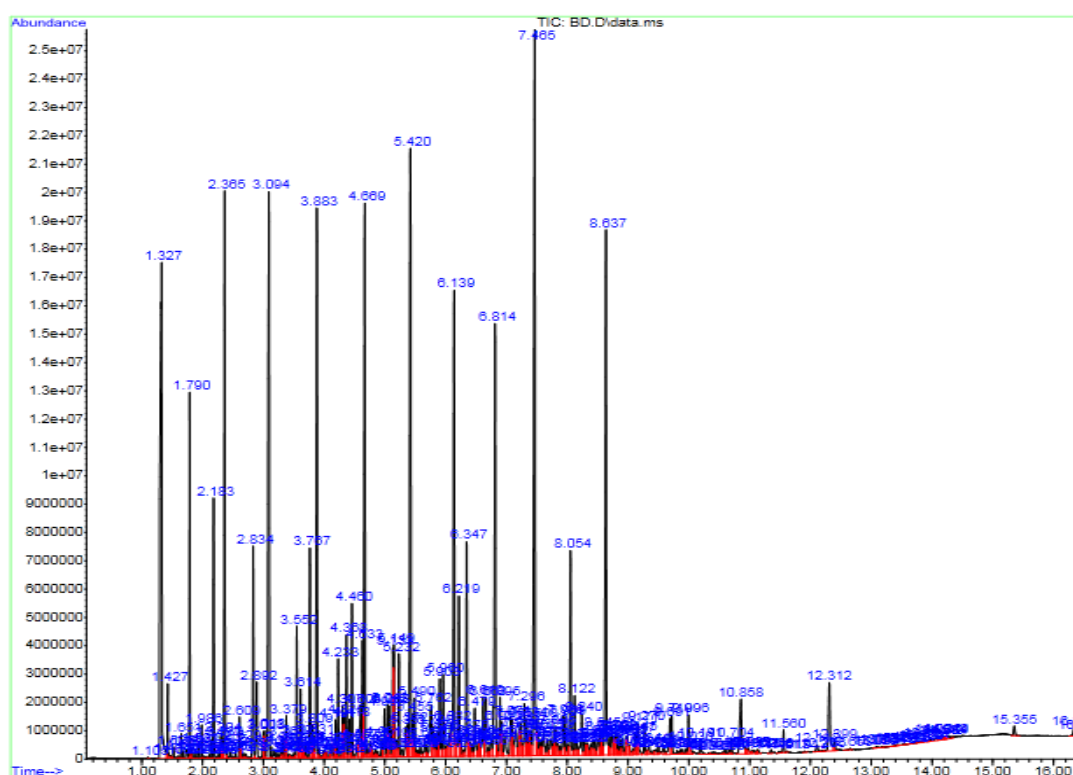
ตารางที่ 4.15 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนและปริมาณน้ำ ของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการภาวะอัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส พบว่าค่าไอโอดีนของน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้วมีค่า 35.48 กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัม น้ำมัน ซึ่งต่ำกว่า 120 กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัม น้ำมัน ซึ่งเป็นไปตามที่กระทรวงพลังงานได้กำหนด และมีปริมาณน้ำร้อยละ 0.41 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าสูง



กว่าตามประกาศของกระทรวงพลังงานทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการผ่านกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งจะเกิดน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมผ่านกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน

#### 4.8 วิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

จากการวิเคราะห์น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography – Mass spectrometer, GC-MS: QP2010)



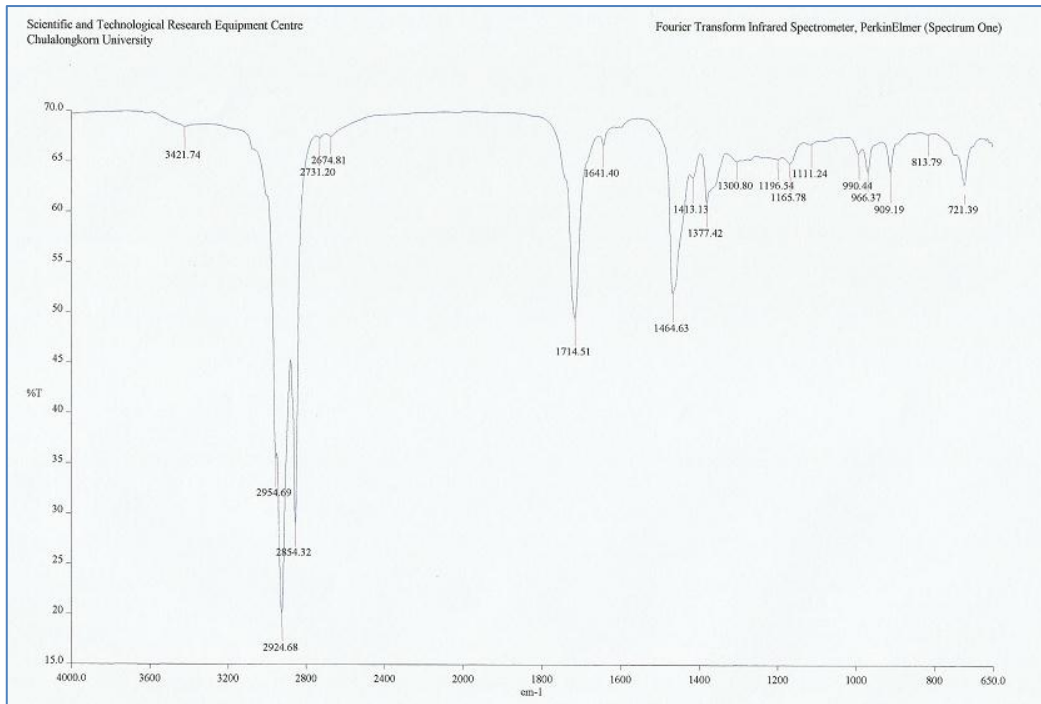
ภาพที่ 4.16 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบแมสสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 4.16 องค์ประกอบของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบแมสสเปกโตรมิเตอร์

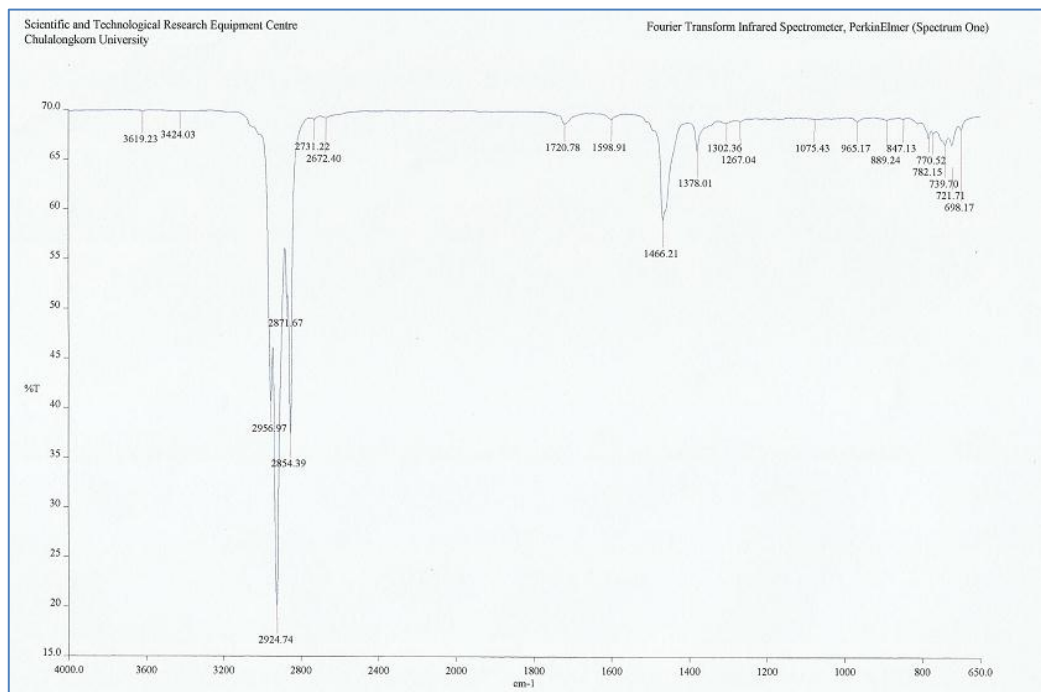
พีค	องค์ประกอบ	สูตรเคมี
1.791	Heptane	$C_7H_{16}$
2.181	Toluene	$C_7H_8$
2.363	Octane	$C_8H_{18}$
2.836	Ethylbenzene	$C_8H_{10}$
3.096	Nonane	$C_9H_{20}$
3.885	Decane	$C_{10}H_{22}$
4.670	Undecane	$C_{11}H_{24}$
5.420	Dodecane	$C_{12}H_{26}$
6.139	Tridecane	$C_{13}H_{28}$
6.816	Tetradecane	$C_{14}H_{30}$
7.466	Pentadecane	$C_{15}H_{32}$
8.056	Hexadecane	$C_{16}H_{34}$
8.637	Heptadecane	$C_{17}H_{36}$

ตารางที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลว เมื่อผ่านกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ จะได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทอัลเคนเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันในช่วงแรกให้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง และเกิดการแตกตัวต่อไปโดยอิทธิพลจากอุณหภูมิและการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จึงส่งผลต่อการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอน

#### 4.9 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเชื้อเพลิงเหลวด้วยเทคนิค FTIR



ภาพที่ 4.17 หมู่ฟังก์ชันที่พบในเชื้อเพลิงเหลวเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค FTIR



ภาพที่ 4.18 หมู่ฟังก์ชันที่พบในเชื้อเพลิงเหลวเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค FTIR

จากภาพที่ 4.17 และภาพที่ 4.18 จะพบว่าหมู่ฟังก์ชันหลักที่พบในเชื้อเพลิงเหลวที่ผ่านการแตกตัวโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ พบว่าเชื้อเพลิงเหลวที่ผ่านการแตกตัวโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิวที่  $1746\text{ cm}^{-1}$  หมู่ฟังก์ชัน C=C แอโรแมติกที่  $1464\text{ cm}^{-1}$  หมู่ฟังก์ชัน CH ในอะลิฟาติกที่  $2800-3000\text{ cm}^{-1}$  และหมู่ฟังก์ชัน CH ในแอโรแมติกที่  $3000-3100\text{ cm}^{-1}$  แต่เมื่อผ่านการแตกตัวเชิงเร่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ จะพบว่าหมู่คาร์บอนิลจะมีจำนวนลดลงเนื่องจากเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ร่วมคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน

#### 4.10 การวิเคราะห์ค่าความร้อนและค่าความหนืดของเชื้อเพลิงเหลว

ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและค่าความหนืดที่ 25 องศาเซลเซียส

ชนิดน้ำมัน	ค่าความร้อน (KJ/Kg)	ค่าความหนืด (cSt)
น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว	37,540	45.19
เชื้อเพลิงเหลว	39,550	4.15

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและค่าความหนืด (ASTM D2270) ของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการที่ภาวะอัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความร้อนของน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้วมีค่าสูงเหมาะสมในการนำมาใช้สำหรับการผลิตพลังงานทางเลือก แต่มีค่าความหนืดสูงกว่าทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวปริมาณมาก แต่เมื่อนำมาผ่านกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ พบว่าจะได้เชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าความร้อนสูงขึ้นและค่าความหนืดลดลง

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว บนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยทำการศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อการเกิดเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งเราสนใจหาภาวะที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ดีเซลมากที่สุด โดยได้ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ ซึ่งปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ 380 และ 430 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 60 และ 180 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนแก๊สตัวพาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 100 และ 300 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 30 และ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อหาภาวะที่ได้ผลิตภัณฑ์ดีเซลมากที่สุด สามารถสรุปการทดลองได้ดังนี้ จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Design-Expert พบว่าภาวะที่ให้ผลการตอบสนองของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์มากที่สุดคือ อุณหภูมิ 429.99 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 66.60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100.03 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ จากการทดลองจริงในภาวะที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert บนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์จะได้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว 72.50 โดยน้ำหนักร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซล 42.75 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนทำให้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีค่าความเป็นกรดลดน้อยลงทำให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงเชื้อเพลิงดีเซลที่ใช้ในปัจจุบัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาน้ำมันที่ได้จากพืชชนิดอื่นๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
2. ศึกษ ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสอื่นๆ ที่อาจส่งผลได้ดีกว่า รวมถึงกระบวนการนำตัวเร่งปฏิกิริยานั้นนำกลับมาใช้ใหม่ได้
3. ศึกษาการแยกองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ซึ่งประกอบไปด้วยดีเซล คีโรซีน แนฟทา
4. ศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเมื่อเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่น
5. ศึกษาการนำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ไปใช้กับเครื่องยนต์ชนิดต่างๆ
6. ศึกษาภาวะการไฟโรไลซิสด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิที่ทำการศึกษา ซึ่งต้องทำการปรับปรุงแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า เพื่อให้ความร้อนเข้าสู่ตัวเตาปฏิกรณ์ได้มากขึ้น
7. ศึกษาภาวะการไฟโรไลซิสด้วยด้วยอัตราการป้อนแก๊สตัวพาที่ต่ำกว่าภาวะที่ทำการศึกษา ซึ่งต้องมีการปรับขนาดของตัวควบคุมการจ่ายแก๊สตัวพา เพื่อให้สามารถลดอัตราการป้อนแก๊สตัวพาให้ต่ำลงได้

## รายการอ้างอิง

- [1] วิฤทธิพลังงาน. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.sgl1.com> [19 มกราคม 2556]
- [2] ราคาน้ำมันปิโตรเลียม. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/index-T.html>  
[19 มกราคม 2556]
- [3] ปิโตรเลียม. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/ปิโตรเลียม> [19 มกราคม 2556]
- [4] ปิโตรเลียมและการผลิต. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK24/chapter7/t24-7-11.html> [19 มกราคม 2556]
- [5] พาราฟิน. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu> [20 มกราคม 2556]
- [6] แนฟทีน. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: [http://www.eoearth.org/article/Petroleumcrude\\_oil?Topic=49478](http://www.eoearth.org/article/Petroleumcrude_oil?Topic=49478) [20 มกราคม 2556]
- [7] แอโรมาติก. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.oknation.net/blog/print.php?id=196999>  
[20 มกราคม 2556]
- [8] พลังงานทดแทน. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www1.mod.go.th/opsd/dedweb/energy/about/meaning%20and%20type/meaning.htm> [23 มกราคม 2556]
- [9] ความรู้เรื่องพลังงาน. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://theenergy.biz/forum/index.php?topic=23.0> [23 มกราคม 2556]
- [10] ข้อมูลพลังงานทดแทนจาก NSTDA. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: [http://www.nstda.or.th/component / search /พลังงานทดแทน/?areas%5B0%5D=content&searchphrase=all](http://www.nstda.or.th/component/search/พลังงานทดแทน/?areas%5B0%5D=content&searchphrase=all) [23 มกราคม 2556]
- [11] พลังงานทดแทน พลังงานชีวมวล. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://kuttiya.wordpress.com/2012/01/10/%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/> [23 มกราคม 2556]
- [12] นโยบายพลังงานของประเทศไทย. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://e-nett.sut.ac.th/download/IVP/IVP04.pdf> [23 มกราคม 2556]
- [13] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.energy.go.th> [23 มกราคม 2556]

- [14] คุณสมบัติน้ำมันพืช. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.sc.mahidol.ac.th/wiki/doku.php?id=%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3%E0%B8%A1%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B8%9E%E0%B8%B7%E0%B8%8A> [1 กุมภาพันธ์ 2556]
- [15] Arjun B. Chhetri, K. Chris Watts and M. Rafiqul Islam, "Waste Cooking Oil as an Alternate Feedstock for Biodiesel Production." *Energies*, Vol. 1, 2008, pp. 3-18.
- [16] Graboski M.S. and McCormick R.L. "Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines." *Progress Energy Combustion Science*, Vol. 24, 1998, pp. 125-164.
- [17] น้ำมันใช้แล้ว. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.google.co.th/search?q=%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3%E0%B8%A1%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B9%83%E0%B8%8A%E0%B9%89%E0%B9%81%E0%B8> [1 กุมภาพันธ์ 2556]
- [18] ภัยจากน้ำมันทอดซ้ำ. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.moph.go.th> [1 กุมภาพันธ์ 2556]
- [19] สำนักบริการวิชาการ ม.บูรพา [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.uniserv.buu.ac.th/forum2/topic.asp?TOPICID=696> [1 กุมภาพันธ์ 2556]
- [20] Family Health Avenue. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.familyhealthavenue.com/2009/04/know-something-about-triglycerides/> [1 กุมภาพันธ์ 2556]
- [21] โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.vcharkarn.com/lesson/view.php?id=1469> [1 กุมภาพันธ์ 2556]
- [22] อันตรายจากการทอดซ้ำ. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.goldenplace.co.th/article11.php> [1 กุมภาพันธ์ 2556]
- [23] เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel). [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.vcharkarn.com/varticle/374> [1 กุมภาพันธ์ 2556]
- [24] Climatelab beta-Biofuels. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://climatelab.org/Biofuels> [1 กุมภาพันธ์ 2556]
- [25] นวัตกรรมการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากชีวมวลที่ไม่ใช่อาหารและการใช้ในยานยนต์. 2555. กรุงเทพฯ: National Metal and Materials Technology Center.
- [26] วัฏจักรของเชื้อเพลิงชีวภาพ [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.extension.org/pages/26614/life-cycle-analysis-for-biofuels> [1 กุมภาพันธ์ 2556]



- [27] Haruki TANI, Makoto SHIMOUCI, Hiroyuki HAGA, and Kaoru FUJIMOTO, "Development of Direct Production Process of Diesel Fuel from Vegetable Oils" Journal of the Japan Institute of Energy 90 (2011) 466-470.
- [28] การเกิดกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://vcharkarn.com/varticle/37458> [7 กุมภาพันธ์ 2556]
- [29] Gary J.H., Handwerk G.H. Catalytic Hydrocracking and Hydroprocessing. New York: Marcel Dekker, 1994
- [30] จตุพร วิทยาคูณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547. การเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ หน้า 1-11, 43-47
- [31] วิทยา เรืองพรวิสุทธิ 2554. เคมีพื้นผิวและปฏิกิริยาเร่ง กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ที่อป หน้า 65-76
- [32] J.A. Moulijn, P.W.N.M. van Leeuwen and R.A. van Santen. 1993. "Catalysis an Integrated Approach to Homogeneous, Heterogeneous and Industrial Catalysis." Amsterdam : Elsevier Science Publishers B.V.
- [33] J. Garcia, T. Lopez, M. Alvarez, D.H. Aguilar, P. Quintana, "Spectroscopic, Structural and Textural Properties of CaO and CaO-SiO<sub>2</sub> Materials Synthesized by Sol-Gel with Different Acid Catalysts." Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 354, 2008, pp. 729-732.
- [34] WebElements. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: [http://www.webelements.com/compounds/calcium/calcium oxide.html](http://www.webelements.com/compounds/calcium/calcium%20oxide.html) [7 กุมภาพันธ์ 2556]
- [35] ภาวิณี พงษ์วัน มัทธนา กะชา วินิช พรหมอารักษ์ และทวีศักดิ์ สูดยอดสุข. 2554. "การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ก้อนแข็งทรงลูกบาศก์สำหรับผลิตไบโอดีเซล" วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภาควิชาเคมี และศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [36] H. Tani, T. Hasegawa, M. Shimouchi, K. Asami and K. Fujimoto, "Selective catalytic decarboxy-cracking of triglyceride to middle-distillate hydrocarbon." Catalysis Today, Vol. 164, 2011, pp. 410-414.
- [37] ณรงค์เดช สุวรรณดาด และณัฐวุฒิ กวีวิวิชัย. 2544. การสลายตัวของพอลิไอโซพรีน โดยใช้ของแข็งเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- [38] Bruce C. Gates. 1992. "Catalytic Chemistry." University of Delaware: John Wiley&Sons. pp. 320-326.
- [39] K.sugiyama, A.Aoki and T.Matsuda. "Synthesis of Magnesium Oxide Catalyst in a Microwave Plasma Reactor." Japan: Saitama University. pp. 820-824.
- [40] พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยา [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://dc345.4shared.com/doc/IBziOHlt/preview.html> [10 กุมภาพันธ์ 2556]
- [41] BET Surface Area Analysis of Nanoparticles. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://cnx.org/content/m38278/latest/> [10 กุมภาพันธ์ 2556]
- [42] BET Surface Area Analysis of Nanoparticles [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://cnx.org/content/m38278/latest/> [10 กุมภาพันธ์ 2556]
- [43] A.V. Bridgwater, G.V.C. Peacocke "Fast pyrolysis processes for biomass" Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.4, 2000, pp.1-73
- [44] Peter A. Brownsort. 2009. "Biomass Pyrolysis Processes: Performance Parameters and Their Influence on Biochar System Benefits" Master of Science, University of Edinburgh, Scotland, United Kingdom
- [45] พรชัย คดีกำจร. 2550. การพัฒนากระบวนการไพโรไลซิสยางธรรมชาติเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันสำหรับยานยนต์ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
- [46] ปราโมทย์ ไชยเวช. 2548. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 391-412
- [47] วีระ เปรมโยธิน. เชื้อเพลิงและปิโตรเคมี. ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2534
- [48] Takuya Ito, Yusuke Sakurai, Yusuke Kakuta, Motoyuki Sugano, Katsumi Hirano, "Biodiesel production from waste animal fats using pyrolysis method" Fuel Processing Technology 94 (2012) 47–52
- [49] Xu Junming, Jiang Jianchun, Sun Yunjuan, Chen Jie, "Biofuel production from catalytic cracking of woody oils" Bioresource Technology 101 (2010) 9803–9806
- [50] Xu Junming, Jiang Jianchun, Sun Yunjuan, Chen Jie, "Production of hydrocarbon fuels from pyrolysis of soybean oils using a basic catalyst" Bioresource

Technology 101 (2010) 9803–9806

- [51] Denghui Wang, Rui Xiao, Huiyan Zhang, Guangying He, “Comparison of catalytic pyrolysis of biomass with MCM-41 and CaO catalysts by using TGA–FTIR analysis” Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 89 (2010) 171–177
- [52] วิชชากร จารุศิริ. 2551 การแตกตัวของพลาสติก น้ำมันพืช และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยความร้อนเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [53] มาริษา มงคล. 2546. การแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์และ HZSM-5 วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [54] นิสา วิสุทธิรังษีอุไร 2549 การแตกตัวด้วยความร้อนของพอลิสไตรีน และน้ำมันพืชใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [55] Raphael O. et. al. “Catalytic conversion of canola oil to fuels and chemicals: roles of catalyst acidity, basicity and shape selectivity on product distribution” Fuel Processing Technology, Vol. 51, 1997, pp. 101-125
- [56] Niken Taufiqurrahmi et. al. “Production of biofuel from waste cooking palm oil using nanocrystalline zeolite as catalyst: Process optimization studies” Bioresource Technology, Vol. 102, 2011, pp. 10686-10694
- [57] Stella Bezergianni et. al. “Catalyst evaluation for waste cooking oil hydroprocessing” Fuel, Vol. 93, 2012, pp. 638-641

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ก1 ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์  
รองรับบนถ่านกัมมันต์

Experiment no.	Parameter				Product yield (%wt)			Product distribution (%wt)		
	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Time (minute)	Catalyst (%wt)	Liquid yield (%wt)	Gas yield (%wt)	Solid yield (%wt)	Naphtha Yield (%wt)	Kerosene yield (%wt)	Diesel yield (%wt)
1	60	380	100	30	65.75	23.89	10.36	5.92	4.93	24.16
2					66.67	23.98	9.35	4.89	3.90	25.67
3	180	380	100	30	64.17	21.46	14.37	4.49	4.65	21.82
4					63.77	20.58	15.65	3.87	4.15	22.89
5	60	430	100	30	70.83	23.71	5.46	15.76	11.86	36.48
6					71.54	23.60	4.86	14.78	12.33	37.74
7	180	430	100	30	66.13	22.62	11.26	2.31	3.14	21.66
8					64.55	22.92	12.53	2.98	3.88	19.78

ตาราง ก1 (ต่อ) ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

Experiment no.	Parameter				Product yield (%wt)			Product distribution (%wt)		
	Temperature	Pressure	Time	Catalyst	Liquid yield	Gas yield	Solid yield	Naphtha Yield	Kerosene yield	Diesel yield
	(°C)	(bar)	(minute)	(%wt)	(%wt)	(%wt)	(%wt)	(%wt)	(%wt)	(%wt)
9	60	380	300	30	74.33	23.54	2.13	20.44	11.52	40.51
10					76.23	20.91	2.86	19.98	11.98	41.32
11	180	380	300	30	68.78	25.07	6.15	9.29	7.74	32.50
12					67.88	25.04	7.08	9.97	6.53	35.13
13	60	430	300	30	53.50	27.94	18.56	1.74	3.08	17.12
14					51.88	28.57	19.55	2.25	2.57	18.74
15	180	430	300	30	71.77	20.92	7.32	9.69	6.82	30.14
16					73.09	21.31	5.60	8.77	7.76	29.97
17	60	380	100	60	67.36	26.88	5.76	10.27	8.59	31.66
18					67.44	28.00	4.56	12.56	6.68	30.97

ตาราง ก1 (ต่อ) ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

Experiment no.	Parameter				Product yield (%wt)			Product distribution (%wt)		
	Temperature	Pressure	Time	Catalyst	Liquid	Gas	Solid	Naphtha	Kerosene	Diesel
	(°C)	(bar)	(minute)	(%wt)	yield (%wt)	yield (%wt)	yield (%wt)	Yield (%wt)	yield (%wt)	yield (%wt)
19	180	380	100	60	71.85	27.00	1.15	19.76	8.08	42.75
20	180	380	100	60	73.19	25.06	1.75	17.89	9.87	43.98
21	60	430	100	60	68.18	26.34	5.48	9.55	7.50	29.83
22	60	430	100	60	69.04	24.18	6.78	8.79	8.89	31.05
23	180	430	100	60	65.90	22.45	11.65	4.12	3.30	26.69
24	180	430	100	60	64.08	25.94	9.98	4.78	4.37	24.06
25	60	380	300	60	78.94	17.72	3.34	14.80	9.87	43.81
26	60	380	300	60	76.57	18.46	4.97	14.13	8.98	42.98
27	180	380	300	60	68.50	23.62	7.88	4.11	3.60	23.98
28	180	380	300	60	69.08	24.94	5.98	3.57	4.56	25.67

ตาราง ก1 (ต่อ) ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์

Experiment no.	Parameter				Product yield (%wt)			Product distribution (%wt)		
	Temperature	Pressure	Time	Catalyst	Liquid	Gas	Solid	Naphtha	Kerosene	Diesel
	(°C)	(bar)	(minute)	(%wt)	yield (%wt)	yield (%wt)	yield (%wt)	Yield (%wt)	yield (%wt)	yield (%wt)
29	60	430	300	60	76.55	18.49	4.97	14.73	8.23	33.49
30					77.65	18.47	3.88	13.89	7.98	35.03
31	180	430	300	60	69.79	21.63	8.58	7.15	4.36	26.17
32					70.86	22.46	6.68	6.87	3.58	27.98
33	120	405	200	45	72.75	20.34	6.91	8.78	15.22	28.75
34	120	405	200	45	71.17	21.66	7.17	6.79	16.21	29.17
35	120	405	200	45	70.83	23.87	5.3	7.35	14.65	30.83



**ภาคผนวก ข**  
**การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา**  
**แมกนีเซียมออกไซด์รองรับบนถ่านกัมมันต์**

**เครื่อง Autosorb-1**

เครื่อง Autosorb-1 ทำงานโดยวัดปริมาณแก๊ส (Adsorbate) ที่ถูกดูดซับบนผิวสาร (Adsorbent) ที่ความดันสมดุล (Equilibrium Pressure) โดยใช้วิธีวัดปริมาตร (Volumetric Method) ข้อมูลจากเครื่องจะได้จากปริมาณแก๊สที่ใส่เข้าไปในหลอดสารตัวอย่าง (Sample Cell) ซึ่งมีสารตัวอย่างอยู่ โดยใช้อุณหภูมิคงที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature) ของแก๊ส ขณะเกิดการดูดซับความดันในหลอดสารตัวอย่างจะเปลี่ยนไปจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล ปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ความดันสมดุลหาได้จากค่าความแตกต่างระหว่างปริมาณแก๊สที่ใส่เข้าไปกับปริมาณแก๊สที่อยู่ในช่องว่างรอบๆสารตัวอย่าง (Void Space) และในการวัดการปล่อยออกของแก๊สซึ่งทำงานในลักษณะเดียวกัน



ภาพที่ ข.1 เครื่อง AUTOSORB-1-C/VP, Quantachrome

จากข้อมูลความดันและปริมาตรที่วัดได้จากเครื่อง Autosorb-1 สามารถนำมาคำนวณค่าต่างๆได้ดังนี้

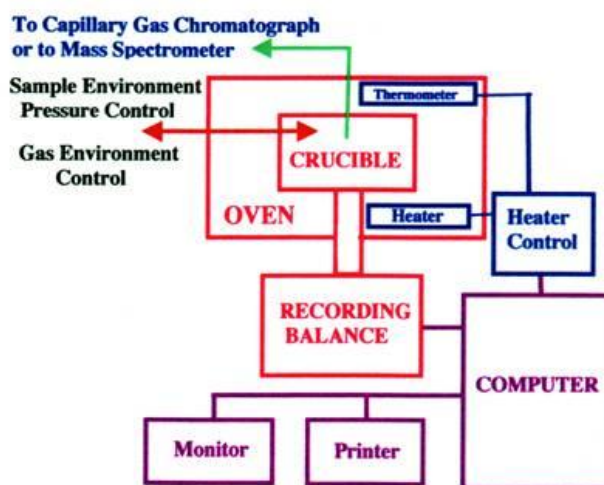
- คำนวณพื้นที่ผิวโดยวิธี Brunauer, Emmett, Teller (BET) แบบจุดเดียว (Single Point) และแบบหลายจุด (Multi Point)
- คำนวณพื้นที่ผิวโดยวิธีแลงเมียร์ (Langmuir)
- แสดงการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Desorption Isotherm)
- หาการกระจายขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิว (Pore Size and/or Surface Distribution)
- แสดงปริมาตรรูพรุนทั้งหมดและค่ารัศมีรูพรุนเฉลี่ย (Pore Volume and Pore Radius)

**ภาคผนวก ค**  
**การวิเคราะห์อุณหภูมิการแตกตัวด้วยความร้อน**  
**ของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว**

**Thermogravimetric Analysis (TGA)**

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคใช้ความร้อน (Thermal Analysis) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่สามารถวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารตัวอย่างโดยเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิ จากลักษณะเฉพาะที่เกิดจากการให้ความร้อนสามารถใช้วิเคราะห์เชิงคุณภาพ คือการวิเคราะห์โครงสร้าง และองค์ประกอบที่เฟสต่างๆกัน การวิเคราะห์เชิงปริมาณอาจได้จากข้อมูลที่ได้จากน้ำหนัก และ Enthalpy ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อสารตัวอย่างที่นำไปเผาอุณหภูมิที่ทำให้เฟสเปลี่ยนและความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี สามารถใช้หาความบริสุทธิ์ของสารหรือวัสดุได้

Thermogravimetric Analysis เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ ด้วยการวัดมวล (Mass) ของสารซึ่งเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิ หรือเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในขณะที่สารได้รับความร้อนตามอุณหภูมิที่โปรแกรมตั้งไว้ ส่วนประกอบของเครื่องแสดงดังรูปที่ ค.1



ภาพที่ ค.1 ส่วนประกอบของเครื่อง Thermogravimetric Analyzer

โดยทั่วไปมีส่วนประกอบดังนี้

1. เครื่องชั่ง เป็น Analytical Balance ที่มี Sensitivity สูง และเชื่อถือได้ จะอยู่ตรงกลาง เครื่อง Sensitivity ของเครื่องชั่งโดยทั่วไปจะอยู่ในระดับ 1  $\mu\text{g}$  และน้ำหนักสูงสุดที่จะรับได้คือ 1 g ในกรณีทั่วไปตัวอย่างการทดลองโดยใช้ TG จะใช้น้ำหนักเพียง 10-50 mg

2. เตาเผา (Furnace) ช่วงของอุณหภูมิของเตาเผาที่ใช้ใน Thermobalances ขึ้นกับวัสดุที่ใช้สร้าง ถ้าใช้ Fuesd Quartz Tube ร่วมกับ Kanthal-Type Heating Element อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 1,000-1,500 องศาเซลเซียส
3. เครื่องควบคุมระบบ Heating และ Cooling และการเก็บข้อมูล ตลอดจนคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของมวลสารตัวอย่างต่ออุณหภูมิ และวาดกราฟ และยังช่วยควบคุมการให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างให้เป็นไปอย่างช้าๆ
4. ถ้วยแพลตินัมหรืออะลูมิเนียม เป็นวัสดุสำหรับใส่สารตัวอย่าง และสารอ้างอิง จะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน
5. แก๊สที่ใช้ทั่วไป คือ แก๊ส He N<sub>2</sub> อากาศ หรือ CO<sub>2</sub> ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

Thermogravimetry มี 3 วิธี ดังนี้

1. Isothermal Thermogravimetry วิธีการนี้ใช้วัด Sample Mass เป็นฟังก์ชันกับเวลาที่อุณหภูมิคงที่
2. Quasi-iso Thermal Thermogravimetry วิธีการนี้สารตัวอย่างจะถูกเผาจนได้มวลคงที่ในแต่ละชุดเมื่อใช้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น
3. Dynamic Thermogravimetry วิธีการนี้สารตัวอย่างจะถูกเผาในสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิหลากหลายเมื่อใช้อัตราให้ความร้อนคงที่ ปกติจะใช้อัตราที่เป็นเส้นตรง (Linear Rate) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุด และเป็นวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้

## ภาคผนวก ง

### การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

#### หลักการ

เผาตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สออกซิเจน ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ภายในบอมบ์ จะถ่ายเทให้กับน้ำที่อยู่รอบๆ ค่าความร้อนคำนวณได้จากผลคูณของความแตกต่างของอุณหภูมิ (ก่อนและหลังจุดระเบิด) กับค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ ซึ่งหาได้จากการเผากรดเบนโซอิก (Benzoic acid) ภายใต้ภาวะเดียวกัน (Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by Adiabatic Bomb Calorimeter: ASTM D2015)

#### เครื่องมือ

1. Oxygen Bomb Calorimeter

#### สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. กรดเบนโซอิก ( $C_6H_5COOH$ ) ควรได้รับมาตรฐานของ National Institute of Standard and Technology
3. เมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange) เมทิลเรด (Methyl Red) หรือเมทิลเพอเพิล (Methyl Purple)
4. แก๊สออกซิเจน ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5
5. สารละลายมาตรฐานไฮเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.0709 นอร์มัล (3.76 กรัมต่อลิตร) สารละลายนี้ปริมาตร 1 มิลลิลิตรมีค่าเท่ากับ 1 แคลอรี
6. น้ำล้างบอมบ์ละลายสารละลายเมทิลออเรนจ์เข้มข้น 1 มิลลิลิตรในน้ำกลั่น 1 ลิตร

#### การวิเคราะห์

การหาค่าความจุความร้อนมาตรฐานของบอมบ์แคลอริมิเตอร์

1. ชั่งกรดเบนโซอิกประมาณ 1 กรัม ให้มีความละเอียดถึง 0.0001 กรัม ใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่างของเครื่อง
2. ตัดลวด (Fuse Wire) ความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ผูกที่ปลายทั้งสองข้างของส่วนจุดระเบิด ให้ลวดแตะผิวตัวอย่างในถ้วย

3. ล้างภายในบอมบีให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น และเติมน้ำกลั่นลงในบอมบี 1 มิลลิลิตร
4. ประกอบบอมบีปิดฝาให้แน่น อัดแก๊สออกซิเจนมีความดัน 30 บรรยากาศ และต้องเท่ากันทุกครั้ง ระวังอย่าให้ตัวอย่างกระจายจากถ้วยใส่ตัวอย่าง
5. นำบอมบีที่อัดแก๊สออกซิเจนแล้ววางลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิ ต่อขั้วไฟฟ้าสำหรับจุดระเบิด
6. เติมน้ำกลั่นลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิปริมาณ 2000 มิลลิลิตร ปรับอุณหภูมิของน้ำโดยการกวนให้อุณหภูมิกึ่งที่และต่ำกว่าอุณหภูมิของห้องประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส
7. ทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้อุณหภูมิกึ่งที่
8. เมื่ออุณหภูมิกึ่งที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น ( $T_i$ ) กดปุ่มจุดระเบิด
9. จับเวลาทุกๆ 1 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิกึ่งที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิตสุดท้าย ( $T_f$ )
10. ปิดเครื่องและนำบอมบีออกจากเครื่อง ค่อยๆลดความดัน ถ้าภายในมีเขม่าหรือเผาไหม้ไม่หมดให้ทำใหม่
11. ล้างภายในบอมบีทุกส่วนด้วยน้ำล้างบอมบีที่เตรียมไว้ จนหมดความเป็นกรดและมีปริมาตรประมาณ 250 มิลลิลิตร ไตเตรตน้ำล้างด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต บันทึกปริมาตรที่ใช้
12. วัดความยาวหลอดที่เหลือ บันทึกผล

### การคำนวณ

$$E = \frac{[(Hg) + e_1 + e_2]}{T}$$

เมื่อ

E	=	ค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ (จุดต่อองศาเซลเซียส)
H	=	ความร้อนของการเผาไหม้ของกรดเบนโซอิก (จุดต่อกรัม)
g	=	น้ำหนักกรัมเบนโซอิกที่ใช้ (กรัม)
$e_1$	=	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) โดย 1 มิลลิลิตรเทียบกับ 10550.56 จูล
$e_2$	=	ความยาวหลอดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร) x ค่าความร้อนของหลอด (จุดต่อเซนติเมตร)
T	=	$T_f - T_i$ ผลต่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ทำการทดลองเหมือนที่กล่าวมาทุกประการตั้งแต่ข้อ 1-12 โดยเปลี่ยนจากกรดเบนโซอิกเป็นตัวอย่างเชื้อเพลิงแล้วคำนวณค่าความร้อนได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q_v(\text{gross}) = \frac{[(TE) - e_1 - e_2 - e_3]}{g}$$

เมื่อ	$Q_v(\text{gross})$	=	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (จูลต่อกรัม)
	T	=	$T_f - T_i$ (องศาเซลเซียส)
	$e_1$	=	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) โดย 1 มิลลิลิตร เทียบ
			กับ 10550.56 จูล
	$e_2$	=	ความยาวหลอดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร) x ค่าความร้อนของหลอด (บีที่ยูต่อเซนติเมตร)
	$e_3$	=	$25 \times 10^3$ (จูล) x ร้อยละกำมะถัน x น้ำหนักเชื้อเพลิงที่ใช้ (กรัม)

**ภาคผนวก จ**  
**การคำนวณร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิง**

**การคำนวณ**

1. การคำนวณร้อยละผลได้ของเหลว

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

2. การคำนวณร้อยละผลได้ของแข็ง

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

3. การคำนวณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (Daf)} = 100 - \text{ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลว} - \text{ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็ง}$$

โดย

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

$$W_R = \text{น้ำหนักกากของแข็งที่ปราศจากความชื้น}$$

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

4. การคำนวณอัตราการไหลของแก๊สและเวลาที่ทำปฏิกิริยา

$$\text{อัตราการป้อน(Feed rate)} = W_{EFB} / t \text{ (Kg/hr)}$$

$$\text{เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Residence time)} = t / W_{EFB} \text{ (sec)}$$

โดย

$$W_{EFB} = \text{น้ำหนักของวัตถุดิบที่ได้ออกมาจากเตาปฏิกรณ์}$$

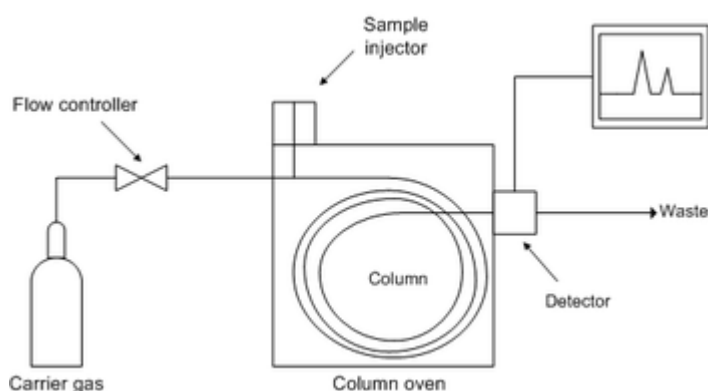
$$t = \text{เวลาทั้งหมดที่วัตถุดิบออกมาจากเตาปฏิกรณ์}$$

## ภาคผนวก จ

### การวิเคราะห์องค์ประกอบการกระจายตัวของเชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือด

#### แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

แก๊สโครมาโทกราฟี เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการแยกสารตัวอย่างซึ่งเป็นของผสมออกจากกัน แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่สารตัวอย่างนั้นๆ จะต้องสามารถเปลี่ยนให้เป็นแก๊สเฟสและมีความเสถียรที่อุณหภูมิที่เหมาะสม โดยอาศัยหลักความแตกต่างของความสามารถในการเคลื่อนที่และกระจายตัวผ่านเฟสคงที่ของแต่ละองค์ประกอบในสารตัวอย่าง ทำให้สารแต่ละชนิดสามารถแยกออกจากกันได้ ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์นี้ สามารถบอกได้ทั้งชนิดและปริมาณของสารตัวอย่าง ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแสดงดังรูปที่ จ.1



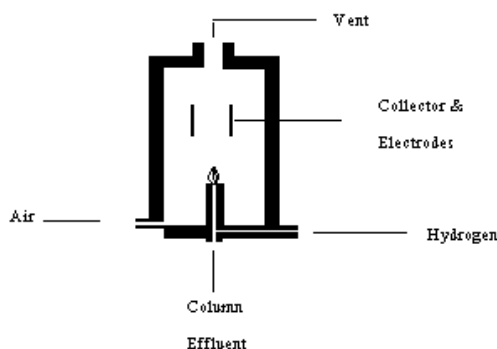
ภาพที่ จ.1 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

โดยทั่วไปมีส่วนประกอบดังนี้

1. แก๊สที่ใช้ทำงานกับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี มี 3 ชนิด คือ
  - 1.1 แก๊สเฉื่อย ได้แก่ ฮีเลียม อาร์กอน หรือไนโตรเจน ซึ่งใช้เป็นแก๊สพา (Carrier Gases) เพื่อ จะใช้พาไอของสารหรือแก๊สตัวอย่างเข้าคอลัมน์
  - 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

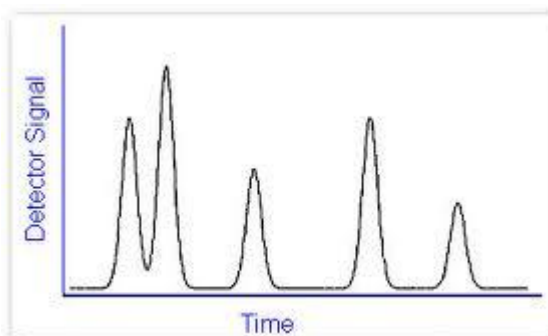


- 2.3 Hydrocarbon Filter ใช้จับแก๊สไฮโดรคาร์บอนและไอของน้ำมันสำหรับ แก๊สพา  
 ควรจะต้องผ่าน Filter อากาศควรจะต้องผ่าน Charcoal Filter
3. ตัวควบคุมอัตราการไหล (Flow Regulator) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส  
 พา
4. ส่วนที่จะฉีดสารเข้าคอลัมน์ (Injection Port) ทำหน้าที่ฉีดสารเข้าคอลัมน์และให้ความ  
 ร้อนให้สารตัวอย่างเปลี่ยนเป็นเฟสไอ
5. คอลัมน์ (Column) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแยกสารซึ่งสำคัญที่สุด นิยมใช้คอลัมน์ที่ทำ  
 จาก ทองแดง นิกเกิล หรือเหล็กกล้าไร้สนิม อาจอยู่ในรูป U Tube ความยาวของ  
 คอลัมน์ประมาณ 1-2 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง (Inner Diameter) 3-6 มม. อาจมีการใช้  
 คอลัมน์ที่ทำจากแก้วในการแยกสารสเตียรอยด์ ยา หรือสารประกอบชีวภาพ  
 นอกจากนี้ยังมีคอลัมน์ชนิดขนาดรูเล็ก (Capillary Column) ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง  
 ประมาณ 1 มม. แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้
- 5.1 Wall-Coated Open Tubular (WCOT) คอลัมน์ที่มีเฟสหยุดนิ่งเป็นของเหลว  
 เคลือบเป็นฟิล์มบางๆ (0.1-1 ไมครอน) อยู่ที่ผนังด้านใน ความยาวของคอลัมน์  
 ประมาณ 10-100 เมตร
- 5.2 Support Coated Open Tubular (SCOT) คอลัมน์ที่มีตัวรองรับ หรือเมทริกซ์  
 บรรจุอยู่ภายใน ความยาวของคอลัมน์ ประมาณ 10-100 เมตร
- 5.3 Micropacked Column คอลัมน์ขนาดเล็ก มีความยาวประมาณ 0.7-1.0 เมตร
6. Flame Ionization Detector (FID) สารที่ผ่านจากคอลัมน์จะถูกเผาโดยเปลวไฟ  
 (Flame) ทำให้แตกตัวเป็นไอออน ภายในตัวตรวจวัดมี ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่จะจับ  
 กับไอออนซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ตัวตรวจวัดชนิด FID นี้เป็นชนิดที่นิยม  
 ใช้มากที่สุด



ภาพที่ ๑.2 Flame Ionization Detector

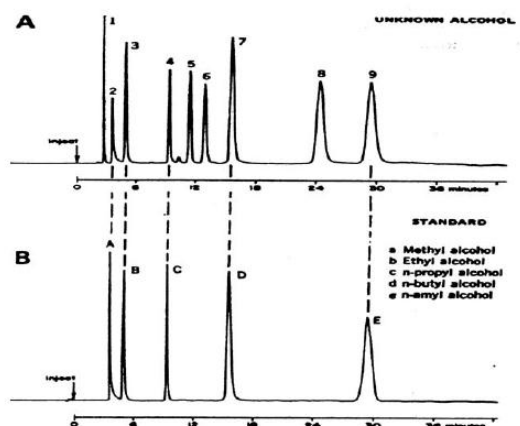
สารตัวอย่างที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะถูกฉีดเข้าไปที่ช่องสำหรับฉีดสารตัวอย่าง (Injection Port) เพื่อให้ความร้อนจนเปลี่ยนเป็นเฟสไอ แล้วผ่านเข้าไปในคอลัมน์หลอดแก้วรูเล็ก (Capillary Glass Column) รุ่น CP-SIL5CB เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.25 มิลลิเมตร ความยาว 15 เมตร และ ความหนาของชั้นฟิล์ม 0.25 ไมครอน โดยอาศัยการพาของเฟสเคลื่อนที่ หรือแก๊สพา ในที่นี้ใช้แก๊สฮีเลียม อัตราการไหล 1.5 ไมโครลิตร/นาที ไปยังคอลัมน์ เพื่อแยกสารออกจากกัน อุณหภูมิของเตาอบปรับอุณหภูมิให้มีการเปลี่ยนแปลงได้ในขณะทำการทดลอง (Temperature Programming Operation) โดยตั้งอัตราการให้ความร้อนที่  $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$  โดยอุณหภูมิอยู่ในช่วง 30-320 องศาเซลเซียส ใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นสารหล่อเย็น เพื่อควบคุมอุณหภูมิ ตั้งแต่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.01 วินาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อนที่  $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$  จนถึงอุณหภูมิสุดท้าย 320 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้ 8.50 นาที มีตัวตรวจวัด ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณที่เกิดขึ้น เมื่อสารแยกออกจากคอลัมน์ จะถูกบันทึก และแสดงออกในรูปแบบโครมาโทแกรม (Chromatogram) แสดงดังรูปที่ ๑.3



ภาพที่ ๑.3 โครมาโทแกรมที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

### การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

Retention Time คือ เวลาที่สารแต่ละชนิดใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์นับจากเริ่มต้นของการวิเคราะห์ถึงตำแหน่งเวลาที่ตัวตรวจวัดอ่านค่าสัญญาณสูงสุด (Peak) จากการตรวจวัดของสารตัวอย่างนั้น ซึ่ง Retention Time เป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยขึ้นกับอัตราการไหลของแก๊สพา และอุณหภูมิที่ใช้กับคอลัมน์ เมื่อให้การวิเคราะห์หรืออยู่ในสภาวะคงที่ ค่า Retention Time ของสารต่างๆ ที่ใช้วิเคราะห์ควรจะต้องมีค่าคงที่หรือใกล้เคียงกันมากที่สุด ดังนั้น การตรวจพิสูจน์องค์ประกอบของสารตัวอย่างต้องทำการวิเคราะห์ทั้ง สารตัวอย่างและสารมาตรฐานในภาวะเดียวกัน เมื่อนำค่า Retention Time มาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ ๑.4 จะสามารถบอกองค์ประกอบในสารตัวอย่างได้



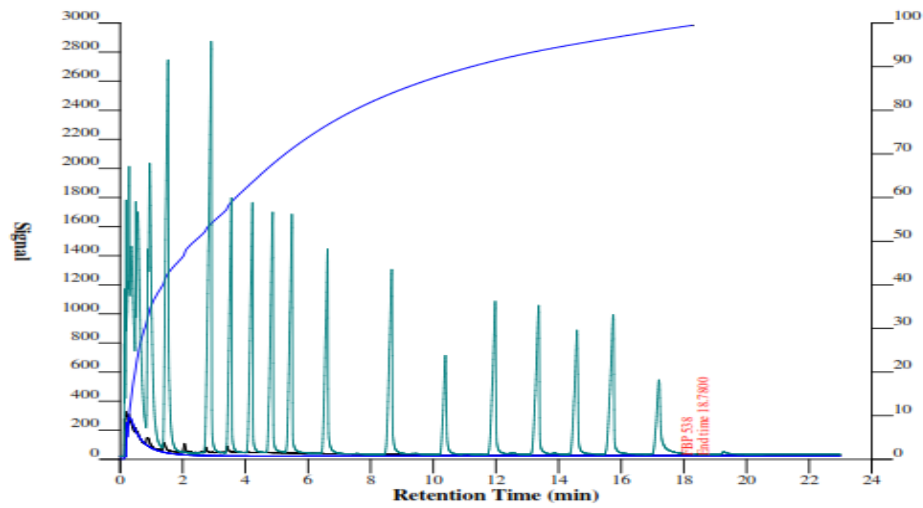
ภาพที่ ๑.4 การเปรียบเทียบค่า Retention Time ของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน

การวิเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น จะวิเคราะห์ตามคาบจุดเดือดของสาร ดังนี้

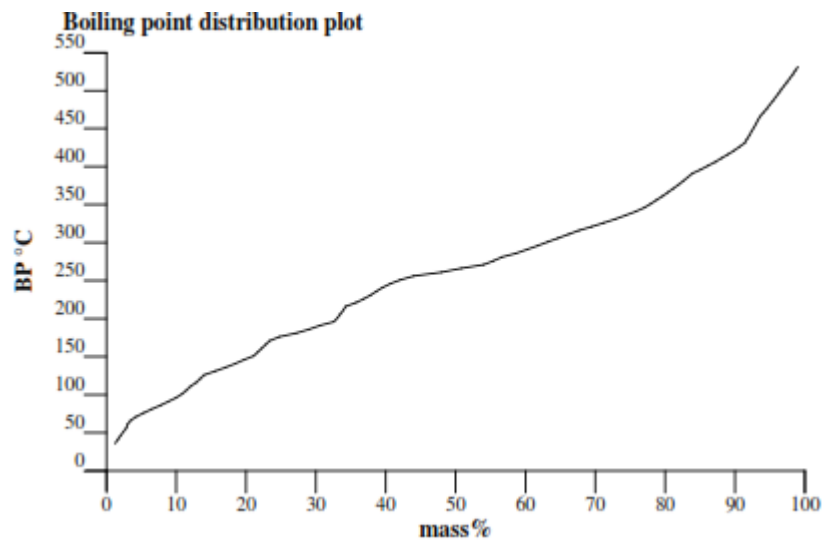
$IBP \leq 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$	=	Naphtha
$200 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$	=	Kerosene
$250 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$	=	Light Gas Oils
$350 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq 370 \text{ }^{\circ}\text{C}$	=	Heavy Gas Oils
$370 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \text{FBP}$	=	Long Residue

#### กราฟแสดงการกระจายตัวตามจุดเดือด

โครมาโทแกรมที่ได้จากการกลั่นแยกสารด้วยแก๊สโครมาโทกราฟจะเปลี่ยนเป็นกราฟกระจายตัวตามคาบจุดเดือด (Boiling Point Distribution Plot) ด้วยโปรแกรมจำลองการกลั่นเทียบกับโครมาโทแกรมของสารมาตรฐานตาม ASTM D2887 และโครมาโทแกรม ดังแสดงในรูปที่ ๑.5 และ ๑.6



ภาพที่ ๑.5 โครมาโทแกรมจากการแยกองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



ภาพที่ ๑.6 การกระจายตัวตามจุดเดือดขององค์ประกอบในเชื้อเพลิงเหลวจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น

## ภาคผนวก ข

### การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ $2^k$

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลนิยมใช้ในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งต้องการที่จะศึกษาผลรวมที่มีต่อผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีปัจจัย  $k$  ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วยสองระดับ แต่แต่ละระดับเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรือเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และในสองระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ ใน 1 เวกทอเรียลที่ปริมาตรสำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น  $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  และเราเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่าการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^k$

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงแรก เมื่อมีปัจจัยหลายปัจจัยที่ต้องการจะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้ทำให้เกิดการทดลองลดจำนวนลงเพื่อที่สามารถศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง  $k$  ชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ ดังนั้นจึงไม่น่าแปลกใจเลยที่การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ จะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้ลดน้อยลง เนื่องจากแต่ละปัจจัยของการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล ประกอบด้วย 2 ระดับ ผลตอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลอง ซึ่งสมมติฐานสามารถยอมรับได้สำหรับการทดลองเพื่อใช้ปัจจัยทำการศึกษาระบบ

#### การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ ชนิดแรก คือการออกแบบที่ประกอบด้วย 2 ปัจจัย (A และ B) แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ การออกแบบชนิดนี้เรียกว่า การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^2$  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 ในการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้น สำหรับระดับต่ำจะไม่ปรากฏตัวอักษรใดๆ ในการทดลองร่วมปัจจัย ดังนั้นสำหรับการออกแบบ  $2^k$  ในที่นี้ a จะแทนการทดลองร่วมปัจจัยของปัจจัย A ที่ระดับสูงและ B ที่ระดับต่ำ,

b แทน A ที่ระดับต่ำและ B ที่ระดับสูง ab แทนทั้งปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับสูง และ (1) แทนทั้งปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับต่ำ

### สูตรการคำนวณ

Contrast เท่ากับผลรวมของค่าการทดลองแต่ละ Treatment คูณกับสัมประสิทธิ์ (-1 หรือ +1) ของตัวแปรหรือปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

$$\text{Effect Estimate}_{AB\dots K} = \frac{2 (\text{Contrast}_{AB\dots K})}{n 2^k}$$

$$\text{Sum of Squares}_{AB\dots K} : SS_{AB\dots K} = 2 (\text{Contrast}_{AB\dots K})^2$$

Total of sum of squares :

$$ss_T = \sum_{i=1} \sum_{j=1} \sum_{k=1} y_{ijk}^2 - y^2 \dots / N; N = \sum_{i=1} \sum_{j=1} \sum_{k=1} y_{ijk}^2 - y^2 \dots / N; N = \text{จำนวนค่าสังเกตทั้งหมด}$$

Mean of Square Error : SSE = SST – sum Squares of Main Effect

Mean of Square : MS = Sum of Square/Degree of Freedom

$$\% \text{ Normal probability} = \frac{(\text{Cumulative frequency} - 0.5) \times 100}{\text{Total cumulative frequency}}$$

$F_0$  = Mean Square of Effect/Mean Square of error

ตัวอย่างงานวิจัย การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันตุงบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบส ออกแบบการทดลองเป็น  $2^4$  แฟกทอเรียลแบบ 2 เรพลิเคต โดยกำหนดสัญลักษณ์และระดับของตัวแปรดังนี้

**ตาราง ข1** ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบส

ตัวแปร	ระดับ	
	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
A อัตราการป้อนน้ำมันใช้แล้ว (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)	60	180
B อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	380	430
C อัตราการป้อนแก๊สตัวพา (มิลลิลิตรต่อนาที)	100	300
D ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยปริมาตร)	30	60

## 5. การใช้โปรแกรม Design-Expert ในการคำนวณ

1. เมื่อเข้าสู่โปรแกรม คลิกไปที่ file ----> New Design และจะแสดงดังรูป ข.1

	Number of Factors													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
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.

ภาพที่ ข.1 แสดงตารางของ 2 Level Factorial Design

2. เลือกจำนวนตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งหมด 4 ปัจจัย เลือกที่ Full ของช่อง 4 จากนั้นกรอกจำนวนที่ทำกรทดลองซ้ำในช่อง Replicates และกรอกค่าทำซ้ำที่ค่ากลาง ช่อง Center point per block ยกตัวอย่าง Replicates = 2, Center point per block = 3 กดที่ Continue จะปรากฏดังภาพ ข.2 เมื่อกรอกตัวแปรเสร็จคลิกที่ Continue

	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:	Used cooking		Numeric	-1	1
B:	temperature		Numeric	-1	1
C:	carrier gas		Numeric	-1	1
D:	catalyst		Numeric	-1	1

ภาพที่ ข.2 แสดงตัวแปรและหน่วยที่ใช้ในการทดลอง

3. เลือกปัจจัยและกรอกชื่อปัจจัยพร้อมกรอกหน่วยของตัวแปรนั้นๆ ในช่องดังภาพ ข3 เมื่อกรอกปัจจัยเสร็จคลิกที่ Continue

Responses: 5

	Name	Units
	Response 1	
	Response 2	
	Response 3	
	Response 4	
	Response 5	

ภาพที่ ข3 แสดง Response และ หน่วยของตัวแปรที่ทำการทดลอง

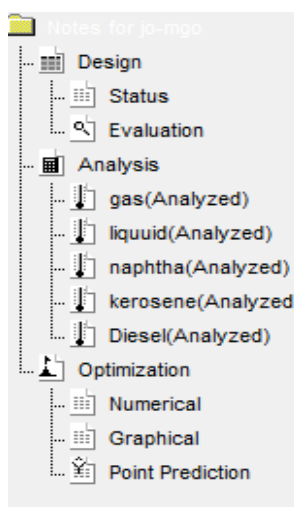
4. จากนั้นจะขึ้นปัจจัยที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด เช่น การทดลองมีทั้งหมด 16 การทดลอง ค่ากลาง 3 การทดลอง ทำซ้ำ 1 ครั้ง รวมการทดลอง 19 การทดลอง จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองกรอกในช่องดังรูป ข4

Std	Run	Block	Factor 1 A:Temperature oC	Factor 2 B:Time min	Factor 3 C:Catalyst %wt	Factor 4 D:Pressure bar	Response 1 gas %wt	Response 2 liquid %wt	Response 3 naphtha %wt	Response 4 kerosene %wt	Response 5 diesel %wt
2	1	Block 1	410.00	30.00	1.00	1.00	13.23	70.89	22.77	32.81	37.57
21	2	Block 1	410.00	60.00	1.00	5.00	18.32	79.76	36.88	26.2	27.81
3	3	Block 1	450.00	30.00	1.00	1.00	20.76	66.98	32.17	30.91	31.28
31	4	Block 1	450.00	60.00	5.00	5.00	28.63	70.87	37.04	30.71	22.38
15	5	Block 1	450.00	60.00	5.00	1.00	26.27	63.02	38.17	35.32	23.16
24	6	Block 1	450.00	60.00	1.00	5.00	23.92	70.87	35.87	32.63	24.7
4	7	Block 1	450.00	30.00	1.00	1.00	21.71	67.9	33.84	30.19	29.38
27	8	Block 1	450.00	30.00	5.00	5.00	25.37	69.16	36.45	31.73	26.01
28	9	Block 1	450.00	30.00	5.00	5.00	23.32	68.71	36.96	31.01	30.52
33	10	Block 1	430.00	45.00	3.00	3.00	24.93	71.04	34.02	30.53	27.15
19	11	Block 1	450.00	30.00	1.00	5.00	21.61	72.66	34.8	30.07	30.15
1	12	Block 1	410.00	30.00	1.00	1.00	12.64	71.62	23.27	32.97	36.17
25	13	Block 1	410.00	30.00	5.00	5.00	17.12	76.7	28.91	28.37	31.54
30	14	Block 1	410.00	60.00	5.00	5.00	21.27	72.99	39.14	23.17	26.32
9	15	Block 1	410.00	30.00	5.00	1.00	15.67	79.38	30.67	29.67	30.23
6	16	Block 1	410.00	60.00	1.00	1.00	19.67	70.87	35.83	28.61	30.76
20	17	Block 1	450.00	30.00	1.00	5.00	21.09	72.93	34.89	32.32	30.78
11	18	Block 1	450.00	30.00	5.00	1.00	25.16	66.9	37.92	27.28	26.93
8	19	Block 1	450.00	60.00	1.00	1.00	22.51	64.15	36.21	28.14	25.76
22	20	Block 1	410.00	60.00	1.00	5.00	18.07	79.29	36.43	25.67	32.01
14	21	Block 1	410.00	60.00	5.00	1.00	22.86	76.04	41.32	23.53	27.81
7	22	Block 1	450.00	60.00	1.00	1.00	24.25	65.58	34.12	29.72	26.31
29	23	Block 1	410.00	60.00	5.00	5.00	20.14	74.83	39.24	25.91	25.73
16	24	Block 1	450.00	60.00	5.00	1.00	26.68	64.32	37.72	35.31	23.33

ภาพที่ ข4 แสดงตารางการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองที่ภาวะต่างๆ

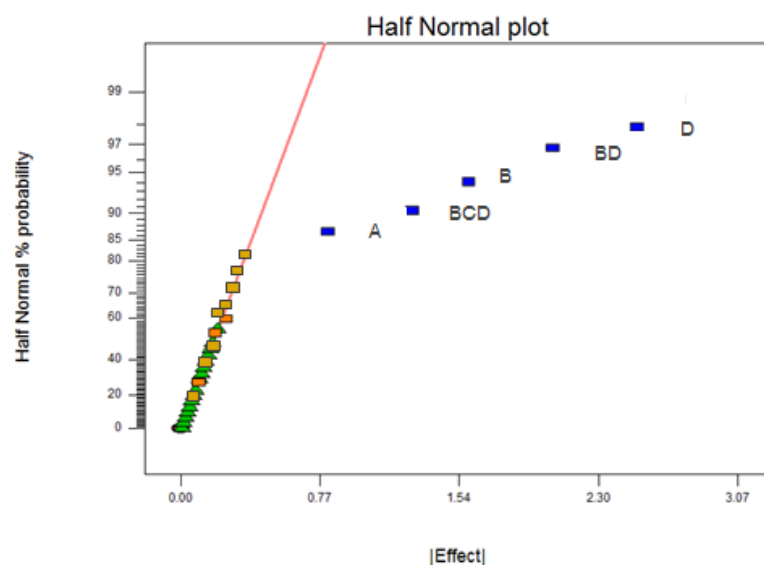


5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองโดยโปรแกรม Design-Expert ยกตัวอย่างเช่น วิเคราะห์ผลของเชื้อเพลิงเหลวโดยกดที่เชื้อเพลิงเหลว ดังภาพ ข5 จากนั้นไปคลิกที่ Effect



ภาพที่ ข5 แสดงแถบของ gas liquid kerosene และ diesel

6. เมื่อคลิก Effect จากนั้นทำการเลือกจุดในกราฟ Half Normal %Probability เพื่อให้แนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังภาพที่ ข6 ยกตัวอย่างเช่น



ภาพที่ ข6 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้เนฟทาจากปฏิกิริยาแตกตัวของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วจากภาพบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ ความดัน ไฮโดรเจนเริ่มต้น เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทา

7. กติที่ว่า ANOVA ดังภาพ ข7 เพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณและเป็นการยืนยันผลของ Normal probability

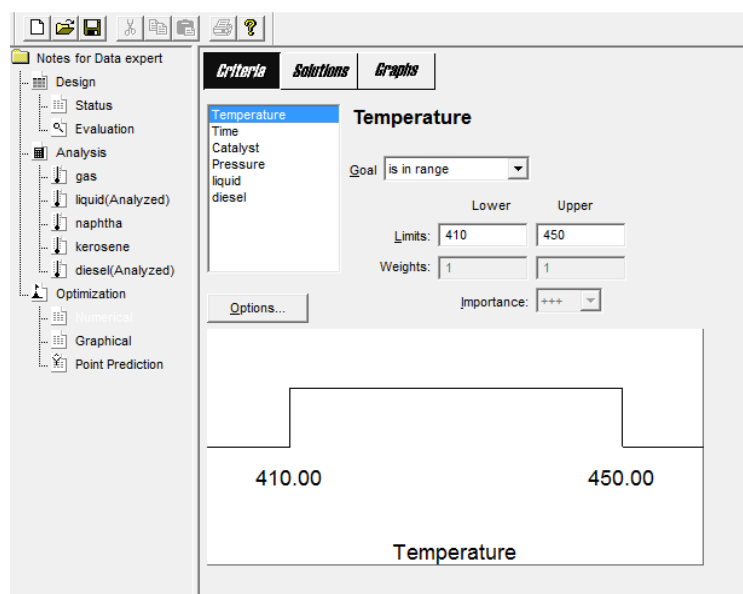
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	781.88	6	130.31	62.60	< 0.0001	significant
A	502.37	1	502.37	241.34	< 0.0001	
B	27.62	1	27.62	13.27	0.0011	
D	90.42	1	90.42	43.44	< 0.0001	
AC	33.11	1	33.11	15.91	0.0005	
CD	91.84	1	91.84	44.12	< 0.0001	
ACD	36.53	1	36.53	17.55	0.0003	
Curvature	5.90	1	5.90	2.83	0.1039	significant
Residual	56.20	27	2.08			
Lack of Fit	24.77	9	2.75	1.58	0.1965	not significant
Pure Error	31.43	18	1.75			
Cor Total	843.98	34				

ภาพที่ ข7 แสดงการคำนวณผลของ ANOVA

จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert ซึ่งบ่งบอกถึงปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ของปัจจัยนั้น

8. จากนั้นวิเคราะห์ปัจจัยอื่นๆ ตามข้อ 5-7

9. หาภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง กติที่ numerical --- > พร้อมกรอบขอบเขตที่ต้องการใน ข้อ Limit ดังภาพ ข8



ภาพที่ ข8 ขอบเขตที่ต้องการในการทดลอง

10. กัดที่ Solution จะได้ภาวะที่เหมาะสมดังรูป ๓9

<b>Constraints</b>						
Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
Temperature	is in range	410	450	1	1	3
Time	is in range	30	60	1	1	3
Catalyst	is in range	1	5	1	1	3
Pressure	is in range	1	5	1	1	3

<b>Solutions</b>						
Number	Temperature*	Time*	Catalyst*	Pressure*	Desirability	
1	<u>419.04</u>	<u>39.23</u>	<u>4.57</u>	<u>2.41</u>	<u>1.000</u>	<u>Selected</u>
2	438.00	55.71	1.65	2.24	1.000	
3	410.59	58.34	1.16	3.17	1.000	
4	443.46	46.00	2.02	3.10	1.000	
5	421.47	33.99	1.60	1.42	1.000	
6	437.72	50.33	3.74	3.57	1.000	
7	440.71	33.20	2.19	3.07	1.000	
8	440.13	31.86	2.85	3.47	1.000	
9	432.36	47.90	1.71	4.98	1.000	
10	426.99	39.34	1.71	2.32	1.000	

ภาพที่ ๓9 แสดงภาวะที่เหมาะสมที่ได้

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเชษฐา จีงเจริญพาณิชย์ เกิดเมื่อวันที่ 3 มกราคม 2532 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554