



ไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันพืชโดยกระบวนการคะตะไลติกแครกกิง
Biogasoline from Vegetable Oil Using Catalytic Cracking Process

จิรัชญา ช่วยเกลี้ยง
Jiratchaya Chuaykleang

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Chemical Engineering
Prince of Songkla University

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ ไบโอดีเซลโซลีนจากน้ำมันพืชโดยกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่ง
 ผู้เขียน นางสาว จิรัชญา ช่วยเกลี้ยง
 สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนวิไล) (รองศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด จงสมจิตร)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนวิไล)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์)

.....กรรมการ
 (ดร.สุธรรม สุขมณี)

.....กรรมการ
 (ดร.สุรัสวดี กังสนันท์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
 ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุกฤทธิรา รัตนวิไล)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาวจิรัชญา ช่วยเกลี้ยง)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวจิรัชญา ช่วยเกลี้ยง)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ ไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันพืชโดยกระบวนการคละไลติกแครกกิ้ง

ผู้เขียน นางสาวจิรัชญา ช่วยเกลี้ยง

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากกระบวนการคละไลติกแครกกิ้งจากน้ำมันพืชด้วยเครื่อง Fixed-bed micro reactor โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 โดยการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจาก NH₄-ZSM-5 ไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่ได้มีความใกล้เคียงกับเลขคลื่นของตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 ได้ศึกษาช่วงอุณหภูมิที่น้ำมันเปลี่ยนสถานะเป็นสถานะแก๊สด้วยเทคนิค TGA โดยให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 50-800 องศาเซลเซียส ศึกษา น้ำมัน 3 ชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สโซลีน ได้แก่ น้ำมันปาล์มรีไฟน์ น้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว และน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็ก พบว่าน้ำมันทั้ง 3 ชนิดเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นแก๊สที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส แต่ในช่วงอุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสน้ำมันสามารถเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นแก๊สได้ดีที่สุด งานวิจัยนี้จึงเลือกอุณหภูมิในช่วงนี้เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา จากนั้นศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ โดยใช้โปรแกรม Response surface methodology (RSM) ในการออกแบบการทดลอง โดยป้อนตัวแปรต้น 3 ตัวแปรได้แก่ อุณหภูมิ (X₁) ตั้งแต่ 400-550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไนโตรเจน (X₂) 10-20 มิลลิลิตรต่อนาที และ ตัวเร่งปฏิกิริยา 1-5 กรัม (X₃) ผลการทดลองได้นำร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์ (%Yield of OLP) ไปพิจารณาและคำนวณจากโปรแกรม RSM พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์คือ 497.3 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 3.96 กรัม และอัตราการไหลของไนโตรเจน ไม่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์ดังแสดงในสมการ $Y_{OLP} = -206.55 + 1.245X_1 - 11.35X_3 - 0.00136X_1^2 - 0.308X_3^2 + 0.02773X_1X_3$ นอกจากนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นของเบนซินและไอโซออกเทนใน OLP พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของเบนซินเพิ่มขึ้น แต่อิทธิพลของอุณหภูมิไม่มีผลต่อความเข้มข้นของไอโซออกเทน และเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 1 ไปถึง 3 กรัม ความเข้มข้นของเบนซินใน OLP เพิ่มขึ้น แต่เมื่อตัวเร่ง

ปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจนถึง 5 กรัม กลับทำให้ความเข้มข้นของเบนซีนใน OLP ลดลง และการเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ความเข้มข้นของไอโซออกเทนใน OLP นั้นลดลง จากนั้นหาสภาวะที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากผลการคำนวณจากโปรแกรม RSM คือเลือกช่วงสภาวะให้ครอบคลุมผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม RSM คือ ที่อุณหภูมิ 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 3 และ 4 กรัม และอัตราการไหลของไนโตรเจนคงที่ตลอดการทดลองที่ 5 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งให้ค่าความเร็วปฏิกิริยา (WHSV) ในช่วง 11.25-22.50 ต่อชั่วโมง โดยพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมจากร้อยละผลได้ของตัวแทนแก๊สโซลีนที่ได้จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของ Isooctane, Benzene, Toluene, p-Xylene, m-Xylene, o-Xylene และ Ethyl benzene ซึ่งคุณภาพด้วย GC-FID พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์เป็นอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัม และความเร็วปฏิกิริยา 22.50 ต่อชั่วโมง ที่สภาวะนี้ให้ค่าร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนสูงสุดเป็นร้อยละ 29.09 โดยน้ำหนักและร้อยละ 5.86 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากนั้นทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว อุณหภูมิ 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 3 และ 4 กรัม และอัตราการไหลของไนโตรเจนคงที่ตลอดการทดลองที่ 5 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งให้ค่าความเร็วปฏิกิริยา 11.25-22.50 ต่อชั่วโมง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วเป็นอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 กรัม และความเร็วปฏิกิริยา 15 ต่อชั่วโมง ที่สภาวะนี้ให้ค่าร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนสูงสุดเป็น ร้อยละ 37.37 โดยน้ำหนักและร้อยละ 6.20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นอกจากนี้มีการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อเปรียบเทียบกับผลของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ โดยดำเนินการที่สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาน้ำมันปาล์มรีไฟน์ ผลการทดลองพบว่า การผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กให้ร้อยละผลได้ของ OLP 22.22 โดยน้ำหนัก และให้ร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนถึง 6.45 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กต่อไป

Thesis Title	Biogasoline from vegetable oil using catalytic cracking process
Author	Miss Jiratchaya Chuaykleang
Major Program	Chemical Engineering
Academic Year	2013

ABSTRACT

In this research organic liquid product (OLP) from catalytic cracking of vegetable oils using Fixed-bed micro reactor was investigated. The H-ZSM-5 was prepared and analyzed by FT-IR. The results show that the transmission spectroscopy of H-ZSM-5 and the significant bands are nearly functional group of H-ZSM-5. TGA method was used to study the range of temperature that vegetable oils were changed its phase from liquid to gas. The refined palm oil (RPO), used refined palm oil (UPO) and microalgae oil were studied. The temperature at 350 °C is initial temperature of changing, range of temperature 400-550 °C is the good temperature range for all of vegetable oils can be changed to gas phase and this research choose this range to study the effect of reaction temperature for catalytic cracking process. The catalytic cracking of RPO with H-ZSM-5 in fixed-bed micro reactor at atmospheric pressures was studied. The response surface methodology was used to design the experiments for study the parameters over yield of organic liquid product (OLP). The effect of reaction temperature (X_1) between 400-550 °C, Nitrogen flow rate (X_2) between 10-20 ml/min and weight of catalyst (X_3) between 1-5 g are the 3 factors for RSM design. The results show that the significant variables and their effects on the responses have to be identified in order to study the effects of the reaction variables on the yield of OLP. Among the three response factors, nitrogen flow rate does not play a role on yield of OLP. As a result, it was neglected from the design, so the design equation is $Y_{OLP} = -206.55 + 1.245X_1 - 11.35X_3 - 0.00136X_1^2 - 0.308X_3^2 + 0.02773X_1X_3$. The predicted optimum condition is temperature of 497.3 °C, catalyst weight of 3.96 g and no effect of nitrogen flow rate. In addition, this research studies effect of operating variable on benzene and isooctane fractions. It was observed that, benzene concentration increased with the increase in temperature, which had not a significant effect on isooctane concentration. The concentration of benzene increased with the increase

of catalyst weight and decreased at higher weight of catalyst. Isooctane concentration decreased with the increase of catalyst weight. So it is necessary to repeat the result for find the optimum condition without the RSM. This research study the temperature at 450, 500 and 550 °C, catalyst weight at 2, 3 and 4 g and weight hourly space velocity (WHSV) at 11.25, 15 and 22.50 h⁻¹. This section was give precedence in yield of parts of gasoline; it was analyzed by GC-FID in concentration of isooctane, benzene, toluene, p-xylene, m-xylene, o-xylene and ethyl benzene for study the optimum condition. The optimum condition of the catalytic cracking of RPO was temperature at 500 °C, catalyst weight 2 g and WHSV 22.50 h⁻¹ giving the yield of OLP 29.09 % by weight and yield of parts of gasoline 5.86 % by weight. There were also studying on the catalytic cracking of UPO, with temperature at 450, 500 and 550 °C, catalyst weight at 2, 3 and 4 g and WHSV at 11.25, 15 and 22.50 h⁻¹. The results from the experiments found that at 550 °C, 3 g of catalyst and WHSV for 15 h⁻¹ is the optimum condition of UPO and gave yield of OLP and yield of parts of gasoline 37.37 and 6.20 % by weight respectively. Furthermore, the study the possibility of in OLP and gasoline from catalytic cracking of microalgae oil at optimum condition from RPO studied gave the yield of OLP 22.22 % by weight and yield of parts of gasoline 6.45 % by weight. That has possibility for produce biogasoline from microalgae oil by catalytic cracking process.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุกฤทธิรา รัตนวิไล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาอุทิศเวลา ให้คำปรึกษา คำแนะนำและความรู้ในด้านการทำวิจัย เอกสารข้อมูลที่เกี่ยวข้องต่างๆเป็นอย่างดี รวมทั้ง ชัดเจนการระบวนการคิด และแนวทางในการแก้ปัญหา ตลอดจนตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ประธานกรรมการและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่สละเวลา และให้คำแนะนำเพื่อใช้ในการแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่กรุณาให้ทุนอุดหนุนการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ โครงการสู่ความเป็นเลิศสาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่กรุณาให้ทุนค่าเล่าเรียนแก่ข้าพเจ้าระหว่างการศึกษา

ขอขอบพระคุณ บุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ขอขอบคุณพี่น้อง และเพื่อนๆทุกท่านที่ให้อกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด ตลอดจนขอบคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ด้วย ที่มีส่วนให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

จิรัชญา ช่วยเกลี้ยง

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(7)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(15)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	4
2.1 น้ำมันปาล์ม	4
2.2 แก๊ส โซลีน (Gasoline)	4
2.3 ออกเทนนัมเบอร์ (Octane number)	5
2.4 กระบวนการแตกกิ่ง (Cracking)	7
2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาในการคะตะไลติกแตกกิ่ง	14
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	30
3.1 วัสดุ	30
3.2 อุปกรณ์	31
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	42
4.1 ผลศึกษาห่มู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา	42
4.2 ผลการศึกษาช่วงอุณหภูมิโดยเครื่อง TGA	45
4.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์	47

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.4 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ ใช้แล้ว	65
4.5 การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันสำหรับรายจาก ขนาดเล็ก	70
4.6 การควบคุมมลสารของการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากกระบวนการคละตะไลติก แครกกิ่ง	73
4.7 การวิเคราะห์แก๊สในของเหลวอินทรีย์	76
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	78
5.1 สรุป	78
5.2 ข้อเสนอแนะ	81
บรรณานุกรม	82
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบ	86
ภาคผนวก ข วิธีและสถานะวิเคราะห์	106
ภาคผนวก ค กระบวนการคละตะไลติกแครกกิ่งด้วยเครื่อง Fixed-bed micro reactor	110
ภาคผนวก ง กราฟมาตรฐานของสารมาตรฐานและโครมาโตแกรมของ OLP	113
ภาคผนวก จ การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน	120
ประวัติผู้แต่ง	127

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2- 1 แสดงคุณสมบัติเชิงเปลืองของแก๊สโซลีน	5
ตารางที่ 2- 2 แสดงออกเทนนัมเบอร์ของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ	7
ตารางที่ 2-3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยกระบวนการ คะตะไลติกแครกกิ่ง	15
ตารางที่ 2-4 ตารางแสดงเชื้อเพลิงที่ได้ วัตถุประสงค์ ถึงปฏิกรณ์และสภาวะที่ใช้ ในการดำเนินการ	28
ตารางที่ 3- 1 แสดงตารางการทดลองที่ได้จากการออกแบบของโปรแกรม RSM	37
ตารางที่ 3-2 แสดงตารางการทดลองศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของ เบนซินและไอโซออกเทน	38
ตารางที่ 3-3 แสดงตารางการทดลองศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อความเข้มข้น ของเบนซินและไอโซออกเทน	38
ตารางที่ 4-1 แสดงการเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค FT-IR ของตัวเร่ง ปฏิกิริยา H-ZSM-5 ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ	44
ตารางที่ 4-2 แสดงการทดลองออกแบบโดยโปรแกรม RSM และ ร้อยละผลได้ ของ OLP	51
ตารางที่ 4-3 แสดงค่าความแปรปรวน (p-value) ที่ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยหน้า ตัวแปรตามสมการ (4.1)	52
ตารางที่ 4-4 แสดงค่าความแปรปรวน (p-value) ที่ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยหน้า ตัวแปรตามสมการ (4.2)	53
ตารางที่ 4-5 แสดงการเปรียบเทียบผลได้ของ OLP ที่อัตราการใช้ของ ไนโตรเจนต่างๆ	55
ตารางที่ 4-6 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของเบนซินและ ไอโซออกเทนใน OLP	57
ตารางที่ 4-7 แสดงอิทธิพลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นของ เบนซินและไอโซออกเทนใน OLP	57
ตารางที่ 4-8 แสดงผลได้ของ OLP ในการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์	59

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
<p>ตารางที่ 4-9 แสดงร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของ แก๊สโซลีนในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีน จากน้ำมันปาล์มรีไฟน์</p>	61
<p>ตารางที่ 4-10 แสดงร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของ แก๊สโซลีนในการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่าน การปรับสภาพเพื่อกลับมาใช้ใหม่ที่สภาวะที่เหมาะสมของ RPO</p>	63
<p>ตารางที่ 4-11 แสดงองค์ประกอบ C8-C24 ของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ก่อนกระบวนการ คะตะไลติกแครกกิ่ง และ OLP จากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่ง</p>	65
<p>ตารางที่ 4-12 แสดงร้อยละผลได้ของ OLP ในการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว</p>	67
<p>ตารางที่ 4-13 แสดงผลได้ของ OLP และผลได้ของแก๊สโซลีนในการหาสภาวะที่ เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว</p>	68
<p>ตารางที่ 4-14 แสดงองค์ประกอบ C8-C24 ของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วก่อนและ OLP กระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่ง</p>	70
<p>ตารางที่ 4-15 แสดงองค์ประกอบ C8-C24 ของน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็ก สายพันธุ์ <i>Chlorella</i> sp.</p>	71
<p>ตารางที่ 4-16 แสดงสภาวะที่ใช้ทดลองและร้อยละผลได้ของ OLP จากกระบวนการ คะตะไลติกแครกกิ่งน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก</p>	71
<p>ตารางที่ 4-17 แสดงร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของ แก๊สโซลีนในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก</p>	72
<p>ตารางที่ 4-18 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของ ส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนของน้ำมันปาล์มรีไฟน์และน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก</p>	72
<p>ตารางที่ 4-19 แสดงการควบคุมจากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่งจาก RPO ในการหาตัวเร่งปฏิกิริยาและความเร็วปฏิกิริยาที่เหมาะสม</p>	74

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4-20 แสดงการควบคุมจากกระบวนการคະตะไลติกแครกกิ่ง จาก RPO ในการหาอุณหภูมิที่เหมาะสม	74
ตารางที่ 4-21 แสดงการควบคุมจากกระบวนการคະตะไลติกแครกกิ่ง จาก UPO ในการหาตัวเร่งปฏิกิริยาและความเร็วปฏิกิริยาที่เหมาะสม	75
ตารางที่ 4-22 แสดงการควบคุมจากกระบวนการคະตะไลติกแครกกิ่ง จาก UPO ในการหาอุณหภูมิที่เหมาะสม	76
ตารางที่ 4-23 แสดงผลการวิเคราะห์ก๊าซไนโตรเจน มีเทน และคาร์บอน- ไดออกไซด์ในก๊าซหลังการคະตะไลติกแครกกิ่งของน้ำมันปาล์มรีไฟน์	77

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพประกอบที่ 2- 1 แสดง โครงสร้างของไอโซออกเทนและนอร์มอลเฮปเทน	6
ภาพประกอบที่ 2- 2 แสดงการเกิดเรดิคอลอิสระในขั้นตอนเริ่มต้น	8
ภาพประกอบที่ 2-3 แสดงการเกิดปฏิกิริยาถูกโซ่แบบต่อเนื่อง	9
ภาพประกอบที่ 2- 4 แสดงการหยุดปฏิกิริยาของกระบวนการเทอร์มอลแครกกิ่ง	9
ภาพประกอบที่ 2-5 แสดงการเกิดคาร์โบเนียมไอออน	11
ภาพประกอบที่ 2-6 แสดงปฏิกิริยาการแตกตัวของพันธะคาร์บอน-คาร์บอน	12
ภาพประกอบที่ 2-7 (a) การเปลี่ยนตำแหน่งของไฮโดรเจน	
(b) การเปลี่ยนตำแหน่งของเมทิล	12
ภาพประกอบที่ 2-8 แสดงปฏิกิริยาการเกิดโมเลกุลวงแหวน	13
ภาพประกอบที่ 2-9 แสดงปฏิกิริยาการเกิดโมเลกุลของโอลีฟิน	13
ภาพประกอบที่ 2-10 แสดงปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน	13
ภาพประกอบที่ 2-11 แสดงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนภายในโมเลกุล	13
ภาพประกอบที่ 2-12 แสดงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ZSM-5	18
ภาพประกอบที่ 2-13 แสดงการเลือกสารตั้งต้น การเลือกผลิตภัณฑ์	
การเลือกสภาวะทรานซิชัน และทิศทางเคลื่อนที่ของโมเลกุล	19
ภาพประกอบที่ 2-14 แสดงแผนผังของ Bronsted acid site และ Lewis acid site	
ในซีโอไลต์	19
ภาพประกอบที่ 2-15 แสดงแผนภาพกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาเป็น	
อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน	21
ภาพประกอบที่ 2-16 แสดงแผนผังของเครื่อง Tubular reactor	25
ภาพประกอบที่ 2-17 Three-Lump Kinetic Model	25
ภาพประกอบที่ 3- 1 แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5	34
ภาพประกอบที่ 3- 2 แสดงแผนภาพกระบวนการกะตะไลติกแครกกิ่ง	35
ภาพประกอบที่ 3-3 แสดงลำดับการทดลองการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต	
ไบโอแก๊สโซลีน	41

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพประกอบที่ 4-1 แสดงสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา NH4-ZSM-5 โดย FT-IR spectroscopy	43
ภาพประกอบที่ 4-2 แสดงสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 โดย FT-IR spectroscopy	43
ภาพประกอบที่ 4-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำมันปาล์มรีไฟน์โดยเครื่อง TGA	45
ภาพประกอบที่ 4-4 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว โดยเครื่อง TGA	45
ภาพประกอบที่ 4-5 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำมันสำหรับขนาดเล็ก โดยเครื่อง TGA	46
ภาพประกอบที่ 4-6 แสดงแผนภาพกระบวนการคละไลติกแครกกิ่ง	48
ภาพประกอบที่ 4-7 แสดงชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการคละไลติกแครกกิ่ง	49
ภาพประกอบที่ 4-8 แสดงร้อยละผลได้ของ OLP จากการเทอร์มอลแครกกิ่ง ที่อุณหภูมิต่างๆ	50
ภาพประกอบที่ 4-9 แสดงภาพพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและ ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลได้ของ OLP	54
ภาพประกอบที่ 4- 10 แสดงผังการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต ไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์	58
ภาพประกอบที่ 4-11 แสดงความสัมพันธ์ของตัวเร่งปฏิกิริยากับผลได้ของ OLP	60
ภาพประกอบที่ 4- 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของ OLP และ ร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนกับอุณหภูมิ	62
ภาพประกอบที่ 4-13 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีน และร้อยละผลได้ของ OLP จากการใช้ H-ZSM-5, Reused H-ZSM-5 และ Regenerated H-ZSM-5	64
ภาพประกอบที่ 4-14 แสดงผังการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอ แก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว	66

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพประกอบที่ 4-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับ ร้อยละผลได้ของ OLP	67
ภาพประกอบที่ 4-16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของ OLP และ ร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนกับอุณหภูมิ	69
ภาพประกอบที่ 4-17 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของ OLP และ ร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนของน้ำมันจาก สาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันปาล์มรีไฟน์	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

น้ำมันถือว่าเป็นของเหลวที่มีค่าทางเศรษฐกิจ โดยเฉพาะประเทศอุตสาหกรรมทั่วโลก สำหรับประเทศไทย มีการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ข้อมูลจากกระทรวงพลังงานประจำปี 2555 น้ำมันสำเร็จรูปเป็นเชื้อเพลิงที่มีการใช้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 48 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด การใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของประเทศไทยมีปริมาณ 73,316 พันตันเทียบกับน้ำมันดิบ เป็นปริมาณน้ำมันสำเร็จรูป 32,187 พันตันเทียบกับน้ำมันดิบ ซึ่งเพิ่มจากปี 2554 ร้อยละ 6.4 น้ำมันสำเร็จรูปประกอบด้วย น้ำมันดีเซล น้ำมันเบนซิน แก๊สปิโตรเลียมเหลว น้ำมันเครื่องบิน น้ำมันเตา และน้ำมันก๊าด โดยน้ำมันเบนซินและดีเซลมีส่วนการใช้ที่สูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ การใช้น้ำมันเบนซินคิดเป็นร้อยละ 14.7 ของน้ำมันสำเร็จรูปทั้งหมด (กระทรวงพลังงาน, 2555) น้ำมันเชื้อเพลิงในปัจจุบันนั้นส่วนใหญ่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม การเกิดปิโตรเลียมต้องใช้เวลาหลายล้านปี เมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันทั้งหมดไปเพียงเวลาไม่กี่ปี ส่งผลให้สถานการณ์ราคาน้ำมันในปัจจุบันมีแนวโน้มสูงขึ้นและอยู่ในสถานะที่เรียกว่า วิกฤติพลังงาน นอกจากนี้ภาวะโลกร้อน (Global warming) นับเป็นอีกปัญหาสำคัญที่ต้องร่วมมือในการแก้ไข การใช้พลังงานจากปิโตรเลียมส่งผลต่อภาวะโลกร้อนโดยตรง เนื่องจากมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นเหตุให้ไปทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ ดังนั้นการลดการใช้ปิโตรเลียมจึงเป็นหนทางที่จะช่วยลดปัญหาดังกล่าว การนำพลังงานในรูปแบบอื่นมาทดแทนพลังงานฟอสซิลนับว่าเป็นสิ่งที่สำคัญ ปัจจุบันมีการศึกษาการใช้พลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ ไบโอดีเซล ไบโอดีเซล (Biogasoline) เป็นอีกหนึ่งพลังงานทดแทนที่ได้รับความสนใจศึกษาและพัฒนา เพื่อนำมาใช้ทดแทนน้ำมันเบนซิน โดยมีการพัฒนาไบโอดีเซลจากชีวมวลชนิดต่างๆ ที่เป็นพืชน้ำมันทั้งชนิดที่สามารถรับประทานได้และรับประทานไม่ได้มาใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น ปาล์มน้ำมัน ถั่วเหลือง ดอกทานตะวัน มะพร้าว และสาหร่ายขนาดเล็ก

น้ำมันปาล์มสกัดได้จากปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นพืชที่ให้ปริมาณน้ำมันสูง มีปริมาณการผลิตมากที่สุดในโลก สำหรับประเทศไทยมีพื้นที่ให้ผลผลิตน้ำมันปาล์มเป็นอันดับ 4 ของโลก (World market,

2011) สามารถผลิตได้ในปริมาณมาก ต้นทุนต่ำ และเป็นส่วนหนึ่งในการสนับสนุนหรือเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร น้ำมันปาล์มเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน ดังนั้นการใช้ น้ำมันปาล์มรีไฟน์ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษาเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาการผลิตไบโอแก๊สโซลีน ให้มีมูลค่าเพิ่มมากขึ้นในอนาคต นอกจากนี้ยังศึกษาการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์แล้ว เพื่อเพิ่มมูลค่าของน้ำมันและเป็นการลดการแย่งน้ำมันจากพืชบริโภค การผลิตแก๊สโซลีนนิยมใช้กระบวนการคะตะไลติกแครกกิง (Catalytic cracking) ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งในการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของน้ำมันหนัก (Heavy oil) ที่เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่ยาวให้เป็นแก๊สโซลีนและผลผลิตที่มีโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนที่มีสายสั้นลง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งขนาดโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ขึ้นกับชนิดและความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา ขนาดโมเลกุลของไบโอแก๊สโซลีนอยู่ในช่วงโมเลกุลระหว่าง C_5-C_{11} ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาวิธีการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันพืชให้มีประสิทธิภาพในอนาคต โดยใช้การทดสอบการแตกตัวในห้องปฏิบัติการ ดำเนินการใน Fixed-bed micro reactor เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีน ใช้สารป้อนเป็นน้ำมันปาล์มรีไฟน์ น้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว และน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็ก ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในกระบวนการคะตะไลติกแครกกิง ด้วยคุณสมบัติในการควบคุมขนาดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะการเลือกเกิดเป็นแก๊สโซลีน ใช้โปรแกรม Response surface methodology (RSM) ในการออกแบบการทดลองเพื่อหาช่วงสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ ซึ่งพิจารณาจากประสิทธิภาพการแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ (Organic liquid product, OLP) เพื่อหาช่วงสภาวะที่เหมาะสม จากนั้นศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์และน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว โดยออกแบบการทดลองจากการเลือกช่วงสภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม RSM และพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมจากร้อยผลได้ของเหลวอินทรีย์ (Yield of OLP) และการเลือกเกิดเป็นแก๊สโซลีน (Gasoline selectivity) โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา ความเร็วปริภูมิ (Weight hourly space velocity, WHSV) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก

1.2 วัตถุประสงค์

- (1) สร้างและติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการคะตะไลติกแครกกิ่งเพื่อการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันพืช
- (2) ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีน (C_5-C_{11}) จากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ และน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ความเร็วปฏิกิริยา และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
- (3) ศึกษาสถานะที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนด้วยน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็ก

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- (1) ได้รับความรู้เกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีน และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในเชิงอุตสาหกรรม
- (2) ทราบสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ น้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการปรับปรุงวิธีการผลิตไบโอแก๊สโซลีน
- (3) ทราบความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนโดยกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่งด้วยน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็ก

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 น้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันพืชที่สกัดได้จากปาล์มน้ำมัน เป็นพืชเศรษฐกิจทางภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งเป็นพืชที่ให้ปริมาณน้ำมันสูง มีปริมาณการผลิตมากที่สุดในโลก สำหรับประเทศไทยมีพื้นที่ให้ผลผลิตน้ำมันปาล์มเป็นอันดับ 4 ของโลก (World market, 2011) สามารถผลิตได้ในปริมาณมาก ต้นทุนต่ำ นับเป็นแหล่งวัตถุดิบที่หาง่าย เหมาะกับการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน ปาล์มน้ำมันจัดอยู่ในตระกูล Palme หรือ Palmaceae เป็นตระกูลย่อยเดียวกับมะพร้าว ปาล์มน้ำมันออกผลเป็นทะลาย ส่วนของผลมีเปลือกชั้นนอก (Exocarp) และชั้นกลาง (Mesocarp) ที่ประกอบด้วยเยื่อไขมัน โดยมีไขมันรวมประมาณ 73.2% โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อคั้นออกมาได้ผลผลิตที่เรียกว่า น้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil, CPO) กระบวนการเริ่มจากการหีบผลปาล์มสุกเพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มดิบแล้วกลั่นเป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์หรือน้ำมันปาล์มรีไฟน์ (Refined palm oil, RPO)

น้ำมันปาล์มมีไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นเอสเทอร์ชนิดหนึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมัน ซึ่งเกิดจากกลีเซอรอลและกรดไขมัน โดยที่กรดไขมันเข้าไปแทนที่ไฮโดรเจนในตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอล กรดไขมันในน้ำมันปาล์มโดยส่วนใหญ่มีความยาวของโซ่ไฮโดรคาร์บอนอยู่ในช่วง C_{12} - C_{20} โดยมีส่วนประกอบเป็นกรดไขมันอิ่มตัว คือ กรดปาล์มเมติก (Palmetic, $C_{16}:0$) และมีส่วนประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัว คือ กรดโอเลอิก (Oleic, $C_{18}:1$) เป็นองค์ประกอบหลัก สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันปาล์ม ความหนาแน่นใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความบริสุทธิ์ของน้ำมันปาล์ม ปริมาณของน้ำมันปาล์มที่แข็งตัวเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณของไขมันในน้ำมัน (Solid fat content) ที่อุณหภูมินั้นๆ ในสถานะที่ไม่ได้มีการควบคุมอุณหภูมิ น้ำมันปาล์มจะมีทั้งส่วนที่เป็นของแข็ง (Stearin) และส่วนที่เป็นของเหลว (Olein)

2.2 แก๊สโซลีน (Gasoline)

แก๊สโซลีนเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์ (Organic compound) ที่มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) แก๊สโซลีนถูกใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engine) จำนวนคาร์บอนอะตอมของแก๊สโซลีนอยู่ในช่วง C_5 - C_{11} จึงมีน้ำมันหลายชนิดปนอยู่ คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแก๊สโซลีนแสดงดังตารางที่ 2- 1 การกำหนดคุณภาพของ

น้ำมันเบนซินที่ใช้กับเครื่องยนต์เบนซินถูกกำหนดด้วยค่าที่เป็นตัวเลข เรียกว่า ออกเทนัมเบอร์ (Octane number) น้ำมันที่มีคุณภาพดีจะมีค่าออกเทนสูง โครงสร้างโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของแก๊สโซลีนมีลักษณะแตกต่างกันซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มต่างๆ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ตามลักษณะโครงสร้างโมเลกุล ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอนแบบโซ่ตรง ไฮโดรคาร์บอนแบบโซ่กิ่ง ไฮโดรคาร์บอนแบบวง และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (มาลี สันติคุณาภรณ์ และคณะ, 2553) ไฮโดรคาร์บอนอิมตัวเป็นองค์ประกอบที่ทำให้แก๊สโซลีนมีค่าออกเทนัมเบอร์ต่ำ เช่น พาราฟิน (C_{19} - C_{36}) ส่วนไฮโดรคาร์บอนไม่อิมตัวและอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่ทำให้แก๊สโซลีนมีค่าออกเทนัมเบอร์สูง เช่น ไอโซออกเทน (C_8) ไอโซเบนซิน (C_6) โอลีฟิน (C_nH_{2n})

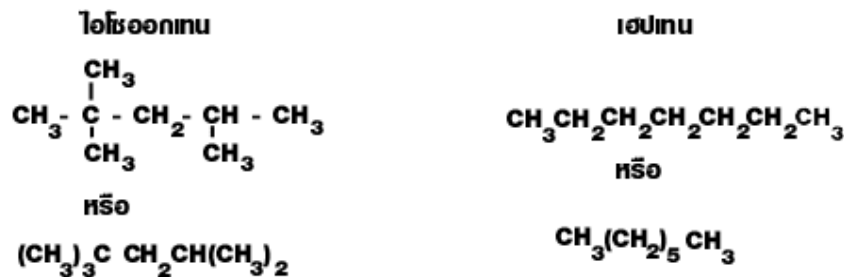
ตารางที่ 2-1 แสดงคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ของแก๊สโซลีน (ณัฐกฤตต์ เพชรนะ, 2554)

คุณสมบัติ	ค่า
สูตร โครงสร้าง	C_5 - C_{11}
น้ำหนักโมเลกุล	100-105
ความถ่วงจำเพาะ, $150^\circ\text{C}/15^\circ\text{C}$	0.72-0.78
ความหนาแน่น, g/ml	0.73-0.805
จุดเดือด, $^\circ\text{C}$	27-225
เลขออกเทน	90-100
จุดเยือกแข็ง, $^\circ\text{C}$	-40
จุดสันดาป, $^\circ\text{C}$	257

2.3 ออกเทนัมเบอร์ (Octane number)

ออกเทนัมเบอร์เป็นการวัดคุณสมบัติความต้านทานการชิงจุดระเบิดในแก๊สโซลีน หากส่วนผสมของน้ำมันกับอากาศที่นำไปเผาไหม้เครื่องยนต์เกิดการชิงจุดระเบิดก่อนการเผาไหม้จริง ทำให้เกิดแรงดันการขับเคลื่อนของลูกสูบเครื่องยนต์และทำให้เครื่องยนต์เกิดความเสียหาย โดยออกเทนัมเบอร์เป็นการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างไอโซออกเทน ($\text{iso-C}_8\text{H}_{18}$) ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์ที่ใช้แก๊สโซลีน เพราะช่วยป้องกันการชิงจุดระเบิด ส่งผลให้เครื่องยนต์เดินเรียบ กับนอร์มอลเฮปเทน ($\text{n-C}_7\text{H}_{16}$) ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนชนิดโซ่ตรง ทำให้เครื่องยนต์เกิดการชิงจุดระเบิดได้ง่าย เปรียบเทียบกันในกลุ่มระหว่างไอโซออกเทนและนอร์มอลเฮปเทน โครงสร้างของสารแสดงดังภาพประกอบที่ 2-1 ไอโซออกเทนมีออกเทนัมเบอร์เป็น 100 ในขณะที่นอร์มอลเฮปเทนมีออกเทนัม

เบอร์เป็น 0 โดยทั่วไปมีอัตราส่วนของไอโซออกเทนต่อนอร์มอลเฮปเทนเป็น 60: 40 ออกเทนัมเบอร์ จึงเป็นตัวเลขที่ใช้บอกคุณภาพของน้ำมันเบนซินในรถยนต์ แก๊สโซลีนที่ดีควรมีค่าออกเทนสูงและเหมาะสมกับค่าอุณหภูมิและความดันภายในกระบอกสูบ เมื่อของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศถูกอัดภายในกระบอกสูบเชื้อเพลิงจะไม่สามารถติดไฟได้เองจนกระทั่งมีประกายไฟจากหัวเทียนเป็นตัวจุดระเบิด ออกเทนัมเบอร์ในแก๊สโซลีนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มไฮโดรคาร์บอนโซ่กิ่งและอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งสามารถเพิ่มไฮโดรคาร์บอนเหล่านั้นได้โดยใช้ ปฏิกิริยาอะคะตะไลติกแครกกิง (Catalytic cracking) ปฏิกิริยาไอโซเมไรเซชัน (Isomerization) และปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจน (Dehydrogenation) ออกเทนัมเบอร์ที่นิยมใช้โดยทั่วไปมี 2 ชนิด คือ ค่าออกเทนัมเบอร์ที่วัดโดยวิธีวิจัย (Research octane number, RON) และออกเทนัมเบอร์ที่วัดโดยวิธีมอเตอร์ (Motor octane number, MON) สำหรับประเทศไทยจะแสดงเฉพาะ RON ค่าออกเทนของสารไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากันทั้งนี้ขึ้นกับโครงสร้างโมเลกุลและขนาดโมเลกุลหรือจำนวนคาร์บอนอะตอมในโมเลกุล โครงสร้างโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของแก๊สโซลีนมีลักษณะแตกต่างกันซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มต่างๆตามลักษณะโครงสร้างโมเลกุล ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอนแบบโซ่ตรง ไฮโดรคาร์บอนแบบโซ่กิ่ง ไฮโดรคาร์บอนแบบวง และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งออกเทนัมเบอร์ของไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2-2



ภาพประกอบที่ 2- 1 แสดงโครงสร้างของไอโซออกเทนและนอร์มอลเฮปเทน

ตารางที่ 2- 2 แสดงออกเทนน้ำมันเบอร์รี่ของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ (G.D Hobsonc และคณะ, 1994)

Hydrocarbon	RON	MON
<u>PARAFINS</u>		
2,2-dimethylpentane	>100	>100
2,2,3-trimethylpentane	100	100
2,2,4-trimethylpentane	100	100
<u>OLEFINS</u>		
2,2,4-trimethyl-1 pentene	>100	86
2,2,4-trimethyl-2 pentene	>100	86
<u>AROMATICS</u>		
Benzene	>100	>100
Toluene	>100	>100
o-xylene	>100	>100
m-xylene	>100	>100
p-xylene	>100	>100
Ethylbenzene	>100	98

2.4 กระบวนการแตกกิ่ง (Cracking)

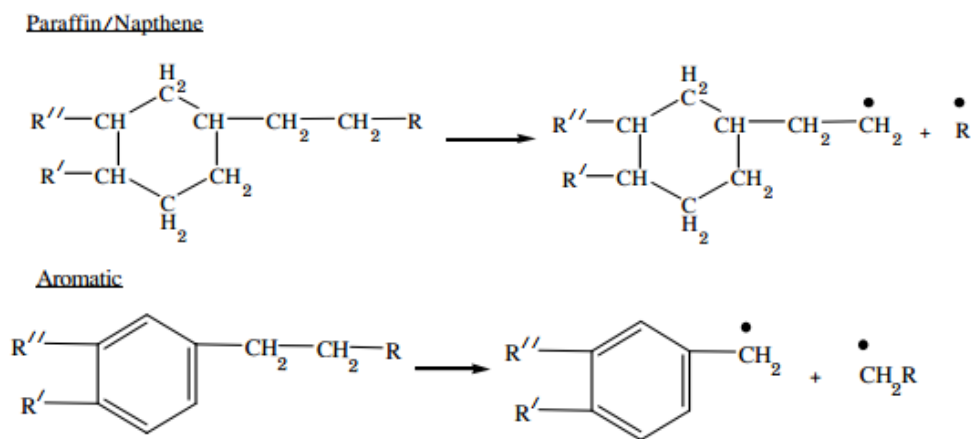
กระบวนการแตกกิ่งเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันหนักที่เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ให้แตกออกเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง และทำให้สามารถใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น มีความสำคัญในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน สามารถทำได้ดังนี้

2.4.1 กระบวนการเทอร์มอลแตกกิ่ง (Thermal cracking)

กระบวนการเทอร์มอลแตกกิ่งเป็นกระบวนการแตกตัวโมเลกุลน้ำมันที่เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ให้เป็นไฮโดรคาร์บอนที่โมเลกุลเล็กลงด้วยการใช้ความร้อน ซึ่งการใช้ความร้อนในการแตกตัวนี้ถ้าเป็นไปได้อย่างรวดเร็วให้มีโมเลกุลขนาดพอดี คือให้สภาพการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่พอเหมาะ เพราะหากแตกตัวมากเกินไปทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กเกินไปจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ ซึ่งมี

ความสำคัญกับอุตสาหกรรมน้อย กระบวนการเทอร์มอลแตกกิ่งจัดเป็นปฏิกิริยาแบบเรดิคอลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่สามารถควบคุมการแตกกิ่งของปฏิกิริยาได้ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไวต่อปฏิกิริยาหรือไม่เสถียร โดยเฉพาะส่วนที่มีพันธะของโอลิฟินและไดโอลิฟิน ผลิตภัณฑ์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากันต่อไปได้อีก เกิดพอลิเมอร์เชน (Polymerization) และคอนเดนเซชัน (Condensation) น้ำมันที่ได้จากกระบวนการนี้จึงไม่อยู่ตัว อาจเกิดเป็นตะกอนน้ำมันได้ง่ายและมีความหนืดเพิ่มขึ้น โดยปฏิกิริยาเทอร์มอลแตกกิ่งประกอบด้วยปฏิกิริยา 3 ขั้นตอน (รชต พิชจันทร์, 2547) ดังนี้

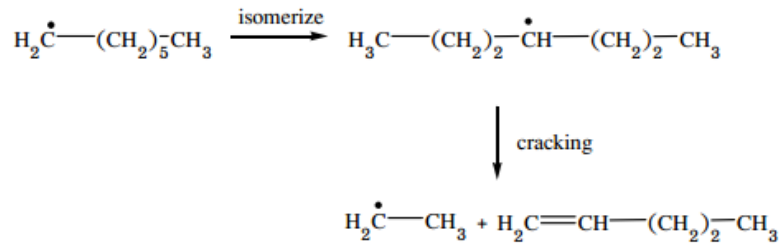
1. การเริ่มต้น (Initiation) คือการเกิดเรดิคอลอิสระ ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนแตกออกจากกันและเกิดเป็นเรดิคอลอิสระ เป็นต้นกำเนิดของปฏิกิริยาอื่นๆต่อไป ตัวอย่างของการเริ่มต้นการเกิดเรดิคอลอิสระ แสดงดังภาพประกอบที่ 2-2



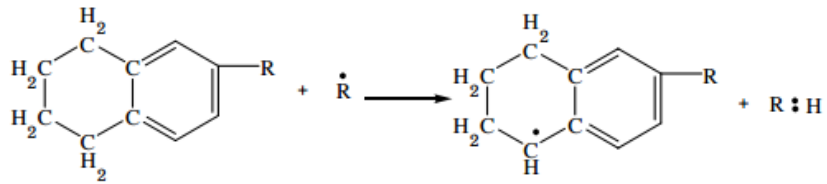
ภาพประกอบที่ 2-2 แสดงการเกิดเรดิคอลอิสระในขั้นตอนเริ่มต้น (รชต พิชจันทร์, 2547)

การเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (Chain-Carrying) เรดิคอลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่อง เกิดการเปลี่ยนรูปไอโซเมอร์และแตกตัวออกเป็นโมเลกุลย่อยต่อไป พร้อมกับเกิดเรดิคอลอิสระตัวใหม่ขึ้น เรดิคอลอิสระอาจทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นเกิดเป็นเรดิคอลตัวใหม่ และไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลง ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ตัวอย่างของการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ แสดงดังภาพประกอบที่ 2-3

Isomerisation, Cracking



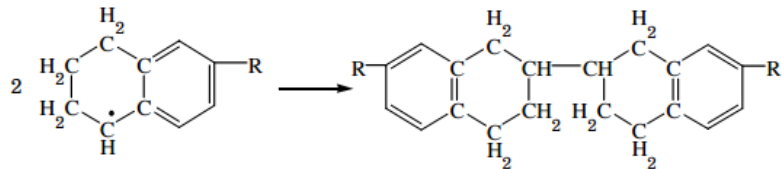
Chain transfer



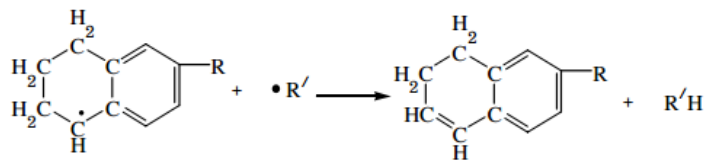
ภาพประกอบที่ 2-3 แสดงการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่แบบต่อเนื่อง (รชต พีชจันทร์, 2547)

2. การหยุดปฏิกิริยา (Termination) เรดิคอลจะหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่อง โดยการทำให้ปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ ซึ่งอาจเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่เดี่ยว หรือไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล ตัวอย่างของการหยุดปฏิกิริยา แสดงดังภาพประกอบที่ 2- 4

Coupling



Disproportionation



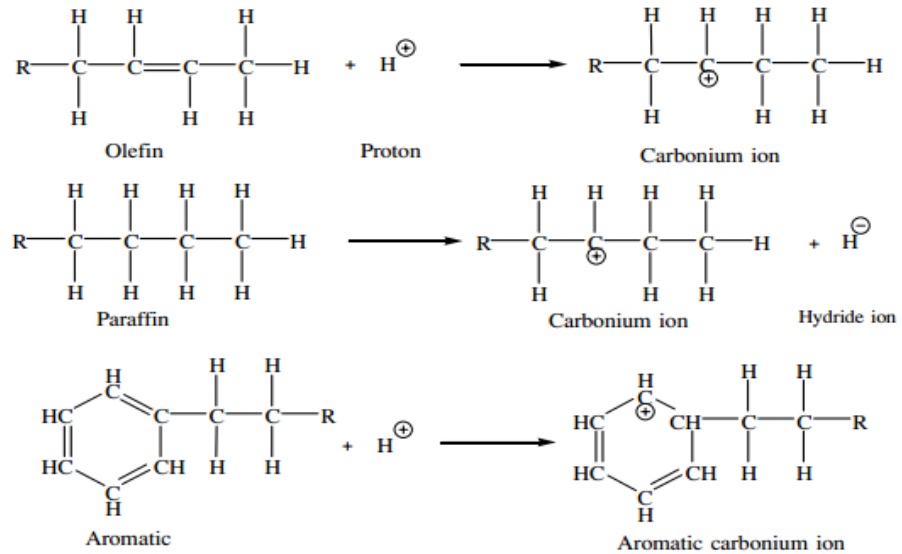
ภาพประกอบที่ 2- 4 แสดงการหยุดปฏิกิริยาของกระบวนการเทอร์มอลแครกกิง (รชต พีชจันทร์, 2547)

2.4.2 กระบวนการคะตะไลติกแครกกิง (Catalytic Cracking)

กระบวนการคะตะไลติกแครกกิงเป็นการแตกตัวไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ให้เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กเช่นเดียวกันกับกระบวนการเทอร์มอลแครกกิง แต่แตกต่างกันที่กระบวนการคะตะไลติกแครกกิงจะเกิดการแตกตัวโดยตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการที่เป็นไฮโดรคาร์บอนที่ให้ค่าออกเทนสูงกว่าการใช้เทอร์มอลแครกกิง จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิงมีโอกาสในการเกิดเป็นแก๊สโซลีนได้สูงกว่า ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์เป็นไอโซพาราฟิน (Iso-parafin) และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic hydrocarbon) ซึ่งไฮโดรคาร์บอนทั้งสองประเภทนี้ให้ออกเทนัมเบอร์ที่สูงกว่าและมีความเสถียรกว่าโอลีฟิน (Olefin) และ ไดโอลีฟิน (Diolen) ซึ่งโอลีฟินและไดโอลีฟินส่วนมากพบในการใช้กระบวนการเทอร์มอลแครกกิง นอกจากนี้แก๊สโซลีนที่ได้จากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิงให้ซัลเฟอร์น้อยกว่าแก๊สโซลีนจากกระบวนการเทอร์มอลแครกกิง และทำให้สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าการใช้กระบวนการเทอร์มอลแครกกิงด้วย ซึ่งกระบวนการคะตะไลติกแครกกิงนั้นมีความสำคัญสำหรับการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพน้ำมันในเชิงอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้เกิดการแตกตัวของน้ำมันที่มีโมเลกุลสูงให้เป็นขนาดตามที่ต้องการและพอเหมาะได้ สามารถควบคุมการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน และกระบวนการคะตะไลติกแครกกิงยังให้เชื้อเพลิงที่มีออกเทนัมเบอร์สูง

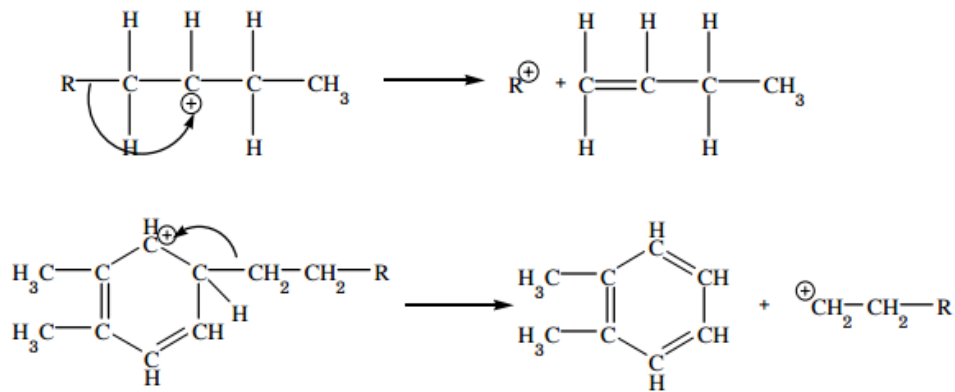
กระบวนการคะตะไลติกแครกกิงเป็นปฏิกิริยาที่เกิดผ่านคาร์โบเนียมไอออน ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน (รชต พิษจันทร์, 2547) ดังนี้

1. การเกิดคาร์โบเนียมไอออน โปรตอนจากตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนสำคัญ คาร์โบเนียมไอออนอาจเกิดจากโอลีฟิน พาราฟิน หรืออะโรมาติก โดยโปรตอนอาจรวมตัวกับพันธะคู่ของโอลีฟิน เกิดเป็นคาร์โบเนียมไอออนขึ้น หรือพาราฟินแตกตัวออกเป็นคาร์โบเนียมไอออนและไฮโดรด์ไอออน หรือโปรตอนรวมตัวเข้ากับโมเลกุลของอะโรมาติกทำให้เกิดอะโรมาติกคาร์โบเนียมไอออนขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-5 ซึ่งคาร์โบเนียมไอออนสามารถเกิดเป็น ไอออนปฐมภูมิ (Primary ions), ไอออนทุติยภูมิ (Secondary ions) หรือไอออนตติยภูมิ (Tertiary ions) ซึ่งไอออนตติยภูมิจะเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุด

Carbonium ion formation

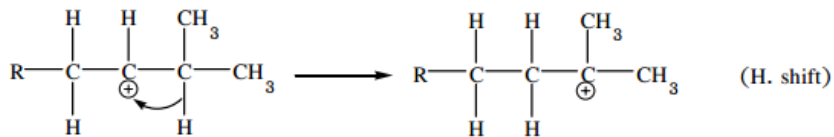
ภาพประกอบที่ 2-5 แสดงการเกิดคาร์โบเนียมไอออน (รชด พีชจันทร์, 2547)

2. ปฏิกิริยาห่วงโซ่ของคาร์โบเนียมไอออน เมื่อคาร์โบเนียมไอออนเกิดขึ้นแล้วจะทำปฏิกิริยาห่วงโซ่ต่อไป โดยเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเบต้าของพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่ตำแหน่งห่างจากอะตอมคาร์บอนที่มีประจุบวกสองพันธะ เนื่องจากพลังงานในการแตกพันธะตรงตำแหน่งนี้ต่ำกว่าพลังงานที่ใช้เพื่อแตกพันธะที่ตำแหน่งอื่นที่อยู่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-6 ไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่ยาวจะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่าไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่โมเลกุลสั้น ทำให้อัตราการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนลดลงเมื่อโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนสั้นลง ซึ่งเป็นผลมาจากการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้าของกระบวนการคะตะไลติกแครกกิง โดยคาร์โบเนียมไอออนที่เกิดขึ้นใหม่ในการแตกตัวนั้น สามารถเกิดปฏิกิริยาห่วงโซ่ได้อย่างต่อเนื่อง ไอออนขนาดเล็กจะมีความเสถียรกว่าและไม่แตกตัว ในที่สุดแล้วจะเกิดการถ่ายโอนประจุให้กับโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่า ประจุบวกที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวอย่างต่อเนื่องจะไม่หมดไปจนกระทั่งไอออนทั้งสองมาเจอกัน

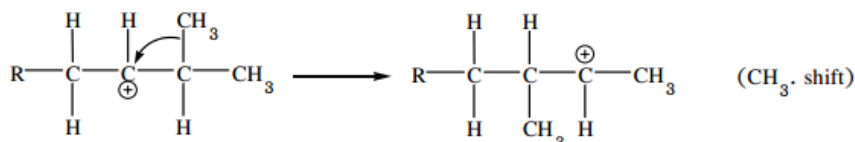


ภาพประกอบที่ 2-6 แสดงปฏิกิริยาการแตกตัวของพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (รชต พีชจันทร์, 2547)

คาร์โบเนียมไอออนสามารถเกิดการเปลี่ยนรูปไอโซเมอร์ (Isomerization) ได้ 2 วิธี คือ การเปลี่ยนตำแหน่งไฮโดรเจน (H-shift) แสดงดังภาพประกอบที่ 2-7(a) เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างประจุบวกกับไฮโดรเจน และการเปลี่ยนตำแหน่งเมทิล (Methyl shift) แสดงดังภาพประกอบที่ 2-7(b) เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างประจุบวกกับกลุ่มเมทิล ซึ่งมักเกิดปฏิกิริยานี้กับตำแหน่งคาร์บอนปฐมภูมิ (Primary carbon position) มากที่สุด สำหรับคาร์บอนทุติยภูมิ (Secondary carbon position) และตติยภูมิ (Tertiary carbon position) จะเกิดขึ้นน้อย ซึ่งนั่นทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไอโซพาราฟินมากกว่านอร์มอลพาราฟิน



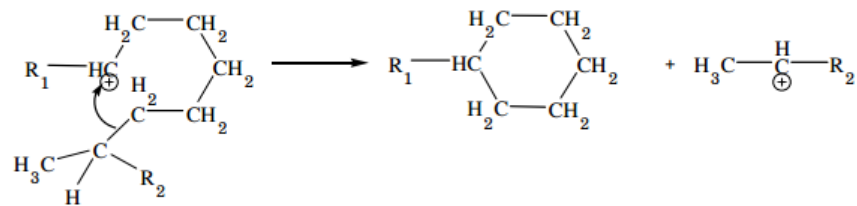
(a)



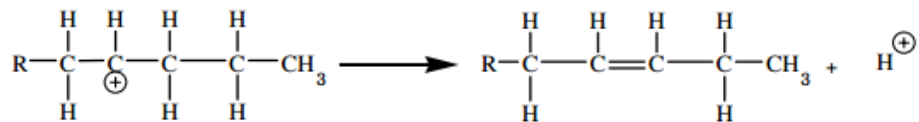
(b)

ภาพประกอบที่ 2-7 (a) การเปลี่ยนตำแหน่งของไฮโดรเจน (b) การเปลี่ยนตำแหน่งของเมทิล
(รชต พีชจันทร์, 2547)

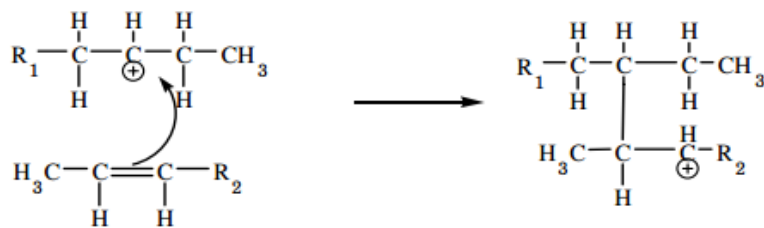
นอกจากนี้ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาการเกิด โมเลกุลของวงแหวน (Cyclization) แสดงดังภาพประกอบที่ 2-8 ซึ่งเป็นต้นกำเนิดของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ปฏิกิริยาการเกิด โมเลกุลของโอลีฟิน (Olefin formation) แสดงดังภาพประกอบที่ 2-9 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) แสดงดังภาพประกอบที่ 2-10 และปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนภายใน โมเลกุล (Intermolecular exchange) แสดงดังภาพประกอบที่ 2-11



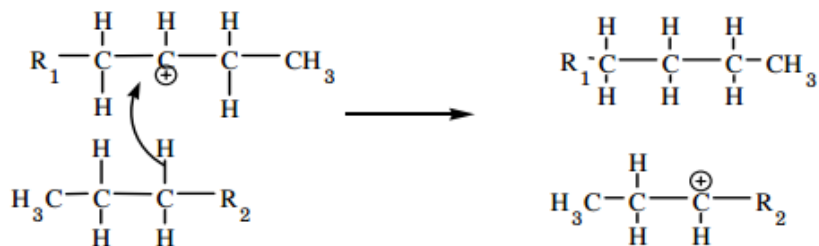
ภาพประกอบที่ 2-8 แสดงปฏิกิริยาการเกิด โมเลกุลวงแหวน (รชต พิชจันทร์, 2547)



ภาพประกอบที่ 2-9 แสดงปฏิกิริยาการเกิด โมเลกุลของโอลีฟิน (รชต พิชจันทร์, 2547)



ภาพประกอบที่ 2-10 แสดงปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (รชต พิชจันทร์, 2547)



ภาพประกอบที่ 2-11 แสดงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนภายใน โมเลกุล (รชต พิชจันทร์, 2547)

3. ปฏิกริยาหยุดห้วงโซ่ (Termination) คาร์โบเนียมไอออนจะหยุดปฏิกริยาห้วงโซ่ได้โดยการทำปฏิกริยากับคาร์โบเนียมไอออนด้วยกันเองหรือทำปฏิกริยากับตัวเร่งปฏิกริยาเอง เพื่อเป็นการหยุดห้วงโซ่ในการแตกตัว

2.5 ตัวเร่งปฏิกริยาในการคะตะไลติกแครกกิง

2.5.1 ตัวเร่งปฏิกริยาวิวิหพันธ์ (Heterogeneous catalyst)

ตัวเร่งปฏิกริยาวิวิหพันธ์คือตัวเร่งปฏิกริยาที่อยู่ในสถานะที่แตกต่างกับสารที่ทำปฏิกริยา เช่น ตัวเร่งปฏิกริยาเป็นของแข็ง สารตั้งต้นเป็นแก๊สหรือของเหลว การใช้ตัวเร่งปฏิกริยาแบบวิวิหพันธ์พบได้ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น ยา เชื้อเพลิง เส้นใยสังเคราะห์ เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกริยาแบบวิวิหพันธ์สามารถแยกตัวเร่งปฏิกริยาออกจากสารผลิตภัณฑ์หรือสารตั้งต้นได้ง่ายกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst)

ตัวเร่งปฏิกริยาแบบเอกพันธ์มีข้อดี คือมีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกริยาสูงและสามารถเลือกเร่งปฏิกริยาที่ต้องการได้ง่ายกว่า เนื่องจากตัวเร่งปฏิกริยาอยู่ในสถานะเดียวกับสารตั้งต้น สามารถศึกษากลไกปฏิกริยาได้ง่ายกว่า และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการแพร่ของสารตั้งต้นไปสู่ตัวเร่งปฏิกริยาเนื่องจากอยู่ในสถานะเดียวกัน แต่มีข้อเสียคือ การแยกตัวเร่งปฏิกริยาออกจากผลิตภัณฑ์หรือสารตั้งต้นที่เหลืออยู่นั้นทำได้ยาก วิธีที่ใช้ส่วนใหญ่คือการกลั่นหรือการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งทำให้การนำตัวเร่งปฏิกริยากลับมาใช้ใหม่นั้นทำได้ยาก

ตัวเร่งปฏิกริยาวิวิหพันธ์มีข้อดีคือ สามารถแยกสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ออกจากตัวเร่งปฏิกริยาได้ง่าย สามารถใช้ได้ทีสภาวะที่อุณหภูมิและความดันสูงได้ มีอายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกริยานานกว่า ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกริยาชนิดวิวิหพันธ์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกริยาที่มีสถานะแตกต่างกับสารตั้งต้น ซึ่งตัวเร่งปฏิกริยาที่ใช้กระบวนการคะตะไลติกแครกกิงมีดังนี้

1. ต้องเป็นตัวเร่งปฏิกริยาที่สามารถแยกสลายไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กได้
2. ทนต่อสภาวะที่อุณหภูมิสูงหรือความดันสูงได้
3. เกิดโค้กในปฏิกริยาน้อยที่สุด
4. ตัวเร่งปฏิกริยาต้องมีความเป็นกรด

5. มีความเสถียร

จากการรวบรวมข้อมูลผลงานวิจัยของบุคคลและคณะต่างๆ สามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ได้ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการคະตะไลติกแครกกิ้ง

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ข้อดี	ข้อเสีย
ตัวเร่งปฏิกิริยา : Zeolite REY วัตถุดิบ : น้ำมันปาล์ม ผลิตภัณฑ์ : แก๊สโซลีน แก๊ส OLP และองค์ประกอบของแก๊สโซลีน (Tamunaidu et al., 2007; Pramila et al., 2007)	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีการใช้โดยทั่วไปในการผลิตเชื้อเพลิงเหลว 2. ให้ผลได้ของแก๊สโซลีนสูง 3. ทนต่ออุณหภูมิสูง 4. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาก่อนข้างน้อย 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เกิดโค้กสูง 2. ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้มีองค์ประกอบของอะโรมาติกต่ำ
ตัวเร่งปฏิกิริยา : Nanocrystal line zeolite beta วัตถุดิบ : น้ำมันปาล์มใช้แล้ว ผลิตภัณฑ์ : เชื้อเพลิงชีวภาพ (Niken et al., 2010)	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีการใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม 2. มีสภาพความเป็นกรดสูงและมีรูพรุน 3. ทนต่ออุณหภูมิสูง 4. ผลิตภัณฑ์หลักเป็นไฮโดรคาร์บอนในช่วง C₇-C₁₂ 5. มีสภาพการเลือกเกิดเป็นแก๊สโซลีน 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่สามารถควบคุมสภาพการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์และการเข้าทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้น 2. ให้ผลได้ของแก๊สโซลีนแก๊สและน้ำสูง 3. เกิดโค้กสูง
ตัวเร่งปฏิกิริยา : MCM-41 วัตถุดิบ : พอลิเอทิลีน ผลิตภัณฑ์ : โอลีฟินส์ แก๊สโซลีน OLP และแก๊ส (Yared et al., 2008; Yean-Sang et al., 2004; Twaiq et al., 2003)	<ol style="list-style-type: none"> 1. ให้ค่า Conversion ของ Polyethylene ที่มีความหนาแน่นต่ำไปเป็นไฮโดรคาร์บอนได้สูง 2. ในการทำปฏิกิริยาแครกกิ้งของน้ำมันปาล์มสามารถกำจัด CO₂ จากไตรกลีเซอไรด์ได้ดี 3. สามารถทำปฏิกิริยาได้เมื่อเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เกิดโค้กสูง 2. มีปริมาณรูพรุนสูงทำให้เกิดโค้กง่าย 3. มีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ต่ำ

	<p>4. ผลิตโอเลฟินได้สูง ซึ่งให้ค่าออกเทนัมเบอร์สูง</p> <p>5. มีการกระจายของรูพรุนสม่ำเสมอ</p> <p>6. ให้สภาพการเลือกเกิดของ C_5 สูง</p>	
<p>ตัวเร่งปฏิกิริยา : ZSM-5</p> <p>วัตถุดิบ : น้ำมันปาล์ม</p> <p>ผลิตภัณฑ์ : แก๊สโซลีน แก๊ส OLP และองค์ประกอบของแก๊สโซลีน</p> <p>(Corma et al.,2007; Dupain et al., 2006 และ Twaiq et al., 2003)</p>	<p>1. โมเลกุลประกอบด้วยโครงสร้างที่มีรูพรุน</p> <p>2. ผลได้ของแก๊สโซลีนสูง</p> <p>3. สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีในสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่</p> <p>4. มีการใช้ทั่วไปในการผลิตเชื้อเพลิงเหลว</p> <p>5. ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวซึ่งมีองค์ประกอบของอะโรมาติกสูง</p> <p>6. เกิดโค้กน้อย</p>	<p>1. ทำปฏิกิริยาในสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กได้น้อย</p>
<p>ตัวเร่งปฏิกิริยา : Fe/Activated Carbon</p> <p>วัตถุดิบ : น้ำมันปาล์ม</p> <p>ผลิตภัณฑ์ : แก๊สโซลีน แก๊ส OLP และองค์ประกอบของแก๊สโซลีน</p> <p>(พูนสุข พังพรรณ และคณะ, 2002)</p>	<p>1. ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวที่มีเนฟทาสูง</p> <p>2. สามารถแยกสลายไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีโมเลกุลขนาดเล็ก</p> <p>3. ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไม่นาน</p>	<p>1. ให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวที่เป็นองค์ประกอบของอะโรมาติกต่ำ</p> <p>2. เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กับสารตั้งที่เป็นพอลิเมอร์</p> <p>3. เกิดโค้กง่ายมาก</p> <p>4. เหลือผลิตภัณฑ์ที่เป็นโมเลกุลที่มีสายโซ่ยาว</p>
<p>ตัวเร่งปฏิกิริยา : Modified ZSM-5 zeolite</p> <p>วัตถุดิบ : ไฮโดรคาร์บอนหนัก</p> <p>ผลิตภัณฑ์ : โอเลฟินส์เบา</p> <p>(Nazi et al., 2011)</p>	<p>1. ให้ผลได้ของโอเลฟินส์เบาสูง</p> <p>2. มีสภาพความเป็นกรดสูง</p> <p>3. ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม</p>	<p>1. ให้ผลิตภัณฑ์ในช่วงแก๊สโซลีนต่ำ</p>

	4. ให้ผลได้ของ propylene และ Aromatic สูง 5. มีรูพรุนและพื้นที่ผิว 6. มีทั้งกรดลิวอิสและกรดบรอนสเตด	
ตัวเร่งปฏิกิริยา : H-ZSM-5 วัสดุคิบ : น้ำมันปาล์ม ผลิตภัณฑ์ : แก๊สโซลีน แก๊ส OLP และองค์ประกอบของแก๊สโซลีน (Yee et al., 2011; Sadrameli et al., 2008; Yean-Sang et al., 2004)	1. ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็นของเหลว 2. ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นองค์ประกอบของอะโรมาติกสูง 3. สามารถแยกสลายไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีโมเลกุลขนาดเล็ก 4. ให้สภาพการเลือกเกิดเป็นแก๊สโซลีน 5. ใช้ทั่วไปในการผลิตเชื้อเพลิงเหลว	1. ทำปฏิกิริยาในสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กได้น้อย 2. เกิดโค้กสูง

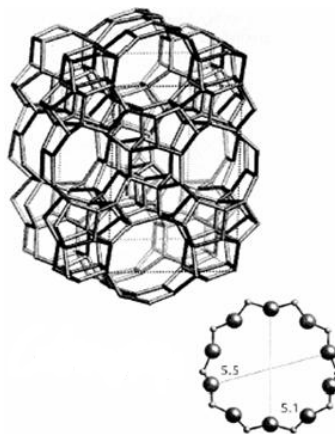
งานวิจัยฉบับนี้จึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดหนึ่งของ ZSM-5 ที่มีโปรตอน (H⁺) เป็นตำแหน่งแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งซีโอไลต์มีที่ความเป็นกรดนั้น มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาอะโรมาติกแครกกิงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และนิยมใช้อย่างหลากหลายในอุตสาหกรรม (ณัฐกฤตต์ เพชรนะ, 2554)

2.5.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

ZSM-5 ย่อมาจาก Zeolite-Structure-Mobil-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีบทบาทสำคัญในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา เป็นซีโอไลต์มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาน้อยกว่า 5 จึงมีจำนวนซิลิกาสูง ส่งผลให้มีความเป็นกรดสูง ถูกสร้างบนหน่วยโครงสร้างที่มีสมาชิก 10 วง (10-Membered ring building unit) หน่วยโครงสร้างเหล่านี้จะเชื่อมต่อกันเกิดเป็นลูกโซ่ (Chain) และการเชื่อมต่อของแต่ละลูกโซ่นั้น ทำให้มีระบบช่องว่าง (Channel system) เกิดขึ้นดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-12 มีสูตรโครงสร้างเป็น $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5-100 \text{ SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบอโรโรมบิค นอกจากนี้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาใน

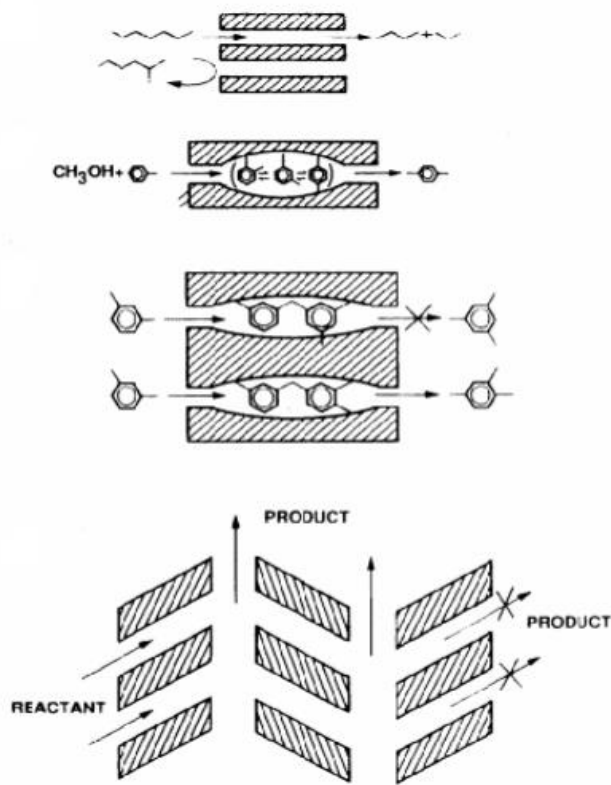
การแตกตัวนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เลือกใช้ควรจะสามารถกำหนดผลิตภัณฑ์ที่เลือกเกิดได้ โดยการหลีกเลี่ยงไม่ให้โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้ มีการเลือกสภาวะทรานซิชัน (Transition) คือยับยั้งและป้องกันการเกิดปฏิกิริยาบางอย่าง เนื่องจากจำเป็นต้องใช้พื้นที่มากกว่ารูเปิดที่มี และสามารถควบคุมการจราจรของโมเลกุลให้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือโมเลกุลที่ถูกแตกตัวแล้วไม่ควรไปปะปนกับโมเลกุลที่ยังไม่ถูกแตกตัว ผลิตภัณฑ์ควรออกมาคนละช่องทางกับสารตั้งต้น ซึ่งเป็นผลมาจากข้อจำกัดด้านขนาดและรูปร่างของตัวเร่งปฏิกิริยาดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-13 ซีโอไลต์ในแบบปกติมีความสามารถในการแยกแยะโมเลกุลสารตั้งต้นที่แตกต่างกันได้ สมบัติการเลือกรูทรง ซึ่ง ZSM-5 นิยมใช้ในการแตกตัวไฮโดรคาร์บอน โมเลกุลใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็ก เพราะมีคุณสมบัติดังกล่าว คือมีเอกลักษณ์ในการควบคุมขนาดและรูทรงของสารตั้งต้นที่จะแพร่ไปสู่เครือข่ายรูเปิดของมันได้ และมีคุณสมบัติที่พิเศษในการเลือกเกิดเป็นแก๊สโซลีน จึงมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงการผลิตแก๊สโซลีนโดยการคะตะไลติกแครกกิง

นอกเหนือจากสมบัติการเลือกรูทรงของ ZSM-5 แล้ว ZSM-5 มักถูกใช้ในรูปของกรด ZSM-5 มี acid site 2 ชนิดคือ Brønsted acid site และ Lewis acid site การสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยทั่วไปมีไอออน Na^+ เพื่อทำให้ประจุไฟฟ้าของโครงร่างมีความสมดุล แต่มันจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนโปรตอนอย่างทันทีทันใดด้วยการทำปฏิกิริยากับกรดให้หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ที่พื้นผิว เป็นที่รู้จักกันในชื่อของ Brønsted acid site การให้ความร้อนสูงแก่ Brønsted acid site จะเป็นการกำจัดน้ำออกไปและผลิตไอออน Al ขึ้น ซึ่งมี vacant orbital property ซึ่งทำให้ระบุว่าเป็น Lewis acid site ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-14

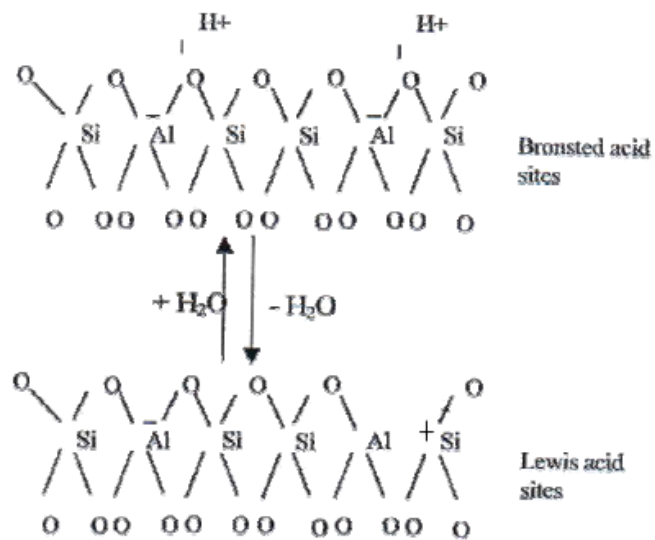


ภาพประกอบที่ 2-12 แสดงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ZSM-5

(<http://beling.net/articles/about/ZSM-5>, สืบค้นเมื่อวันที่ 20 มกราคม 2554)



ภาพประกอบที่ 2-13 แสดงการเลือกสารตั้งต้น การเลือกผลิตภัณฑ์ การเลือกสภาวะทรานซิชัน (Transition) และทิศทางเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Sadrameli และคณะ, 2009)



ภาพประกอบที่ 2-14 แสดงแผนผังของ Bronsted acid site และ Lewis acid site ในซีโอไลต์ (ณัฐกรฤกษ์ เพชรณะ, 2554)

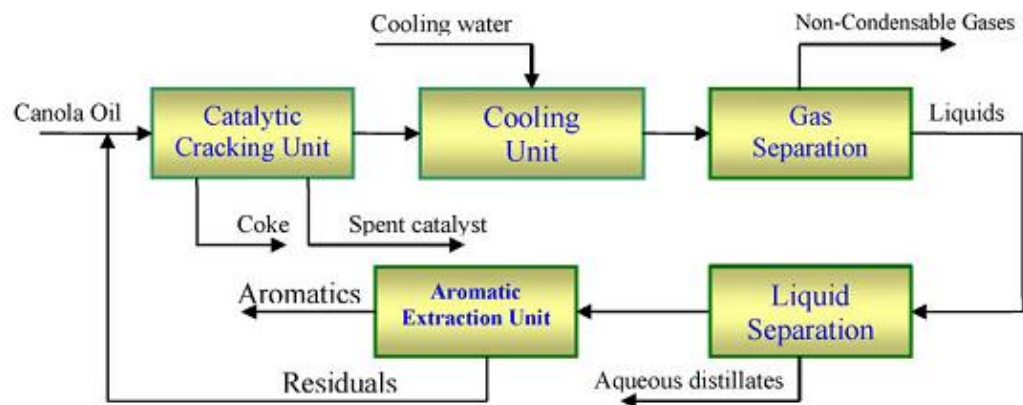
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การผลิตไบโอแก๊สโซลีนโดยใช้กระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่งนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยานับว่าเป็นตัวแปรสำคัญในการทำให้ได้ผลผลิตของแก๊สโซลีนสูง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ก็มีด้วยกันหลายชนิด ซึ่งการเลือกใช้ก็ขึ้นกับชนิดของผลผลิตที่ต้องการ มีการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สโซลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ซึ่งตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการผลิตแก๊สโซลีนและผลได้ของของเหลวอินทรีย์ ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันตั้งต้น และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา

ณัฐกฤตต์ เพชรนะ (2554) ศึกษาการผลิตไบโอแก๊สโซลีนโดยกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่งของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ (Refined palm oil) แยกตัวด้วยเครื่อง Micro activity test unit (MAT-Unit) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด H-ZSM-5 ที่เตรียมในสภาวะที่เหมาะสม โดยการนำ $\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำมาใช้ศึกษาการแตกตัวน้ำมันปาล์มรีไฟน์ในช่วงอุณหภูมิ 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส ความเร็วปฏิกิริยาที่ 53, 107, 213 และ 320 ต่อชั่วโมง โดยอัตราส่วนของน้ำมันต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 3 ต่อ 1 พบว่า ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และความเร็วปฏิกิริยา 107 ต่อชั่วโมง ให้ค่าร้อยละการแตกตัวน้ำมันปาล์มรีไฟน์ (Conversion) สูงสุดร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก ให้ค่าผลได้ของของเหลว (Yield of OLP) ร้อยละ 23 โดยน้ำหนัก ให้ค่าร้อยละผลได้ของแก๊ส (Yield of gas) ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีน

Sadrameli และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาการแตกตัวของน้ำมันคาโนลา (Canola oil) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น H-ZSM-5 ดำเนินการใน Fixed-bed micro reactor อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 375-500 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ ความเร็วปฏิกิริยาเป็น 1.8 ต่อชั่วโมง แต่ผลการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4 กรัมและใช้น้ำมัน 3.6 กรัม ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่น ๆ อีก 5 ชนิด ได้แก่ H-modenite, H-Y, Silicalite, Aluminum-pillared clay (AL-PILC) และ Silica-Alumina เมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จแยกส่วนของของเหลวและแก๊สไปวิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบด้วย Gas Chromatography (Carl GC-500) และ GC-MS (Finnigan/MAT-4500) โดยส่วนของเหลวถูกกลั่นที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารป้อน (Conversion) มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลได้ของของเหลว (Yield of liquid) และแก๊ส (Yield of gas) มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 390 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด H-ZSM-5 และ Silicalite ให้ห่อหุ้มประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนซึ่งได้แก่ เบนซีน (Benzene, C_6)

โทลูอีน (Toluene, C_7) และ ไซลีน (Xylenes, C_8) สูงในช่วงอุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส ให้ค่าเบนซิน โทลูอีน และไซลีน ร้อยละ 33.7-40.25 โดยน้ำหนัก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด H-ZSM-5 และ Silicalite มีขนาดของรูพรุนต่ำกว่าชนิดอื่นๆ (Lower pore size) ประมาณ 0.54 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ ทำให้สามารถแตกไฮโดรคาร์บอนให้เป็นองค์ประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนได้ดี โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด H-ZSM-5 ให้ค่าองค์ประกอบของอะโรมาติกสูงที่สุด นอกจากนี้ยังให้ค่าของเหลวอินทรีย์ (Organic liquid products) สูงถึงร้อยละ 63 นั้นแสดงให้เห็นว่า H-ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดสำหรับการผลิตไฮโดรคาร์บอนเหลว (Liquid hydrocarbon) โดยเฉพาะอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน



ภาพประกอบที่ 2-15 แสดงแผนภาพกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาเป็นอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Sadrameli และคณะ, 2009)

Niken และคณะ (2010) ได้ศึกษาการคละไลดิกแครกกิง (Catalytic cracking) ของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนคริสตัลไลน์ ซีโอไลต์ เบต้า (Nanocrystalline zeolite Beta) โดยศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา ความเป็นผลึก คุณสมบัติของพื้นที่ผิว ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา การทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst activity) ในการแตกตัวน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ผลของเวลาในการใช้ไอน้ำ (Time on steam, TOS) ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว และจลนพลศาสตร์ของการเผาไหม้ไค้ก (Coke combustion kinetic) โดยใช้อัตราส่วนน้ำมันต่อตัวเร่งปฏิกิริยา (Oil/Catalyst) ตั้งแต่ 6-14 ที่อุณหภูมิต่างๆกัน ดำเนินการที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 400-500 องศาเซลเซียส ด้วย Fixed-bed micro-reactor ใช้ความเร็วปฏิกิริยา (WHSV) 2.5 ต่อชั่วโมง จากการทดลองพบว่า ลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ ได้แก่ พื้นที่ผิวภายนอกของตัวเร่งใหม่ (External surface area of fresh catalyst) เป็น 290 ตารางนิ้วต่อกรัม พื้นที่ผิวภายในรูพรุน (Microspore

area) เป็น 235 ตารางนิ้วต่อกรัม ปริมาตรภายในรูพรุน (Microspore volume) เป็น 0.148 ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อกรัม อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา (Si/Al Ratio) เป็น 15 อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 450 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถผลิตผลได้ของแก๊สโซลีน (Gasoline yield) อยู่ในช่วงร้อยละ 35-40 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ได้สมการจลนพลศาสตร์ของการเผาไหม้ไค้กเป็น $\phi = 1/(1+k_d t)$ เมื่อ ϕ คืออัตราการแตกตัวของน้ำมันต่อเวลาที่เปลี่ยนไป (Catalytic activity, k_d) เป็นค่าคงที่ และ t คือเวลา นอกจากนี้ยังพบว่าค่า ϕ นั้นขึ้นกับค่า TOS และพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาไหม้ไค้กเพิ่มมากขึ้น ปริมาณไค้กจะลดลง

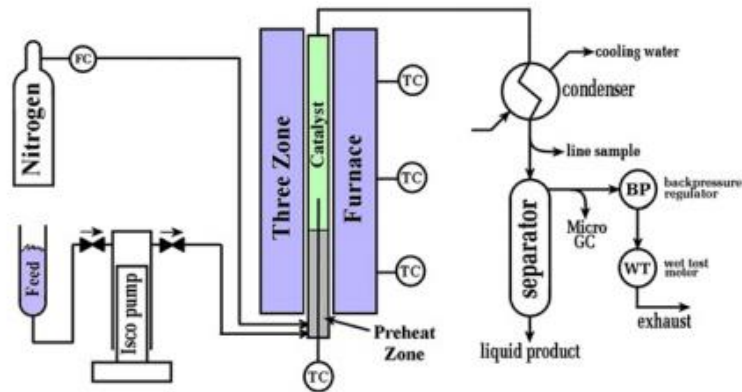
Hong Li และคณะ (2009) ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงจากธรรมชาติ (Bio fuels) จากน้ำมันเมล็ดฝ้าย (Cottonseed oil) ใช้การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ Fixed-fluidized bed ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 400-500 องศาเซลเซียส อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันตั้งแต่ 6-10 และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Residence time) 50-90 วินาที ทำการศึกษาผลได้ของไบโอแก๊สโซลีนและน้ำมันเบา (Light fuel oil) และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวสูงสุด ทำการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับ FCC ที่สมดุล (FCC Equilibrium catalyst) ชนิดซีโอไลต์ ผลการทดลองพบว่า ผลได้ของแก๊ส (Gas) นั้นมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันที่ 10 กรัมต่อกรัม มีร้อยละผลได้เป็น ร้อยละ 28.8 โดยน้ำหนัก และมีแนวโน้มว่า ปริมาณแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันสูงขึ้น ในขณะที่น้ำมันเบาที่ได้นั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 6 เป็น 10 กรัมต่อกรัม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นให้น้ำมันเบามากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 500 องศาเซลเซียสเกิดเป็นน้ำมันเบาที่น้อยลง เพราะน้ำมันเบาถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สและไค้ก และเมื่อเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ก็ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันเบาลดลงเช่นกัน สำหรับผลได้ของแก๊สโซลีนที่สนใจศึกษานั้นพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะให้แก๊สโซลีนเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจากที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ได้องค์ประกอบของแก๊สโซลีน (Gasoline fraction) เป็นร้อยละ 25.1 โดยน้ำหนัก และที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ให้แก๊สโซลีนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 33.7 แต่มีค่าลดลงเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 50 วินาทีเป็น 90 วินาที สำหรับสภาวะที่ให้แก๊สโซลีนมีค่าสูงสุดคือที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันเป็น 10 กรัมต่อกรัม และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 50 วินาที ให้ร้อยละองค์ประกอบของแก๊สโซลีนเป็น 33.7 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังมีการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวสูงสุด ซึ่ง

สภาวะที่เหมาะสมคือ ที่อุณหภูมิ 426.2 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันเป็น 7.8 กรัมต่อกรัม และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาเป็น 50.2 วินาที ที่สภาวะดังกล่าวจะให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันเบาสูงสุดที่ร้อยละ 65.6 โดยน้ำหนัก ร้อยละขององค์ประกอบของแก๊สโซลีนที่ 33.7 โดยน้ำหนักและให้ร้อยละผลได้ของแก๊สน้อยที่สุดที่ 11.6 โดยน้ำหนัก

Pramila และคณะ (2007) ได้ศึกษาการแตกตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น Zeolite REY ดำเนินการใน Transport Riser Reactor ที่ความดันบรรยากาศ ศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 400-500 องศาเซลเซียส ศึกษาผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันปาล์มตั้งแต่ 5 8 และ 10 กรัมต่อกรัม ศึกษาเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 10 20 และ 30 วินาที โดยสนใจผลได้ของไบโอแก๊สโซลีน การเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น ผลได้ของของเหลวอินทรีย์ และผลได้ของแก๊ส ผลการทดลองพบว่า ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปาล์มดิบอยู่ในช่วง 55-94 โดยน้ำหนัก โดยที่ร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปาล์มสูงสุดเป็นร้อยละ 93.5 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 30 วินาที ในขณะที่ผลได้ของของเหลวอินทรีย์มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลได้ของของเหลวอินทรีย์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ (49.6-68.6 wt%) ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 400 - 450 องศาเซลเซียส แต่ลดลงเมื่ออุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (55.2 wt%) เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงทำให้ของเหลวเปลี่ยนเป็นแก๊ส และค่า OLP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 10-20 วินาที แต่ลดลงเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 30 วินาที ในส่วนขององค์ประกอบแก๊สโซลีนนั้น มีแนวโน้มเช่นเดียวกับ OLP คือองค์ประกอบของแก๊สโซลีนจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 400-450 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 500 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของแก๊สโซลีนจะลดลง ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสให้องค์ประกอบของแก๊สโซลีนสูงสุดที่ร้อยละ 58 และสภาวะที่ทำให้ได้แก๊สโซลีนมากที่สุดคือที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันเป็น 6 กรัมต่อกรัม เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที ในส่วนผลได้ของแก๊สมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จากนั้นได้มีการคาดการณ์สภาวะที่เหมาะสมโดยการใช้หลักการทางตัวเลข (Numerical optimization) ผลการทดลองพบว่า ได้สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้องค์ประกอบของแก๊สโซลีนสูงสุดที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันเป็น 5 กรัมต่อกรัม เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาเป็น 20 วินาที ที่สภาวะดังกล่าวจะสามารถแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง

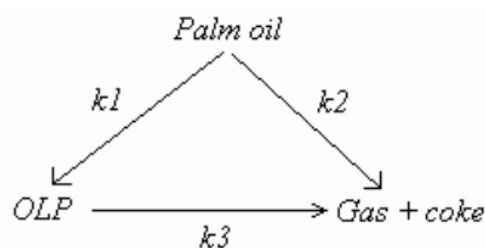
เป็นร้อยละ 75.8 โดยน้ำหนัก, ผลได้ของ OLP ร้อยละ 53.5 โดยน้ำหนัก, องค์ประกอบของแก๊สโซลีน เป็นร้อยละ 33.5 โดยน้ำหนัก และผลได้ของแก๊สเป็นร้อยละ 14.2 โดยน้ำหนัก

Noah และคณะ (2011) ได้ศึกษากระบวนการคะตะไลติกแครกกิงของ Squalene ไปเป็นโมเลกุล ในช่วงแก๊สโซลีน โดย Squalene เป็นของเหลวที่สกัดได้จากสาหร่ายสายพันธุ์ *B. braunii* ซึ่งเป็น ไฮโดรคาร์บอนหนักที่มีคาร์บอนอะตอมประมาณ 30 อะตอม ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยตรงได้ การศึกษากระบวนการคะตะไลติกแครกกิงของ Squalene ดำเนินการใน Tubular reactor ที่ ประกอบด้วยเตาเผา 3 ส่วน ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกใส่เข้าไป 2 ใน 3 ของเครื่องปฏิกรณ์ ของเหลว Squalene จะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือซีโอไลต์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกใส่เข้าเครื่องปฏิกรณ์ที่ให้ความร้อน 380-450 องศาเซลเซียส พร้อมแก๊สในโตรเจนด้วยอัตรา 0.5 ลิตร ต่อนาที เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นของเหลว Squalene 500 ลูกบาศก์เซนติเมตรถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ในอัตรา 4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พร้อมแก๊สในโตรเจนด้วยอัตรา 2 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 380 องศาเซลเซียส สำหรับ 500 ลูกบาศก์เซนติเมตรแรก แต่สำหรับ 500 ลูกบาศก์ เซนติเมตรถัดไป ใช้อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เพื่อทดแทนประสิทธิภาพที่สูญเสียไปของตัวเร่ง ปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-16 ผลผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS ด้วยมาตรฐาน ASTM ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วย ของเหลวอินทรีย์ (Organic liquid product) ร้อยละ 66 โดย น้ำหนัก แก๊สร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก และ คาร์บอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ของเหลวอินทรีย์ที่ได้ประกอบด้วย ไฮโดรคาร์บอนต่างๆ ได้แก่ แนฟทีน (Naphthenes) ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก แนฟทาลีน (Naphthalene) ร้อย ละ 28 โดยน้ำหนัก โอลิฟิน (Olefins) ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก เบนซีน (Benzene) ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โทลูอีน (Toluene) ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ไซลีน (Xylene) ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก อะโรมาติก (Aromatic) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พาราฟิน (Paraffin) ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และ แอนทราซีน (Anthracene) ร้อย ละ 33 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสารที่เพิ่มค่าออกเทนัมเบอร์ในแก๊สโซลีน นอกจากนี้ยังได้นำผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าออกเทนัมเบอร์พบว่า ให้ค่าออกเทนัมเบอร์สูงถึง 98 และให้คุณสมบัติที่น่า พื่อใจ ทำให้การผลิตไฮโดรคาร์บอนเป็นพลังงานเชื้อเพลิงในรูปของแก๊สโซลีนจาก Squalene ที่ได้จาก สาหร่ายเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการใช้ชีวมวลให้เกิดประโยชน์โดยการนำมาเป็นพลังงาน ทดแทนพลังงานจากฟอสซิล



ภาพประกอบที่ 2-16 แสดงแผนผังของเครื่อง Tubular reactor (Noah และคณะ, 2011)

Ivan และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาเรื่องแบบจำลองของการผลิตเชื้อเพลิงเหลวไฮโดรคาร์บอนจากน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการคละไลติกแครกกิ่ง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา MCM-41 ซึ่งทำการทดลองทางคณิตศาสตร์ของปฏิกิริยาอะโรมาติกไลติกแครกกิ่งของน้ำมันปาล์ม โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ Fixed-bed micro reactor ดำเนินการที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 623.15, 673.15 และ 723.15 เคลวิน (K) ความเร็วปริภูมิ (WHSV) เท่ากับ 15, 17.5, 22.5, 25, 27.5 และ 30 ต่อชั่วโมง (h^{-1}) อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันเท่ากับ 1:32.5 กรัมต่อกรัม (g/g) โดยทำการศึกษาแบบจำลองของปฏิกิริยาที่ผลิตภัณฑ์ของเหลวเป็นสารอินทรีย์ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นแก๊สโซลีน น้ำมันก๊าด และดีเซล รวมทั้งผลิตภัณฑ์ข้างเคียงโดยใช้ Three Lumps Model ซึ่งพัฒนาโดย Weekman โดยมีข้อสมมุติฐานว่าน้ำมันปาล์มแตกตัวเป็นของเหลวอินทรีย์ (OLP) แก๊สไฮโดรคาร์บอน และโค้ก



ภาพประกอบที่ 2-17 Three-Lump Kinetic Model (Ivan และคณะ, 2008)

การผลิตไบโอแก๊สโซลีนนอกจากจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเดียวแล้ว ยังมีการศึกษาการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มเติม เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอแก๊สโซลีนอีกด้วย

Thaim และคณะ (2009) ศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มและน้ำมันปาล์มใช้แล้ว โดยศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Rare Earth -Y (REY) และศึกษาผลของการเติมตัวเร่ง

ปฏิกิริยาลงไปผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเดิม นั่นคือเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Rare Earth -Y ลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน 4 ชนิด ได้แก่ H-ZSM-5, Beta zeolite, SBA-15 และ AISBA-15 ลง ในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 และยังศึกษาเพิ่มเติมถึงอัตราส่วนของที่แตกต่างกันของซิลิกาต่ออะลูมินาใน HZSM-5 ที่เติมลงใน REY นั่นคือ H-ZSM-5(40) และ H-ZSM-5(140) คืออัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเป็น 40 และ 140 ตามลำดับ ดำเนินการภายใต้ Transport riser reactor ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 450 องศาเซลเซียส เรสซิเดนซ์ไทม์ (Residence time) 20 วินาที และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมัน เป็น 5 กรัมต่อกรัม สิ่งที่สนใจศึกษาคือร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมัน ร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์ และร้อยละผลได้ของแก๊ส โซลีน จากผลการทดลองพบว่า การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปมีประสิทธิภาพในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยามากขึ้นกว่าการใช้ REY เพียงอย่างเดียว ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มอยู่ในช่วง 73 - 95.9 ในขณะที่ใช้ REY เพียงอย่างเดียวให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันเป็น 72.9 และ 70.9 ของน้ำมันปาล์มและน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ตามลำดับ โดยที่ H-ZSM-5(40) ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันสูงสุด ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันปาล์มได้เป็น 95.9 และน้ำมันปาล์มใช้แล้วเป็น 82.8 นอกจากนี้ค่าร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์ยังเพิ่มขึ้นด้วย คือเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มลงไปให้ค่าร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์อยู่ในช่วง 51-59.3 ในขณะที่ใช้ REY เพียงอย่างเดียวให้ค่าร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์เป็น 48.1 และ 47.4 ของน้ำมันปาล์มและน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ตามลำดับ โดยที่ H-ZSM-5(40) ให้ค่าร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์สูงสุด คือโดยที่น้ำมันปาล์มได้ค่าร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์เป็น 59.3 และน้ำมันปาล์มใช้แล้วมีค่าผลได้ของของเหลวอินทรีย์ 55.3 สำหรับร้อยละผลได้ของแก๊ส โซลีนนั้นก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มลงไปให้ค่าร้อยละผลได้ของแก๊ส โซลีนอยู่ในช่วง 35 - 40.9 ในขณะที่ร้อยละผลได้ของแก๊ส โซลีนเมื่อใช้เพียง REY เป็น 34.5 และ 33.0 ของน้ำมันปาล์มและน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ตามลำดับ ซึ่งนั่นสรุปได้ว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาดีขึ้น โดยเฉพาะการใช้ H-ZSM-5 ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 40 แม้ว่าการใช้ H-ZSM-5 จะให้ผลได้ของแก๊สสูง แต่ก็ให้ผลได้ของของเหลวอินทรีย์โดยเฉพาะแก๊ส โซลีนสูงเช่นเดียวกัน

Ramya และคณะ (2012) ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลว (Liquid hydrocarbon fuels) จากน้ำมันสบู่น้ำดำโดยใช้การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนขนาดเล็ก คือ H-ZSM-5 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนขนาดกลาง คือ AIMCM-41 และตัวเร่งปฏิกิริยา AIMCM-41/ZSM-5 คือ มีองค์ประกอบของ ZSM-5 ที่ใจกลางและถูกเคลือบด้วย AIMCM-41 บริเวณพื้นผิว

ภายนอก ดำเนินการศึกษาการแตกตัวที่สภาวะเหมาะสมคือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ความเร็วปริภูมิ 4.6 ต่อชั่วโมง และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ดำเนินการใน Fixed-bed quartz catalytic reactor จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (H-ZSM-5) นั้นให้ผลการแตกตัวที่ดีกว่า โดยให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (Conversion) ร้อยละ 62 ให้ร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สโซลีน (Gasoline selectivity) ถึงร้อยละ 50 แต่ให้ร้อยละผลได้ของของเหลว (Yield of bio liquid product, BLP) เพียงร้อยละ 29 จึงมีการพัฒนาโดยผสมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนขนาดเล็กและตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนขนาดกลางเพื่อเพิ่มความสามารถในการแตกตัวโมเลกุลที่เป็นกลุ่มก้อนให้สามารถแตกตัวได้มากขึ้น (AIMCM-41/ZSM-5) ที่ใช้ AIMCM-41 ลงบน ZSM-5 ในร้อยละ 10 ของปริมาณ ZSM-5 ให้ประสิทธิภาพในการแตกตัวน้ำมันสบู่ดำดีที่สุด โดยให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงถึงร้อยละ 99 ให้ผลได้ของของเหลวย้อยละ 70 และให้ร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สโซลีน ถึงร้อยละ 61 ซึ่งเห็นได้ว่าการผสมตัวเร่งปฏิกิริยานั้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแตกตัวเพิ่มขึ้นและยังทำให้เกิดแก๊สโซลีนเพิ่มขึ้นด้วย แต่การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาขนาดกลางในปริมาณที่มากขึ้นถึงร้อยละ 20 ทำให้ประสิทธิภาพในการแตกตัวลดลง ซึ่งการเปรียบเทียบเชื้อเพลิงที่ได้วัตถุดิบ ถังปฏิกรณ์ และสภาวะที่ดำเนินการ แสดงดังตารางที่

ตารางที่ 2-4 ตารางแสดงเชื้อเพลิงที่ได้ วัตถุประสงค์ และสภาวะที่ใช้ในการดำเนินการ

Fuels	Feed	Catalyst	Reactor	Condition	Result	Reference
Biogasoline	Canola Oil	H-ZSM-5	Fixed-bed micro reactor	Temperature = 400 °C	Yield of OLP= 63 %wt	S.M. Sadrameli et al. (2009)
				WHSV = 1.8 /h	Yield of aromatic product= 51.786 %wt	
				Oil/Catalyst = 0.9	-	
Biogasoline	Used Palm Oil	Nanocrystalline Zeolite Beta	Fixed-bed micro-reactor	Temperature = 450 °C	Yield of OLP= 70 %wt	Niken et al. (2010)
				WHSV = 2.5 /h	Yield of gas = 8 %wt	
				-	Conversion = 86 % wt	
Bio Fuels	Cottonseed Oil	FCC Equilibrium Catalyst	Fixed-fluidized bed	Temperature = 426.2°C	Yield of Light fuel oil = 65.6 %wt	Hong Li et al. (2009)
Biogasoline				Catalyst/ Oil = 7.8 g/g	Gasoline Fraction = 33.7 % wt	
Light fuel oil				Residence time = 50.2 s	Yield of Gas = 11.6 %wt	
Biogasoline	Palm Oil	Zeolite REY	Transport riser reactor	Temperature = 450 °C	Yield of OLP = 53.5 %wt	Pramila Tamunaidu et al. (2007)
				Catalyst/ Oil = 5 g/g	Gasoline fraction = 33.5 %wt	
				Residence time = 20 s	Conversion = 75.8 %wt	

Fuels	Feed	Catalyst	Reactor	Condition	Result	Reference
Biogasoline	Palm Oil	H-ZSM-5(40) /REY	Transport riser reactor	Temperature = 450 °C	Yield of OLP = 59.3 %wt	Thaim et al. (2009)
				Catalyst/ Oil = 5 g/g	Conversion = 95.9 %wt	
				Residence time = 20 s	-	
Biogasoline	Jatropha Oil	AlMCM-41/ZSM-5	Fixed bed quartz catalytic reactor	Temperature = 400 °C	Yield of OLP = 70 %wt	G.Ramya et al. (2012)
Liquid fuel				Reaction time = 1 h	Gasoline fraction = 61 %wt	
				WHSV = 4.6 /h	Conversion = 99 %wt	
Biogasoline	Squalene	MCM-41	Tubular reactor	Temperature = 380-430 °C	Yield of OLP = 66 %wt	Noah et al. (2011)
Liquid fuel				N ₂ flow rate = 2 lit/min	Yield of gas = 33 %wt	
				-	Aromatic yield = 20 %wt	
Biogasoline	Palm Oil	Cu-ZSM-5	Fixed-bed micro reactor	Temperature = 500 °C	Aromatic yield = 11.45 %wt	Tirena et al. (2006)
				Reaction time = 4 h	Naphalenes yield = 10.53 %wt	
				WHSV = 2.5 /h	-	

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

3.1 วัสดุ

3.1.1 วัตถุดิบ

1. น้ำมันปาล์มรีไฟน์ (Refined palm oil, RPO) คือ น้ำมันปาล์มโอเลอินจากเนื้อปาล์มตรามรดก ซึ่งมีขายตามท้องตลาดทั่วไป โดยลักษณะภายนอกมีสีเหลืองใสและมีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง

2. น้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว (Used refined palm oil, UPO) คือ น้ำมันปาล์มโอเลอินจากเนื้อปาล์มที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำมาจากร้านอาหารทั่วไปตามท้องตลาด (ใช้ทอดซ้ำไม่เกิน 3 ครั้ง) และนำมากรองวัสดุเจือปนออกได้เป็นน้ำมันที่ภายนอกมีลักษณะสีเหลืองเข้มใสและมีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง

3. น้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae oil) คือ น้ำมันสาหร่ายสายพันธุ์ *Chorella sp.* ที่ได้จากการสกัดด้วยวิธี Ultrasonic โดยใช้ Acetone เป็นตัวทำละลาย ลักษณะภายนอกเป็นสีเขียวเข้ม ใส และมีลักษณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง

3.1.2 สารเคมี

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Zeolite Ammonium ZSM-5 ($\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$) แบบผง ผลิตโดยบริษัท Zeolyst International Company รหัสสินค้า CBV 3024E ประเทศสหรัฐอเมริกา

2. แก๊สไนโตรเจน ความเข้มข้น 99.9%, Regular Grade สำหรับ Fixed-bed micro reactor

3. สารมาตรฐาน Benzene ความเข้มข้น 99.9%, เกรด GC ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldich รหัสสินค้า 12540 ประเทศสหรัฐอเมริกา

4. สารมาตรฐาน Isooctane ความเข้มข้น 99.7%, เกรด GC ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldich รหัสสินค้า 59030 ประเทศสหรัฐอเมริกา

5. Purge able Aromatic for Gasoline เกรด GC ผลิตโดยบริษัท Dr. Ehrenstorfer GmbH
รหัสสินค้า XA06020300ME ประเทศเยอรมนี

3.2 อุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมือวิเคราะห์

1. เครื่องมือวิเคราะห์ Gas chromatograph with flame ionization detector (GC-FID) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้สำหรับแยกองค์ประกอบของสารเนื้อเดียวที่มีองค์ประกอบของสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ละลายในของเหลวเดียวกัน ในงานวิจัยนี้ใช้ GC-FID ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น 6890A (GC-Lampang) ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนในของเหลวอินทรีย์ (OLP) จากกระบวนการคละตะไลดิกแรกกิ่ง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ GC-FID ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

สภาวะการทดลองของ GC-FID

- Inlet temperature: 250 °C, Split ratio 5: 1, Carrier(He) flow 1.0 ml/min
- Detector temperature: 250°C
- Oven initial temperature: Initial Temperature 40°C, hold 5 minutes
- Ramp to: 140°C, at 5°C/min, hold 5 minutes, Post Run 250 °C hold 1 minute
- Hydrogen flow: 30 ml/min
- Air flow: 300 ml/min
- Make up flow: 25 ml/min
- Column: Select for FAME, length 30 m., 320 µm I.D, 0.1 µm film thickness

2. เครื่องมือวิเคราะห์ Thermo gravimetric analyzer (TGA) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์น้ำหนักน้ำมันเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งวัดน้ำหนักของสารตัวอย่างเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงอุณหภูมิ การทดลองทำในระบบปิด เครื่องประกอบด้วยเตาเผา (Furnace) ที่มีโปรแกรมควบคุม (Temperature programmer) ควบคุมบรรยากาศ ความดัน และมีระบบชั่งน้ำหนักเข้ามาประกอบด้วย และข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่าง เช่น การสูญเสียองค์ประกอบ (Decomposition) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นสารใหม่ (Formation) โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ TGA ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น TGA7 ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักน้ำมันจากสถานะของเหลวกลายเป็นแก๊ส เพื่อหาช่วงอุณหภูมิสำหรับการออกแบบการทดลองในกระบวนการคละตะไลดิกแรกกิ่ง

สภาวะการทดลองของ TGA

-Purge gas: Nitrogen

-Scanning program: Heat from 80 °C to 750 °C at 10 °C /min

3. เครื่องมือวิเคราะห์ Fourier-transformed infrared spectrophotometer (FT-IR) Pellet (KBr) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารประกอบเป็นเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงอินฟราเรด (Infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันว่าสารตัวอย่างที่ไม่ทราบว่าเป็นสารอะไรได้ ซึ่งต้องนำสเปกตรัม (Spectrum) ของสารตัวอย่างนั้นไปเทียบกับสเปกตรัมของสารที่ทราบอยู่แล้ว (Reference) ถ้ามีสเปกตรัมเหมือนกันก็จะเป็นสารเดียวกัน โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ FT-IR ยี่ห้อ Bruker Germany รุ่น EQUINOX55 ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5

สภาวะการทดลองของ FT-IR

-Test Technique: Pellet KBr

-Test Condition: 4000-400 cm^{-1}

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

1. เครื่องชั่งสาร
2. ใยแก้ว (Glass wool)
3. ช้อนตักสาร
4. โถดูดความชื้น (Desiccator)
5. ขวดเก็บตัวเร่งปฏิกิริยา
6. ถ้วยเซรามิก
7. เตาเผา (Furnace)

3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

อุปกรณ์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาแสดงดังภาพประกอบที่ 3-2 ซึ่งประกอบด้วย

1. ถังปฏิกรณ์ 2 ถัง (Reactor)
2. เตาเผา 2 เตา (Furnace)
3. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ใช้วัดอุณหภูมิใน Reactor
4. ท่อยาง
5. ปีกเกอร์
6. ขวดเก็บตัวอย่าง
7. ถังเก็บแก๊ส

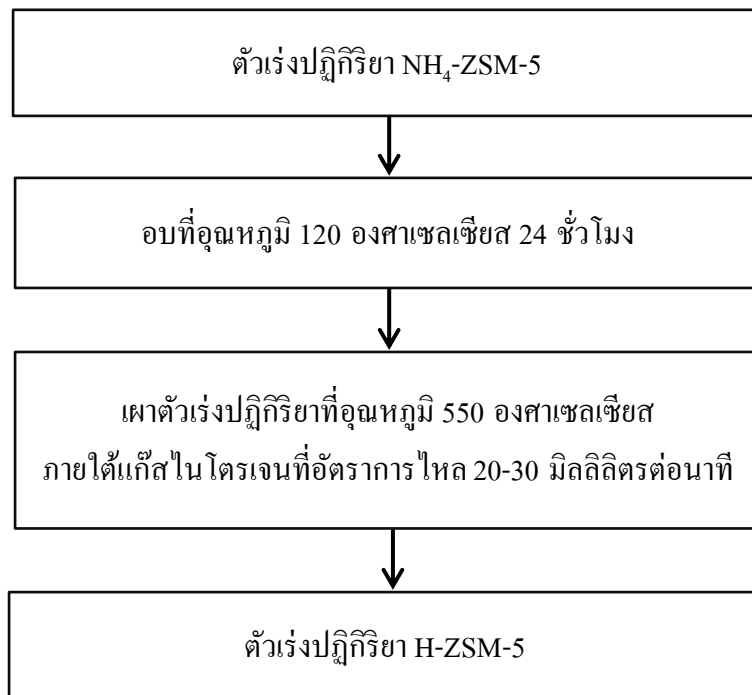
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา (ณัฐกฤตต์ เพชรนะ, 2554)

1. นำตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$ ไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น จนกระทั่งสารเย็นตัว

2. นำ $\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$ ไปเผาด้วยเตาเผาแบบไร้ออกซิเจน โดยทำการป้อนแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตรา 100 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 15 นาทีก่อนการเผา และเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการไหลของไนโตรเจน 20-30 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมงเพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีแอมโมเนียเหลืออยู่ จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด H-ZSM-5

3. นำตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$ และ H-ZSM-5 ที่ได้จากการเตรียมข้างต้น ไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ FT-IR Spectroscopy ซึ่งใช้เทคนิคการเตรียมสารแบบ KBr Disc โดยบดสารตัวอย่างของแข็งบริสุทธิ์ (1-2 มิลลิกรัม) รวมกับผง KBr (100 มิลลิกรัม) นำเข้าเครื่องอัด mini press จนได้แผ่นกลมแบนใสคล้ายแก้ว หลังจากอัดเป็นแผ่นแบนแล้ว นำแผ่น KBr disc ใส่ที่ยึดพิเศษ แล้ววางบนลำรังสี IR จะได้สเปกตรัมการดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่เป็นคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นๆ



ภาพประกอบที่ 3- 1 แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5

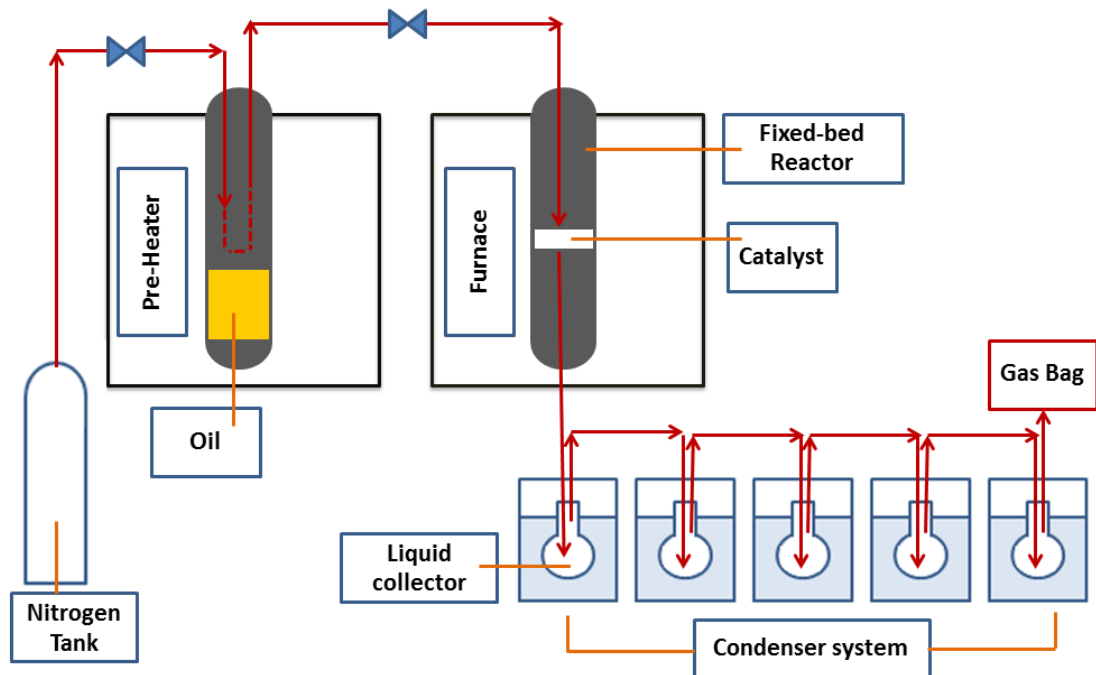
3.3.2 ศึกษาช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองด้วยเครื่อง TGA

1. นำน้ำมันประมาณ 50 มิลลิกรัม (ศึกษาน้ำมันปาล์มรีไฟน์ น้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว และ น้ำมันสำหรับรายขนาดเล็ก)
2. ให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน
3. เพิ่มอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 มิลลิลิตรต่อนาที จากอุณหภูมิ 50 ถึง 800 องศาเซลเซียส และดูผลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของน้ำมัน

3.3.3 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีน

3.3.3.1 สร้างและติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการคะตะไลติกแครกกิง

สร้างและติดตั้งอุปกรณ์สำหรับกระบวนการคะตะไลติกแครกกิง (Fixed-bed micro reactor) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ตามหัวข้อที่ 3.2.3 และแสดงภาพกระบวนการดังภาพประกอบที่ 3- 2 โดยให้สามารถใส่น้ำมันใน Reactor ตัวที่ 1 ที่ภายนอกมี Pre-heater และให้ความร้อนกับน้ำมันจนเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำมันเข้าสู่ Reactor ที่ 2 ที่ถูกใส่ไว้ในเตาเผา (Furnace) ภายใน Reactor ที่ 2 บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพาในการทดลอง เพื่อให้ น้ำมันสามารถไหลเข้าสู่ Reactor ตัวที่ 2 ได้ เมื่อไอน้ำมันเข้าสู่ Reactor ตัวที่ 2 ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดการคะตะไลติกแครกกิง ผลผลิตที่ได้ไหลเข้าสู่ระบบควบแน่นที่ประกอบด้วยถังให้ความเย็น (Ice bath) ต่อกัน 5 ตัว เพื่อควบแน่นไอของผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวอินทรีย์ และไอส่วนที่เหลือที่ไม่สามารถควบแน่นได้ก็เข้าสู่ถุงเก็บแก๊สต่อไป



ภาพประกอบที่ 3- 2 แสดงแผนภาพกระบวนการคะตะไลติกแครกกิง

3.3.3.2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์

1. ศึกษาช่วงสถานะที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์

ใช้โปรแกรม Response surface methodology (RSM) ในการออกแบบการทดลอง เพื่อหาช่วงสถานะที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ RSM เป็นเทคนิคทางสถิติในการตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สนใจ หาคู่ที่เหมาะสม (Optimization) จากความสัมพันธ์ของตัวแปรต้น หรือปัจจัยเชิงปริมาณ (Input variable) ได้ และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นกับค่าการตอบสนอง (Response variable) เพื่อแสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนอง เมื่อระดับของปัจจัยเชิงปริมาณเปลี่ยนแปลง และหาระดับของปัจจัยเชิงปริมาณที่เหมาะสม (Optimum value) ที่ทำให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ ศึกษาผลของอุณหภูมิ ความเร็วปริภูมิ (Weight Hourly Space Velocity, WHSV) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยตัวแปรต้นที่ป้อนให้กับโปรแกรม RSM ได้แก่ อุณหภูมิตั้งแต่ 400-550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไนโตรเจนตั้งแต่ 10-20 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ 1-5 กรัม เลือกใช้วิธีการและการออกแบบพื้นผิวตอบสนองแบบ Box – Behnken design ซึ่งโปรแกรม RSM ได้แสดงผลการออกแบบการทดลองดังตารางที่ 3-1 และพิจารณาช่วงสถานะที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์ (%Yield of OLP) ที่ได้จากการคะตะไลติกแครกกิ่ง

-ใช้น้ำมันปาล์มรีไฟน์ 15 กรัม

-อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 400-550 องศาเซลเซียส

-อัตราการไหลของไนโตรเจน (อัตราการป้อนน้ำมัน) 10-20 มิลลิลิตรต่อนาที

-ตัวเร่งปฏิกิริยา 1-5 กรัม

-ความเร็วปริภูมิ 9 - 45 ต่อชั่วโมง

ค่าความเร็วปริภูมิคือ น้ำหนักของน้ำมันที่ป้อนต่อเวลาต่อหน่วยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชั่วโมง ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.1)

$$WHSV = \text{อัตราการป้อนน้ำมัน (กรัมต่อชั่วโมง)} / \text{น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)} \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3-1 แสดงตารางการทดลองที่ได้จากการออกแบบของโปรแกรม RSM

Temperature (°C)	N ₂ flow rate (ml/min)	Catalyst (g)
550	20	3
550	10	3
400	10	3
475	15	3
475	10	1
550	15	1
475	10	5
475	15	3
475	20	5
475	20	1
400	15	1
475	15	3
400	20	3
550	15	5
400	15	5
475	15	3

2. ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อความเข้มข้นของเบนซินและไอ-โซ ออกเทนเชิงคุณภาพในของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการระเหยไลติกแครกกิ้งของน้ำมันปาล์มรีไฟน์เพื่อดู แนวโน้มของการเลือกเกิดเป็นแก๊สโซลีนในของเหลวอินทรีย์หลังจากการระเหยไลติกแครกกิ้ง โดยเลือก ศึกษาความเข้มข้นของเบนซิน (C₆) และไอโซออกเทน (C₈) เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ทำให้ ค่าออกเทนในแก๊สโซลีนสูงขึ้น

- ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของเบนซินและไอโซออกเทน : ศึกษาผลของ อุณหภูมิที่ 400 475 และ 550 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำสุด ค่ากลาง และค่าสูงสุด ในช่วง อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ศึกษาที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาครั้งที่ 3 กรัม เนื่องจากเป็นค่ากลางของ ตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วง 1-5 กรัม แสดงดังตารางที่ 3-2

- ศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นของเบนซีนและไอโซออกเทน : ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1 3 และ 5 กรัม ซึ่งเป็นน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นค่าต่ำสุด ค่ากลาง และค่าสูงสุด ศึกษาที่อุณหภูมิคงที่ 475 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นค่ากลางของอุณหภูมิในช่วง 400-475 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-2 แสดงตารางการทดลองศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของเบนซีนและไอโซออกเทน

Effect of Temperature	
Temperature (°C)	Catalyst (g.)
400	3
400	3
475	3
475	3
550	3
550	3

ตารางที่ 3-3 แสดงตารางการทดลองศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นของเบนซีนและไอโซออกเทน

Effect of Catalyst weight	
Catalyst (g.)	Temperature (°C)
1	475
1	475
3	475
3	475
5	475
5	475

3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์

จากผลการทดลองในขั้นตอนการหาช่วงสภาวะที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากโปรแกรม RSM จึงนำตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์มาออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ โดยจะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อผลได้ของของเหลวอินทรีย์ และศึกษาผลได้ของแก๊สโซลีนในของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยเครื่อง GC-FID

-ใช้น้ำมันปาล์มรีไฟน์ 15 กรัม

-ช่วงอัตราการไหลของไนโตรเจนที่คาดว่าเป็นช่วงที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากโปรแกรม RSM ในการทดลองที่ 1

-ช่วงอุณหภูมิที่คาดว่าเป็นช่วงที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากโปรแกรม RSM ในการทดลองที่ 1 และจากการวิเคราะห์ผลของเบนซินและไอโซออกเทนจากการทดลองที่ 2

-ช่วงตัวเร่งปฏิกิริยาที่คาดว่าเป็นช่วงที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากโปรแกรม RSM ในการทดลองที่ 1 และจากการวิเคราะห์ผลของเบนซินและไอโซออกเทนจากการทดลองที่ 2

3.3.3.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว

จากผลการทดลองในขั้นตอนการหาช่วงสภาวะที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนของน้ำมันปาล์มรีไฟน์จากโปรแกรม RSM จึงนำตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์มาออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว โดยจะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ อัตราการไหลของไนโตรเจน และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลได้ของของเหลวอินทรีย์ และศึกษาผลได้ของแก๊สโซลีนในของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยเครื่อง GC-FID

-ใช้น้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว 15 กรัม

-ช่วงอัตราการไหลของไนโตรเจนที่คาดว่าเป็นช่วงที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากโปรแกรม RSM ในการทดลองที่ 1

-ช่วงอุณหภูมิที่คาดว่าเป็นช่วงที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากโปรแกรม RSM ในการทดลองที่ 1 และจากการวิเคราะห์ผลของเบนซินและไอโซออกเทนจากการทดลองที่ 2

-ช่วงตัวเร่งปฏิกิริยาที่คาดว่าจะมีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากโปรแกรม RSM ในการทดลองที่ 1 และจากการวิเคราะห์ผลของเบนซินและไอโซออกเทนจากการทดลองที่ 2

3.3.3.4 ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก

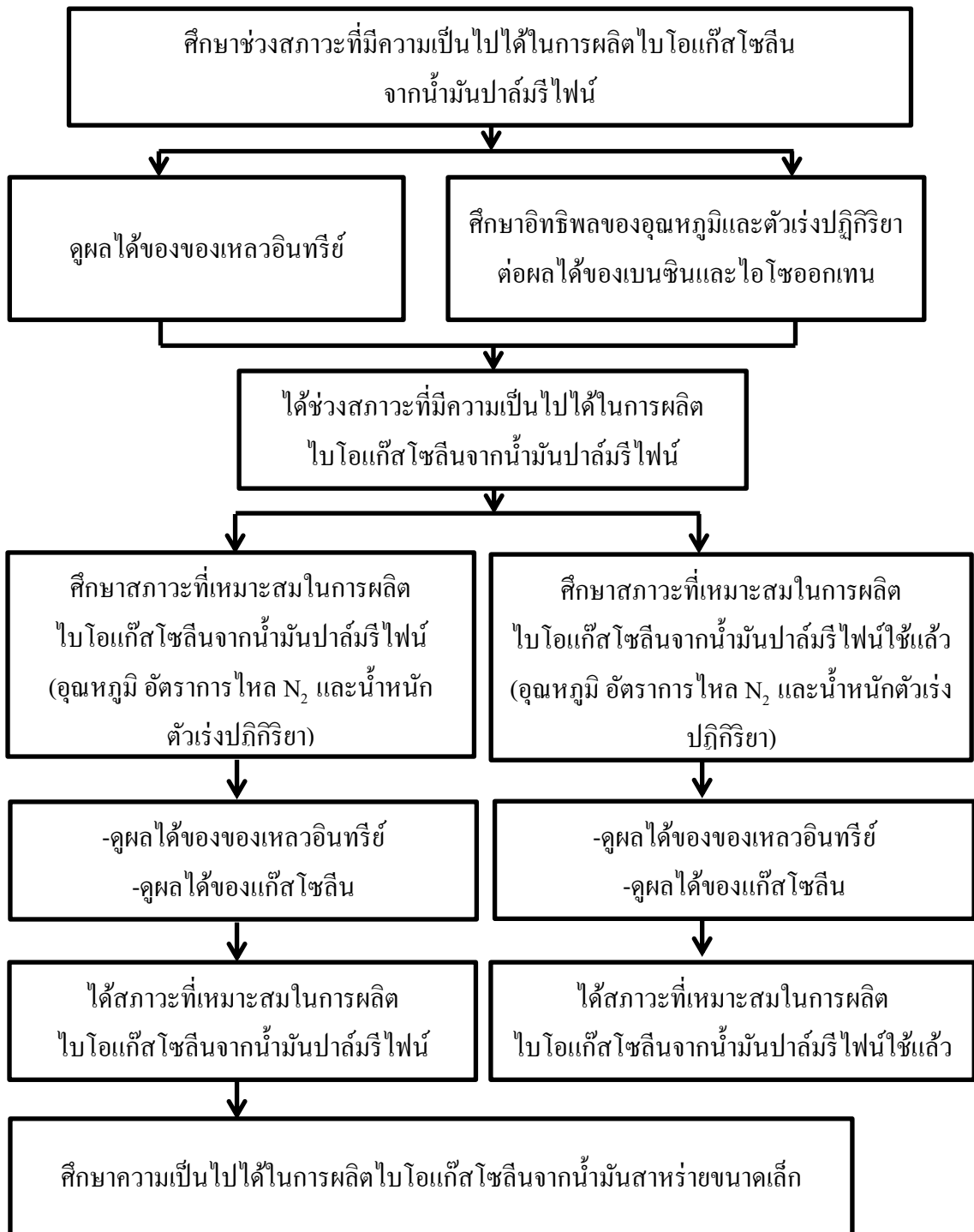
ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กโดยการใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ เพื่อเปรียบเทียบผลได้ของของเหลวอินทรีย์และผลได้ของแก๊สโซลีนของน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก

3.3.3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองและการคำนวณ

ในการศึกษาช่วงสภาวะที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ที่ออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม RSM ใช้ร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์ (% Yield of OLP) ในการวิเคราะห์ผลและหาสภาวะที่เหมาะสมจากการคำนวณของโปรแกรม RSM ซึ่งการคำนวณร้อยละผลได้ของ OLP แสดงดังสมการที่ (3.2) จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ผลความเข้มข้นของเบนซินและไอโซออกเทน เพื่อคู่อธิพจน์ของอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยาต่อแนวโน้มในการเลือกเกิดเป็นแก๊สโซลีน เลือกพิจารณาเพียงความเข้มข้นของเบนซินและไอโซออกเทนเนื่องจากค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ผลและราคาสารมาตรฐานมีราคาสูง หลังจากได้แนวโน้มของอิทธิพลของอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นของเบนซินและไอโซออกเทน รวมถึงผลการพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมในส่วนของผลได้ของ OLP และตัวแปรที่มีผลต่อการคะตะไลติกแครกกิ่งแล้ว นำมาหาสภาวะที่เหมาะสมที่แท้จริง โดยพิจารณาทั้งร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน โดยพิจารณาจากร้อยละผลได้ของ OLP ก่อน และพิจารณาผลได้ของแก๊สโซลีน ซึ่งประกอบด้วย Benzene, Isooctane, Toluene, m-Xylene, o-Xylene, p-Xylene และ Ethyl benzene ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่อยู่ในช่วงของแก๊สโซลีนและทำให้ค่าออกเทนในแก๊สโซลีนสูงขึ้น โดยวิธีการคำนวณร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนแสดงดังสมการที่ (3.3) ซึ่งลำดับการดำเนินการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 3-3

$$\% \text{Yield of OLP (\% by weight)} = \frac{\text{OLP}}{\text{Oil feed}} \times 100\% \quad (3.2)$$

$$\% \text{Yield of gasoline (\% by weight)} = \frac{\text{gasoline}}{\text{Oil feed}} \times 100\% \quad (3.3)$$



ภาพประกอบที่ 3-3 แสดงลำดับการทดลองการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีน

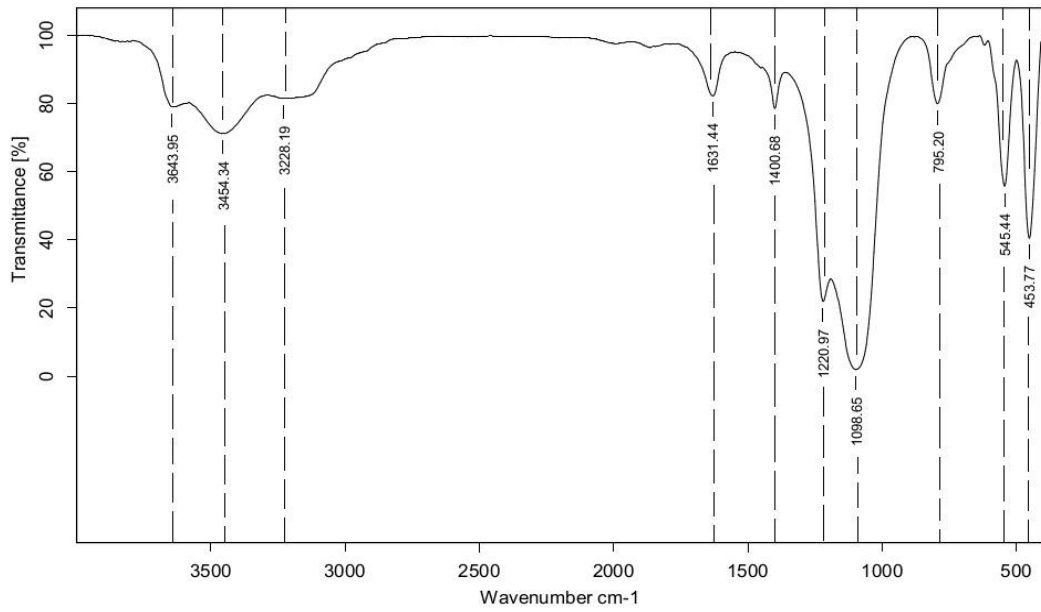
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

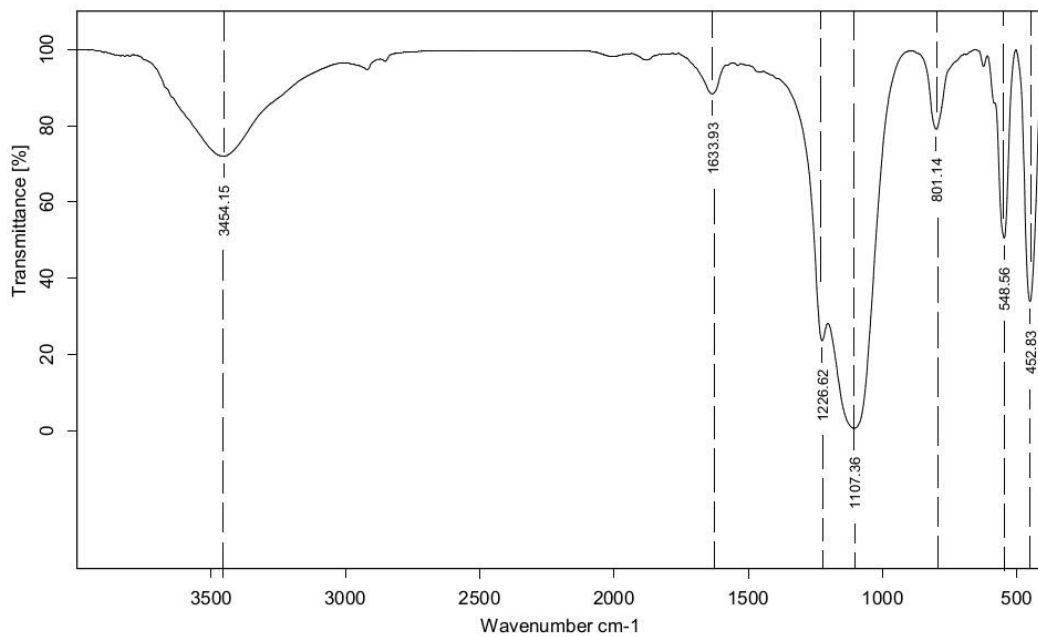
4.1 ผลศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา

ศึกษากระบวนการคะตะไลติกแครกกิงของน้ำมันพืช ได้แก่ น้ำมันปาล์มรีไฟน์ น้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว และน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็ก ซึ่งกระบวนการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันให้ได้ไฮโดรคาร์บอนในช่วงแก๊สโซลีนนั้นใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการเข้าช่วยการทำปฏิกิริยา จึงได้มีการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 ซึ่งเป็นการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบ แสดงการยึดและงอของพันธะต่างๆ ในที่นี้ได้วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ $\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$ เริ่มต้น ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-1 และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด H-ZSM-5 ที่ผ่านการเตรียมโดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด $\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$ ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาเผาโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-2

จากสเปกตรัมที่ปรากฏในภาพประกอบที่ 4-1 และภาพประกอบที่ 4-2 พบว่า สเปกตรัมของ $\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$ และ H-ZSM-5 ส่วนใหญ่มีความใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-4000 ต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) แตกต่างกันที่สเปกตรัมของ $\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$ ปรากฏเลขคลื่นที่ 3643 และ 3228 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นของกลุ่ม N-H stretching และ O-H group ซึ่งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อเปลี่ยน $\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$ ไปเป็น H-ZSM-5 หมู่ฟังก์ชันที่ความยาวคลื่นดังกล่าวจึงไม่ปรากฏในสเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5



ภาพประกอบที่ 4-1 แสดงสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$ โดย FT-IR spectroscopy



ภาพประกอบที่ 4-2 แสดงสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 โดย FT-IR spectroscopy

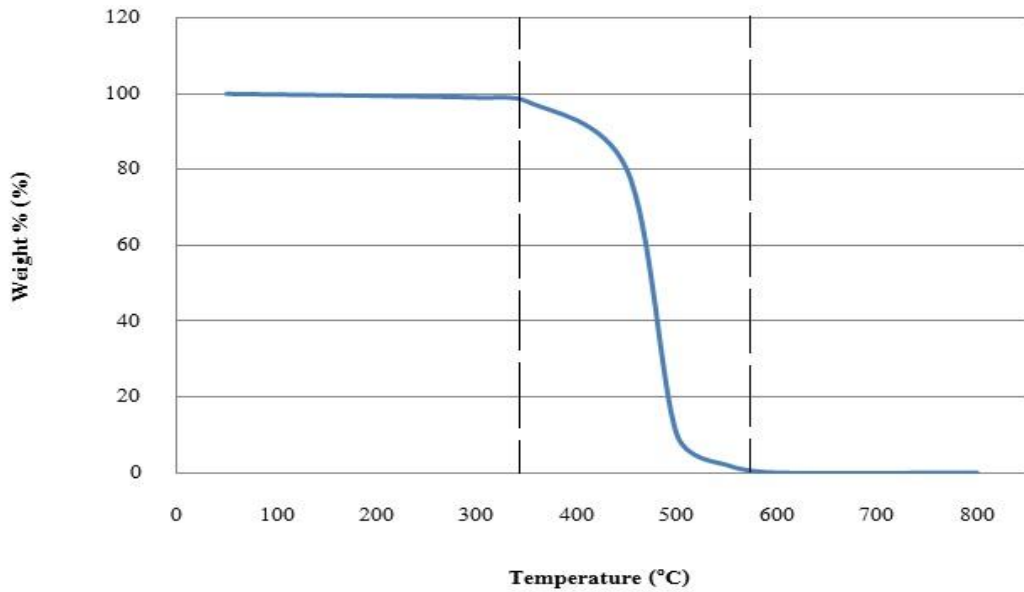
จากสเปกตรัมที่ปรากฏของตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 ปรากฏเลขความยาวคลื่นในช่วง 400-3500 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเลขคลื่นที่เป็นความยาวคลื่นหลักที่แสดงถึงตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Zeolite (Fingerprint) คือความยาวคลื่นในช่วง 400-1300 ต่อเซนติเมตร (Ciobanu และคณะ, 2008) งานวิจัยนี้ปรากฏเลขคลื่นเท่ากับ 452, 548, 625, 801, 1107, 1226 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของ T-O bend, Double five member ring, Symmetric stretching, Internal asymmetric ของ TO_4 tetrahedral (T-O-T) และ External asymmetric ของ TO_4 tetrahedral (T-O-T) นอกจากนี้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 3500-3800 ต่อเซนติเมตร เป็นความยาวคลื่นของกลุ่มไฮดรอกซิล (OH group) ซึ่งในงานวิจัยนี้ปรากฏเลขคลื่นที่ 3455 ต่อเซนติเมตร ซึ่งคาดว่า เป็นหมู่ฟังก์ชันของ Si-(OH)-Al ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Musthofa และคณะ (2010), Khatamian และคณะ (2009) และ Farizul และคณะ (2006) พบว่าความยาวคลื่นที่ได้นั้นอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4-1 จึงสรุปได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็น H-ZSM-5

ตารางที่ 4-1 แสดงการเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค FT-IR ของตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ

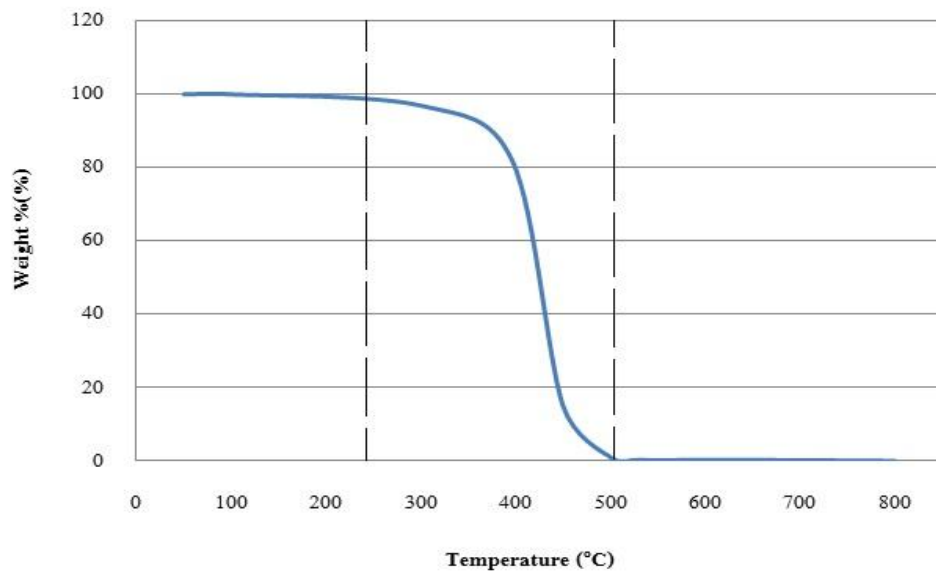
หมู่ฟังก์ชัน/เลขคลื่น (cm^{-1})						อ้างอิง
T-O	Double five member ring	Symmetric stretching	Internal asymmetric of TO_4 tetrahedral	External asymmetric of TO_4 tetrahedral	Si-(OH)-Al	
452	548	801	1107	1226	3455	งานวิจัยฉบับนี้
450	545	795	1100	1225	3608	Khatamian และคณะ (2009)
455	547	794	1103	1225	3608	Farizul และคณะ (2006)

4.2 ผลการศึกษาช่วงอุณหภูมิโดยเครื่อง Thermo Gravimetric Analysis (TGA)

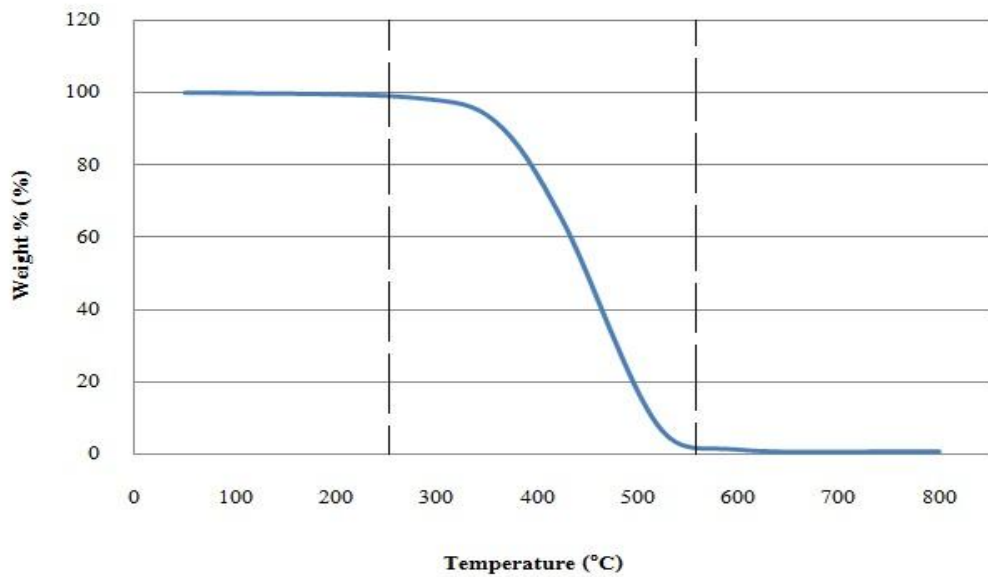
TGA เป็นเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของน้ำมันต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัตถุดิบในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สโซลีน 3 ชนิด คือ น้ำมันปาล์มรีไฟน์ น้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว และ น้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก



ภาพประกอบที่ 4-3 แสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำมันปาล์มรีไฟน์โดยเครื่อง TGA



ภาพประกอบที่ 4-4 แสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วโดยเครื่อง TGA



ภาพประกอบที่ 4-5 แสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำมันสำหรับขนาดเล็กโดยเครื่อง TGA

ภาพประกอบที่ 4-3 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักของน้ำมันปาล์มรีไฟน์พบว่า ที่อุณหภูมิ 50-350 องศาเซลเซียส ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของน้ำมัน แต่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิประมาณ 360 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอย่างเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิ 450-500 องศาเซลเซียส ซึ่งหมายความว่า น้ำมันสามารถเปลี่ยนเป็นสถานะแก๊สได้มากในช่วงอุณหภูมินี้ หลังจากนั้นกราฟจึงเริ่มคงที่และไม่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักน้ำมัน ซึ่งแสดงว่า ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส น้ำมันส่วนที่เหลือไม่สามารถเปลี่ยนเป็นสถานะแก๊ส

ภาพประกอบที่ 4-4 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว พบว่า ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50-200 องศาเซลเซียสยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักน้ำมันหรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่น้ำหนักของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วเริ่มเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิตั้งแต่ 350-500 องศาเซลเซียส นั่นคือน้ำมันสามารถเปลี่ยนเป็นสถานะแก๊สได้มากในช่วงอุณหภูมินี้ หลังจากนั้นน้ำหนักของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วก็ไม่เปลี่ยนแปลงและเข้าสู่สภาวะคงที่ที่อุณหภูมิมากกว่า 550 องศาเซลเซียส

ภาพประกอบที่ 4-5 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักน้ำมันสำหรับขนาดเล็ก พบว่า ที่อุณหภูมิ 50-200 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักไม่มากนัก แต่เริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิ 300-550 องศาเซลเซียส

จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักน้ำมันทั้ง 3 ชนิด คือ น้ำมันปาล์มรีไฟน์ น้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว และน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็ก ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการใช้การวิเคราะห์โดยเครื่อง TGA สามารถกล่าวได้ว่า น้ำมันทั้ง 3 ชนิดจะเริ่มเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส และเริ่มเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิประมาณ 400-550 องศาเซลเซียส และหลังจากอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสแล้ว น้ำมันที่เหลือจะไม่สามารถเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊สได้ ดังนั้นที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นที่สามารถทำให้น้ำมันในสถานะของเหลวเปลี่ยนเป็นสถานะแก๊สได้มาก และเนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ใช้กระบวนการคละตะไลติกแครกกิ่ง ซึ่งปฏิกิริยาตะไลติกแครกกิ่งนั้นเกิดได้ดีในสถานะแก๊ส ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวสามารถเลือกช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊ส โซลีนจากกระบวนการคละตะไลติกแครกกิ่งเป็นช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 400-550 องศาเซลเซียส ซึ่งจะนำไปออกแบบการทดลองในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนต่อไป

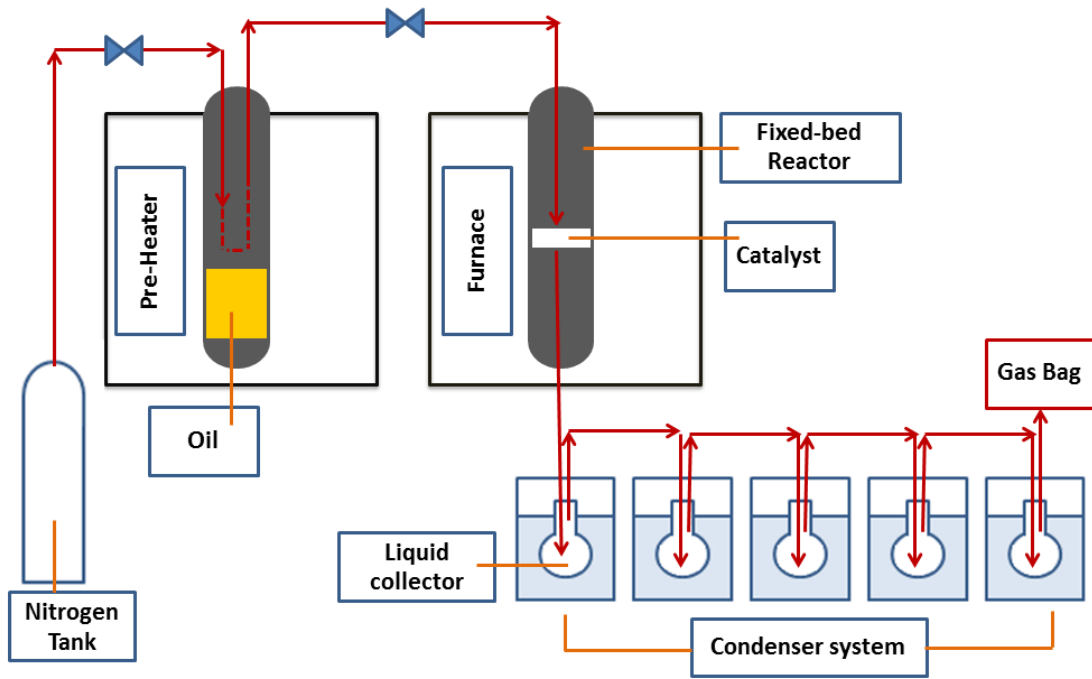
4.3 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์

4.3.1 ผลการสร้างและติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการคละตะไลติกแครกกิ่ง

ดำเนินการสร้างและติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการคละตะไลติกแครกกิ่งดังแผนภาพที่แสดงในภาพประกอบที่ 4-6 ซึ่งประกอบด้วย

- ถังปฏิกรณ์ (Reactor) จำนวน 2 ถัง
 - Reactor ที่ 1 : ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ทนอุณหภูมิสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.81 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ปริมาตร 186 ลูกบาศก์เซนติเมตร ด้านบนมีทางเข้าของแก๊สไนโตรเจน ปลายปิดด้านล่าง
 - Reactor ที่ 2 : ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ทนอุณหภูมิสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.81 เซนติเมตร สูง 36.5 เซนติเมตร ปริมาตร 226.35 ลูกบาศก์เซนติเมตร ด้านบนมีทางเข้าของแก๊สไนโตรเจน และด้านล่างมีทางออกของไอน์ผลิตภัณฑ์
- Pre-Heater และ เตาเผา (Furnace) ให้ความร้อนได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 100-800 องศาเซลเซียส
- ถังไนโตรเจน ภายในบรรจุแก๊สไนโตรเจนความเข้มข้น 99.9%, Regular Grade
- ชุดอุปกรณ์ควมแน่นและขวดใส่ผลิตภัณฑ์ จำนวน 5 ชุด

- ถังเก็บแก๊ส
- ชุด Thermocouple และ Data locker



ภาพประกอบที่ 4-6 แสดงแผนภาพกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่ง

เมื่อสร้างและติดตั้งเรียบร้อยแล้วได้ชุดอุปกรณ์สำหรับคะตะไลติกแครกกิ่งดังภาพประกอบที่ 4-7 ภายใน Reactor ตัวที่ 1 ใส่น้ำมันไว้ภายใน โดยน้ำมันที่ถูกให้ความร้อนจาก Pre-heater จะไหลเข้าสู่ Reactor ตัวที่ 2 จากด้านบนที่ภายในใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ ด้านล่างเป็นทางออกของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะถูกรวบรวมโดยใช้หลอดเก็บตัวอย่าง โดยผ่านการควบแน่นที่เชื่อมต่อกันเป็นระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบแน่นให้ดีขึ้น ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. ใส่น้ำมันใน Reactor ตัวที่ 1 ที่อยู่ใน Pre-heater และใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาใน Reactor ตัวที่ 2
2. ต่อระบบคะตะไลติกแครกกิ่งให้เรียบร้อยแล้วเปิดก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหล 20-30 มิลลิลิตรต่ออนาที เป็นเวลา 15-20 นาที ก่อนการทดลอง จากนั้นปรับอัตราการไหลของไนโตรเจนเป็นอัตราการไหลที่ต้องการใช้จริงในการทดลอง
3. เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิใน Reactor ตัวที่ 2 ให้ถึงอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิใน Reactor ตัวที่ 2 ได้ตามที่ต้องการแล้ว ให้เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิของ Pre-heater น้ำมันใน

Reactor ตัวที่ 1 จะถูกให้ความร้อนและระเหยกลายเป็นไอเข้าสู่ Reactor ตัวที่ 2 และไหลเข้าสู่ระบบควบแน่น

4. เมื่อดำเนินการเสร็จสิ้นให้นำผลิตภัณฑ์ของเหลวไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาผลได้ของของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการทดลองและนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ผลต่อไป

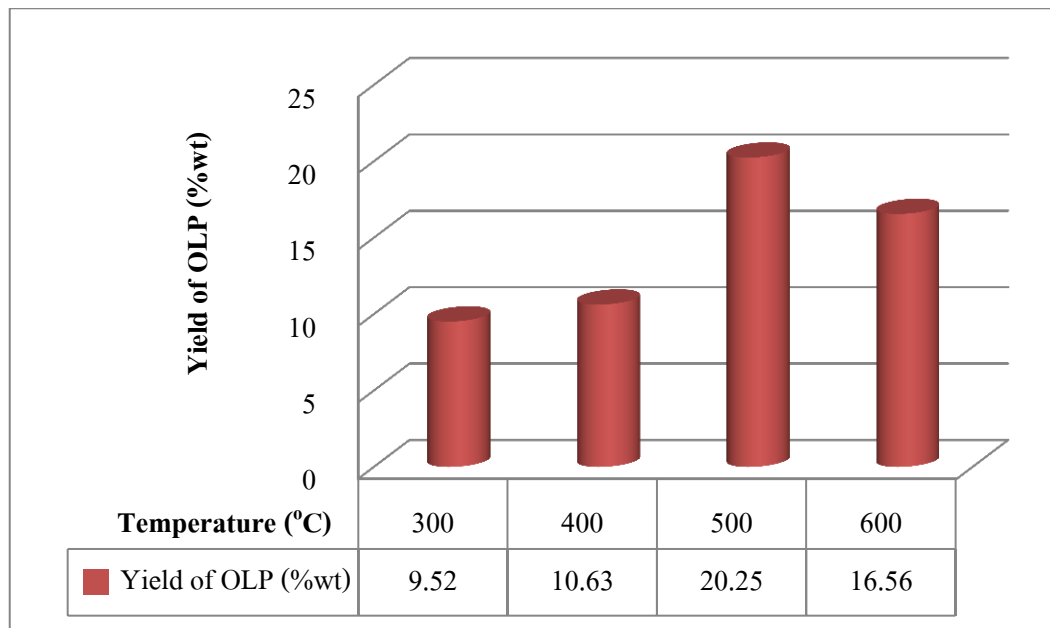


ภาพประกอบที่ 4-7 แสดงชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการคละไคติกแครกกิ่ง

4.3.2 ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มรีไฟน์โดยใช้กระบวนการเทอร์มอลแครกกิ่ง (Thermal cracking)

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากกระบวนการคละไคติกแครกกิ่งด้วยเครื่อง Fixed-bed micro reactor โดยมีการทดสอบระบบด้วยกระบวนการเทอร์มอลแครกกิ่ง และมีการทดสอบความเป็นไปได้ของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ที่ผ่านเครื่อง Fixed-bed micro reactor โดยการใช้ความร้อนในการแตกตัวตั้งแต่อุณหภูมิ 300-600 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของไนโตรเจนคงที่ 10 มิลลิลิตรต่ออนาที ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4-8 จะเห็นได้ว่า การใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเทอร์มอลแครกกิ่งที่สูงขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของ OLP นั้นมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส น้ำมันไม่สามารถเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอได้ทั้งหมด ทำให้ได้ร้อยละผลได้ของ OLP ที่น้อยกว่า ในขณะที่เมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส น้ำมันสามารถเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอและเกิด

การแตกตัวได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ TGA ในหัวข้อ 4.2 แต่เมื่อใช้อุณหภูมิสูงจนถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของ OLP นั้นลดลง เนื่องจากเมื่อใช้อุณหภูมิสูงส่งผลให้น้ำมันปาล์มรีไฟน์สามารถแตกตัวได้มากขึ้น ทำให้ได้โครงสร้างที่เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กมากขึ้น และเนื่องจากปฏิกิริยาการแตกตัวจากระบวนการเทอร์มอลแครกกิ่งเกิดขึ้นจากเรดิคอลอิสระ ทำให้เกิดปฏิกิริยาถูกโซ่ต่อเนื่อง และหยุดปฏิกิริยาได้ยาก ส่งผลให้เมื่อใช้อุณหภูมิสูงจึงเกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องจนได้ของเหลวอินทรีย์ที่น้อยกว่าเดิม และอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการแตกตัวแบบเทอร์มอลแครกกิ่งที่ดีที่สุด คือที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสให้ค่าร้อยละผลได้ของ OLP เป็นร้อยละ 21.25 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการทดลองเหล่านี้จะเป็นข้อมูลในการศึกษาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มรีไฟน์โดยใช้กระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่งในหัวข้อถัดไป



ภาพประกอบที่ 4-8 แสดงร้อยละผลได้ของ OLP จากการเทอร์มอลแครกกิ่งที่อุณหภูมิต่างๆ

4.3.3 การศึกษาช่วงสภาวะที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ด้วยโปรแกรม RSM

การศึกษาเริ่มต้นด้วยการหาช่วงสภาวะที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์โดยใช้โปรแกรม RSM ในการออกแบบการทดลอง การทดลองทั้งหมด 16 การทดลองและร้อยละผลได้ของ OLP ทั้ง 16 การทดลองแสดงดังตารางที่ 4-2 โดยคำนวณค่าร้อยละผลได้ของ OLP ดังสมการที่ (3.2)

ตารางที่ 4-2 แสดงการทดลองออกแบบโดยโปรแกรม RSM และ ร้อยละผลได้ของ OLP

Temperature, X_1	N_2 flow rate, X_2	Catalyst, X_3	Yield of OLP (%wt)
550	20	3	21.95
550	10	3	22.05
400	10	3	15.22
475	15	3	27.24
475	10	1	23.47
550	15	1	16.01
475	10	5	25.19
475	15	3	26.43
475	20	5	26.90
475	20	1	24.97
400	15	1	20.68
475	15	3	25.00
400	20	3	15.58
550	15	5	22.28
400	15	5	10.31
475	15	3	26.2

ซึ่งจากผลการทดลองนั้นได้ใช้โปรแกรม RSM ในการวิเคราะห์หาสภาวะที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนพิจารณาจากร้อยละผลได้ของ OLP ซึ่งสมการถดถอยกำลังสองแสดงดังสมการที่ (4.1) และทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างเขตคำตอบกับเขตของตัวแปรต้นที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % จากค่าความแปรปรวน (p-value) หากค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นมีความสำคัญที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง แต่หากค่า p-value มีค่ามากกว่า 0.1 แสดงว่าควรตัดสนใจพิจารณาค่านั้นออก เนื่องจากตัวแปรนั้นไม่มีอิทธิพลที่ส่งผลให้ค่าตัวแปรตามเปลี่ยนไป ในที่นี้ตัวแปรตามคือ ร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์ ซึ่งการค่าความแปรปรวน (p-value) จากโปรแกรม RSM ตามสมการที่ (4.1) แสดงดังตารางที่ 4-3

$$Y_{\text{OLP}} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_1^2 + b_5X_2^2 + b_6X_3^2 + b_7X_1X_2 + b_8X_1X_3 + b_9X_2X_3 \quad (4.1)$$

ตารางที่ 4-3 แสดงค่าความแปรปรวน (p-value) ที่ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยหน้าตัวแปรตามสมการ (4.1)

Coefficients		p-value
b ₀	-262.55	0.000406
b ₁	1.25	0.000113
b ₂	0.03967	0.979
b ₃	-11.43	0.00993
b ₄	-0.00136	7.61E-05
b ₅	0.0059	0.861
b ₆	-0.308	0.176
b ₇	-0.000307	0.891
b ₈	0.02773	0.00207
b ₉	0.00525	0.95

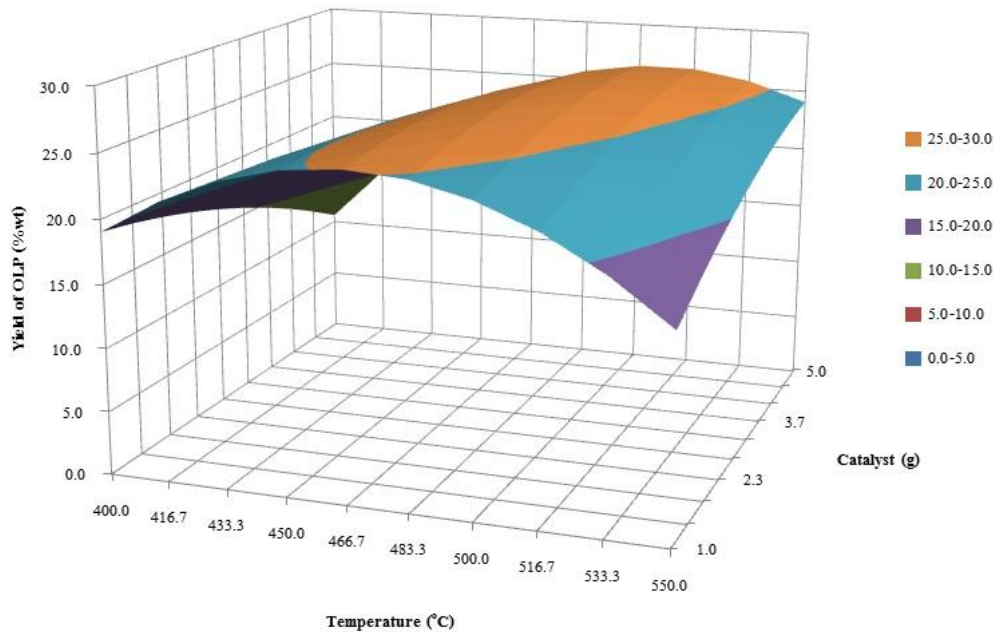
จากค่าความแปรปรวนที่แสดงดังตารางที่ 4-3 จะเห็นว่าตัวแปรที่สามารถตัดสนใจที่จะนำออกจากสมการได้คือที่ค่า p-value มากกว่า 0.1 ได้แก่ b₂X₂, b₅X₂², b₆X₃², b₇X₁X₂ และ b₉X₂X₃ ซึ่งโปรแกรม RSM สามารถทำการคำนวณตัดตัวแปรเหล่านี้ออกไปได้ โดยการทำให้ได้สมการการถดถอยกำลังสองใหม่ดังแสดงในสมการที่ (4.2) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น (R²) เป็น 0.955 และได้

ค่า p-value ใหม่ดังแสดงในตารางที่ 4-4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า อัตราการไหลของไนโตรเจนไม่มีผลต่อร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยหน้าตัวแปรอิสระ (Coefficient) แสดงถึงค่าความมีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม จึงแสดงให้เห็นว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลหลักและอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลรองลงมา ตามสมการ (4.2) โดยปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์จากมากไปน้อยได้แก่ น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา (X_3) อุณหภูมิ (X_1) และอัตราการไหลของไนโตรเจน (X_2) ซึ่งโปรแกรม RSM ได้คำนวณสถานะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 497.3 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 3.96 กรัม และไม่มีอิทธิพลจากอัตราการไหลของไนโตรเจน ซึ่งที่สถานะนี้จะสามารถผลิตของเหลวอินทรีย์ได้ร้อยละ 26.65 โดยน้ำหนัก และแสดงภาพพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลได้ของของเหลวอินทรีย์ภาพประกอบที่ 4-9

$$Y_{OLP} = -206.55 + 1.245X_1 - 11.35X_2 - 0.00136X_1^2 - 0.308X_3^2 + 0.02773X_1X_3 \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4-4 แสดงค่าความแปรปรวน (p-value) ที่ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยหน้าตัวแปรตามสมการ (4.2)

Coefficient		p-value
b_0	-260.56	2.1196E-06
b_1	1.246	5.76875E-07
b_2	-11.35	0.000605
b_3	-0.00136	3.71403E-07
b_4	-0.308	0.08940
b_5	0.02773	8.36975E-05



ภาพประกอบที่ 4-9 แสดงภาพพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลได้ของ OLP

จากการคำนวณของโปรแกรม RSM อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในช่วง 10-20 มิลลิลิตร ต่ออนาทินั้น พบว่ามีอิทธิพลน้อยที่สุดในกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่ง จากค่า p-value และสมการที่ได้จาก RSM งานวิจัยนี้จึงศึกษาเพิ่มเติมในช่วงอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ต่ำกว่า 10-20 มิลลิลิตรต่ออนาทินั้น คือ ศึกษาที่ 5-20 มิลลิลิตรต่ออนาทินั้น ที่อุณหภูมิคงที่ 475 องศาเซลเซียส และตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่ 3 กรัม เพื่อหาอัตราการไหลของไนโตรเจนที่เหมาะสมที่สุดในการเป็นแก๊สพาสำหรับปฏิกิริยาคะตะไลติกแครกกิ่ง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-5 ผลการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการไหลของไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ร้อยละผลได้ของ OLP ได้จากการคะตะไลติกแครกกิ่งลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่ออัตราการไหลของไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการป้อนน้ำมันเร็วขึ้น เนื่องจากน้ำมันที่ใช้ทำปฏิกิริยาอยู่ในสถานะแก๊ส ส่งผลให้ระยะเวลาในการที่ไอน้ำมันสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวนั้นลดลง และเมื่อผลิตภัณฑ์ที่ออกจากถังปฏิกรณ์ด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้น ทำให้เมื่อเข้าสู่ระบบควบแน่น ระบบไม่สามารถควบแน่นไอของผลิตภัณฑ์ได้ทั้งหมด ทำให้ร้อยละผลได้ของ OLP ที่ได้นั้นมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อัตราการไหลของไนโตรเจนเป็น 5 มิลลิลิตรต่ออนาทินั้นเป็นอัตราการไหลคงที่ตลอดการทดลองในการศึกษาหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4-5 แสดงการเปรียบเทียบผลได้ของ OLP ที่อัตราการไหลของไนโตรเจนต่างๆ

Temperature (°C)	Catalyst (g)	N ₂ flow rate (ml/min)	Yield of OLP (%wt)
475	3	5	28.65
475	3	10	26.81
475	3	15	26.29
475	3	20	22.58

ผลการศึกษาสภาวะที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ ด้วยโปรแกรม RSM ส่งผลให้ได้ช่วงสภาวะที่มีความเป็นไปได้ที่อุณหภูมิ 450-550 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 2-4 กรัม และอัตราการไหลของไนโตรเจน 5 มิลลิลิตรต่อนาที

4.3.4 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลได้ของเบนซินและไอโซออกเทน

ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของเบนซินและไอโซออกเทน เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สโซลีน โดยศึกษาผลของอุณหภูมิตั้งที่ 400 475 และ 550 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งที่ 3 กรัม อัตราการไหลของไนโตรเจน 5 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งผลของการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-6 และศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นของเบนซินและไอโซออกเทน โดยศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1 3 และ 5 กรัม ที่อุณหภูมิตั้งที่ 475 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไนโตรเจน 5 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งผลของการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-7

จากตารางที่ 4-6 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของเบนซินและไอโซออกเทน พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแปรผันตรงกับความเข้มข้นของเบนซิน (C₆) คือเมื่อใช้อุณหภูมิตั้งที่ 400 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ความเข้มข้นของเบนซินมากขึ้น แต่อุณหภูมิไม่มีผลต่อความเข้มข้นของไอโซออกเทนมากนักในช่วงอุณหภูมิ 400-475 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นไปจนถึง 550 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของไอโซออกเทน (C₈) มีแนวโน้มลดลง นั่นแสดงให้เห็นว่า การใช้อุณหภูมิตั้งที่ 550 องศาเซลเซียสส่งผลให้เกิดการแตกตัวมากขึ้น ทำให้โมเลกุลที่ใหญ่กว่าแตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กกว่า เช่นเดียวกับที่เมื่อใช้อุณหภูมิตั้งที่ 400 องศาเซลเซียส ทำให้โมเลกุลที่ใหญ่กว่าแตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กกว่า และความเข้มข้นของเบนซินซึ่งเป็นโมเลกุลที่เล็กกว่าสูงขึ้น

จากตารางที่ 4-7 แสดงอิทธิพลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นของเบนซินและไอโซออกเทน พบว่าเมื่อน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1-3 กรัม ความเข้มข้นของเบนซินเพิ่มขึ้น แต่เมื่อน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 5 กรัม กลับทำให้ความเข้มข้นของเบนซินลดลง ในขณะที่ผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นของไอโซออกเทนนั้น ความเข้มข้นของไอโซออกเทนแปรผกผันกับน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของไอโซออกเทนลดลง ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นทำให้เพิ่มความสามารถในการแตกตัวไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของไอโซออกเทน (C_8) ที่เป็นโมเลกุลใหญ่ลดลง และความเข้มข้นของเบนซิน (C_6) ซึ่งเป็นโมเลกุลเล็กกว่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นไปอีกจนถึง 5 กรัม ความเข้มข้นของเบนซินลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่า ไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ได้แตกตัวเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กที่ต่ำกว่าช่วงของเบนซิน (C_6) และไอโซออกเทน (C_8) มากขึ้น

จากผลการทดลองดังกล่าว ได้สนับสนุนการเลือกช่วงสภาวะที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนตามหัวข้อ 4.3.2 คือควรใช้อุณหภูมิมากกว่า 400 องศาเซลเซียส แต่ไม่เกิน 550 องศาเซลเซียส และตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เกิน 5 กรัม ซึ่งเป็นการยืนยันว่า การเลือกช่วงสภาวะที่เหมาะสมเป็นอุณหภูมิตั้งแต่ 450-550 องศาเซลเซียส และตัวเร่งปฏิกิริยา 2-4 กรัม ในการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนนั้นมีความเป็นไปได้

ตารางที่ 4-6 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของเบนซีนและไอโซออกเทนใน OLP

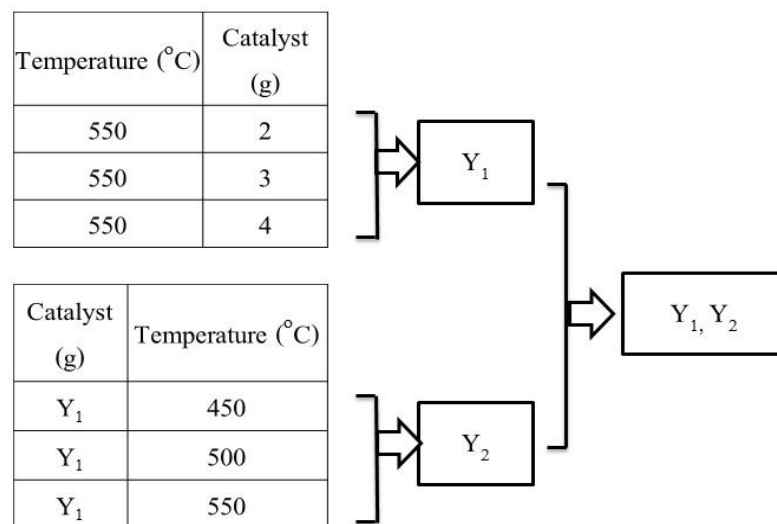
Temperature (°C)	Concentration (%wt)	
	Benzene (C ₆)	Isooctane (C ₈)
400	0.35	0.04
400	0.33	0.04
475	4.96	0.03
475	4.17	0.05
550	4.55	0.01
550	5.62	0.70 E-03

ตารางที่ 4-7 แสดงอิทธิพลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นของเบนซีนและไอโซออกเทนใน OLP

Catalyst weight (g)	Concentration (%wt)	
	Benzene (C ₆)	Isooctane (C ₈)
1	1.38	0.08
1	2.91	0.11
3	4.97	0.03
3	4.12	0.05
5	4.2 E-03	0.13 E-03
5	4.4 E-03	0.16 E-03

4.3.5 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์

จากการทดลองในหัวข้อ 4.3.3 ที่ได้ออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม RSM และได้ช่วงสภาวะที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีน ขั้นตอนนี้จึงเป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ จากช่วงสภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิตั้งแต่ 450-550 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 2-4 กรัม และอัตราการไหลของไนโตรเจนเป็น 5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงทดลอง ให้ค่าความเร็วปฏิกิริยา 11.25 -22.50 ต่อชั่วโมง การทดลองเริ่มจากการหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือ ดำเนินการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ 2-4 กรัม ที่อุณหภูมิคงที่ 550 องศาเซลเซียส จะได้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม (Y_1) ซึ่งในขั้นตอนนี้พิจารณาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากร้อยละผลได้ของ OLP เนื่องจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สโซลีนนั้น มีค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน เพื่อความสะดวกในการศึกษาต่อ จึงเลือกพิจารณาเพียงร้อยละผลได้ของ OLP ในขั้นตอนนี้ จากนั้นหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนตั้งแต่ 450-550 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่ที่ Y_1 โดยพิจารณาทั้งร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีน ซึ่งประกอบไปด้วย Isooctane, Benzene, Toluene, p-Xylene, m-Xylene, o-Xylene และ Ethylbenzene เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่ให้การเลือกเกิดเป็นแก๊สโซลีนสูงสุด จะได้อุณหภูมิที่เหมาะสม (Y_2) แสดงดังภาพประกอบที่ 4- 10



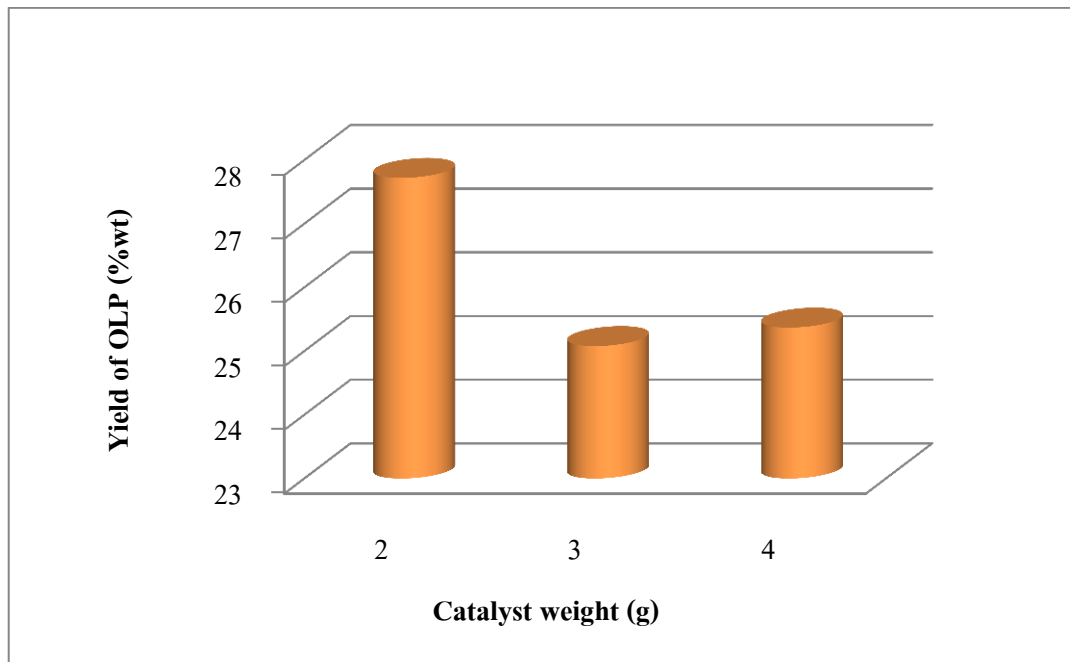
ภาพประกอบที่ 4- 10 แสดงผังการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์

4.3.5.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการคะตะไลติกแครกกิงของน้ำมันปาล์มรีไฟน์

ผลการหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4-8 ซึ่งพิจารณาจากผลได้ของของเหลวอินทรีย์ เพื่อหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม และนำไปศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อไป ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัม ให้ผลได้ของของเหลวอินทรีย์มากที่สุดที่ร้อยละ 27.72 โดยน้ำหนัก และแสดงความสัมพันธ์เชิงกราฟของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับผลได้ของของเหลวอินทรีย์ดังภาพประกอบที่ 4-11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สโซลีนที่มากกว่า 2 กรัม ให้แนวโน้มผลได้ของของเหลวอินทรีย์ลดลง เนื่องจากเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ไปเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กเพิ่มมากขึ้น ทำให้ไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นมีโมเลกุลเล็กลงจนไม่สามารถควบแน่นจากแก๊สให้กลายเป็นของเหลวได้ จึงส่งผลให้ค่าผลได้ของของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มลดลง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม 2 กรัม และคำนวณค่าความเร็วปฏิกิริยาเป็น 22.50 ต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4-8 แสดงผลได้ของ OLP ในการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์

Temperature (°C)	Catalyst (g)	Yield of OLP (%wt)
550	2	27.72
550	3	25.08
550	4	25.37



ภาพประกอบที่ 4-11 แสดงความสัมพันธ์ของตัวเร่งปฏิกิริยากับผลได้ของ OLP

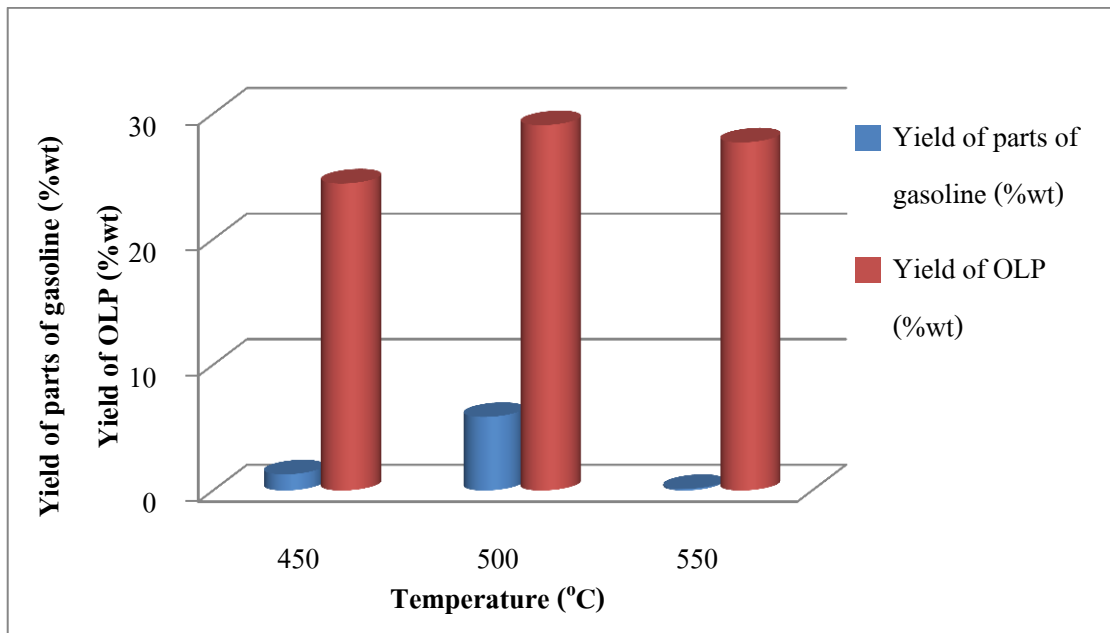
4.3.5.2 ผลของอุณหภูมิต่อการระเหยไอระเหยของน้ำมันปาล์มรีไฟน์

เมื่อหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความเร็วปฏิกิริยาที่เหมาะสมได้แล้ว จึงนำมาศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งพิจารณาจากร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน โดยการนำของเหลวอินทรีย์ที่ได้ไปวิเคราะห์การเกิดเป็นแก๊สโซลีนเชิงคุณภาพด้วยเครื่อง GC-FID ซึ่งเลือกวิเคราะห์ส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีน (Parts of gasoline) ได้แก่ Isooctane, Benzene, Toluene, p-Xylene, m-Xylene, o-Xylene และ Ethylbenzene ซึ่งเลือกวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารเหล่านี้ เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักที่อยู่ในแก๊สโซลีนและสารเหล่านี้ทำให้ออกเทนัมเบอร์ของแก๊สโซลีนเพิ่มขึ้น เพื่อตรวจสอบว่าในของเหลวอินทรีย์ที่ได้นั้นมีความเป็นไปได้ในการเกิดเป็นแก๊สโซลีนมากน้อยเพียงใด ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-9 พบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ให้ค่าการเลือกเกิดเป็นส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนสูงสุด โดยผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะนี้ให้ร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีน (% Yield of parts of gasoline) สูงสุดที่ 5.84 โดยน้ำหนัก และให้ผลได้ของ OLP ที่สูงที่สุดเป็นร้อยละ 29.09 โดยน้ำหนักอีกด้วย นอกจากนี้ยังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของ OLP และ ร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนกับอุณหภูมิดังภาพประกอบที่ 4- 12 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิมากกว่า 500 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด

เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้น้ำมันมีแตกตัวได้มากขึ้น ซึ่งทำให้ไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่เกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กลงจนทำให้การวิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนในช่วงของแก๊สโซลีนนั้นลดลง ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนนั้นลดลงตามไปด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแตกตัวน้ำมันปาล์มรีไฟน์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนนั้น ควรใช้อุณหภูมิที่มากกว่า 450 องศาเซลเซียส แต่ไม่ควรสูงถึง 550 องศาเซลเซียส ซึ่งในงานวิจัยนี้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์คือ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัม และความเร็วปฏิภูมิ 22.50 ต่อชั่วโมง ให้ค่าร้อยละผลได้ของ OLP สูงสุดที่ร้อยละ 29.09 โดยน้ำหนัก และให้ร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนสูงสุดที่ร้อยละ 5.84 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4-9 แสดงร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์

Temp. (°C)	Iso-octane, C ₈ (g)	Ben-zene, C ₆ (g)	Tolu-ene, C ₇ (g)	p-Xylene, C ₈ (g)	m-Xylene, C ₈ (g)	o-Xylene, C ₈ (g)	Ethyl benzene, C ₈ (g)	Total (g)	Yield of part of gasoline (%wt)	Yield of OLP (%wt)
450	0.45 E-03	0.03	0.09	0.05	1.55 E-06	6.70 E-05	0.03	0.19	1.29	24.45
500	17.04 E-03	0.22	0.49	5.69 E-03	0.02	0.08	0.05	0.88	5.84	29.09
550	6.37 E-05	5.05 E-03	9.52 E-03	2.64 E-03	1.76 E-06	7.92 E-05	1.51 E-03	0.02	0.13	27.72



ภาพประกอบที่ 4- 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของ OLP และ ร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊ส โซลีนกับอุณหภูมิ

4.3.6 ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว (Reused catalyst) และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกการปรับสภาพเพื่อกลับมาใช้ใหม่ (Regenerated catalyst) ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ที่สถานะที่เหมาะสม

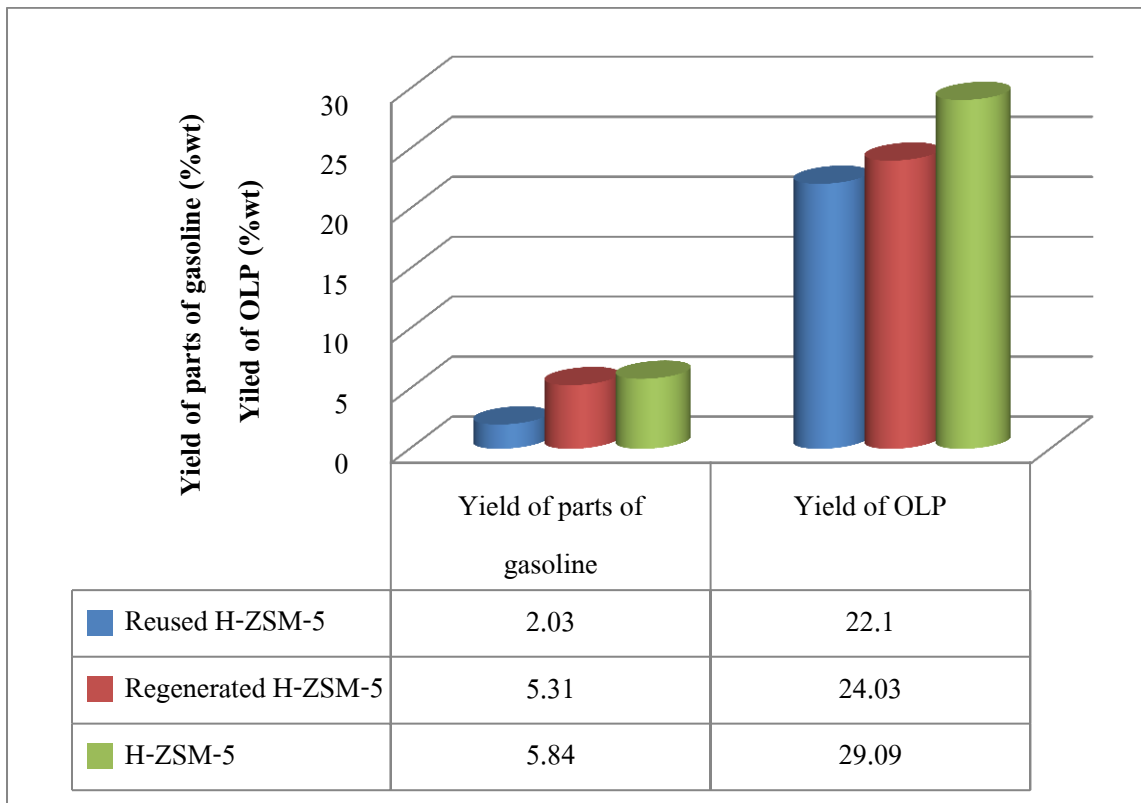
จากการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ในหัวข้อ 4.3.5 ได้สถานะที่เหมาะสมที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัม และความเร็วปฏิกิริยา 22.50 ต่อชั่วโมง จึงได้ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกการปรับสภาพเพื่อกลับมาใช้ใหม่ (ปรับสภาพโดยการเผาที่อุณหภูมิสูง 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง) ศึกษาที่สถานะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ ซึ่งผลการทดลองแสดงดัง

ตารางที่ 4-10 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วนั้น เมื่อนำมาใช้ซ้ำจะให้ร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนลดลง เนื่องจากโค้กที่เกาะติดบนตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลอง ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความสามารถในการแตกตัวให้ไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ กลายเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กลดลง ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกนำมาปรับสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่นั้น แม้จะให้ค่าร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนลดลงจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 ปกติ แต่ลดลงไม่มากนัก นั้นแสดงให้เห็นว่า การนำตัวเร่งปฏิกิริยาไป

ปรับสภาพด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้โค้กที่เกาะบนตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกำจัดออกไป ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แม้จะให้ประสิทธิภาพไม่เท่าการใช้งานครั้งแรก แต่ช่วยประหยัดปริมาณค่าใช้จ่ายโดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละผลได้ของ OLP กับร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนของตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 HZSM-5 ที่ใช้แล้วและ H-ZSM-5 ที่ผ่านการปรับสภาพแล้วดังภาพประกอบที่ 4-13

ตารางที่ 4-10 แสดงร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนในการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพเพื่อกลับมาใช้ใหม่ที่สภาวะที่เหมาะสมของ RPO

Catalyst Type	Iso octane, C ₈ (g)	Ben- zene, C ₆ (g)	Tolu- ene, C ₇ (g)	p- Xylene, C ₈ (g)	m- Xylene, C ₈ (g)	o- Xylene, C ₈ (g)	Ethyl ben zene, C ₈ (g)	Total (g)	Yield of parts of gasoline (%wt)	Yield of OLP (%wt)
H-ZSM-5	17.04 E-03	0.22	0.49	5.69 E-03	0.02	0.08	0.05	0.88	5.84	29.09
Reused H-ZSM-5	0.01	0.10	0.16	0	1.39 E-06	0	0.03	0.3	2.03	22.1
Regen-erated H-ZSM-5	4.75 E-03	0.29	0.41	0	0.04	0	0.04	0.79	5.31	24.03



ภาพประกอบที่ 4-13 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนและร้อยละผลได้ของ OLP จากการใช้ H-ZSM-5, Reused H-ZSM-5 และ Regenerated H-ZSM-5

4.3.7 ศึกษาองค์ประกอบ (C_8-C_{24}) ของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ก่อนกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่ง และของเหลวอินทรีย์จากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่ง

การศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มรีไฟน์โดย GC-FID ในช่วง C_8-C_{24} ภายใต้สารมาตรฐาน เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty acid methyl ester, FAME) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อดูองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ก่อนกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่ง และ OLP จากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่ง เพื่อดูว่ามีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของน้ำมันหรือไม่ องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ส่วนใหญ่ปรากฏกรดไขมันชนิด Palmitic Acid ($C_{16:0}$), Oleic Acid ($C_{18:1}$), Linoleic Acid ($C_{18:2}$) และ Stearic Acid ($C_{18:0}$) ในขณะที่ OLP จากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่งนั้นมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของน้ำมันเกิดขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4-11 โดยไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีเลขคู่ใหญ่มีสัดส่วนลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันปาล์มรีไฟน์ก่อนการคะตะไลติกแครกกิ่ง รวมถึงมีองค์ประกอบของกรดไขมันชนิด Nonanoic Acid ($C_9:0$) และ Erucic Acid ($C_{22:1}$) เพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 4-11 แสดงองค์ประกอบ C₈-C₂₄ ของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ก่อนกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่ง และ OLP จากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่ง

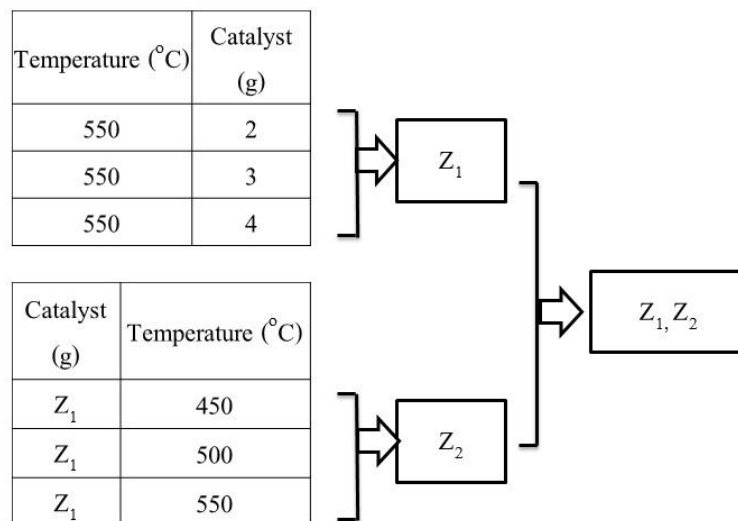
ชื่อกรดไขมัน	สูตรโมเลกุล	องค์ประกอบ RPO ก่อนทำปฏิกิริยา (%)	องค์ประกอบของ OLP (%)
Caprylic	C8: 0	0	0
Nonanoic	C9: 0	0	0.244
Capric	C10: 0	0.015	1.540
Lauric	C12: 0	0.232	0.571
Myristic	C14: 0	0.829	0.967
Palmitic	C16: 0	36.250	23.851
Palmitoleic	C16: 1	0.202	0
Stearic	C18:0	4.153	3.847
Oleic	C18: 1	44.866	7.079
Linoleic	C18: 2	11.850	0
Linolenic	C18: 3	0.194	0
Arachidic	C20: 0	0.376	0
Heneicosylic	C20: 1	0.189	0
Behenic	C22: 0	0.058	0.462
Erucic	C22: 1	0	0.240
Lignoceric	C24: 0	0.070	0
Nervonic	C24: 1	0.020	0

4.4 ผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว

4.4.1 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว

เป็นการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว โดยอ้างอิงช่วงสถานะที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์คือ อุณหภูมิตั้งแต่ 450-550 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 2-4 กรัม และใช้อัตราการไหลของไนโตรเจนคงที่ 5 มิลลิเมตรต่อนาทีตลอดการทดลอง ซึ่งให้ค่าความเร็วปฏิกิริยา 11.25-22.50 ต่อชั่วโมง การทดลองเริ่มจากการหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือ ดำเนินการศึกษาตัวเร่ง

ปฏิกิริยาตั้งแต่ 2-4 กรัม ที่อุณหภูมิคงที่ 550 องศาเซลเซียส จะได้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม (Z_1) ซึ่งพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากร้อยละผลได้ของ OLP จากนั้นหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนตั้งแต่ 450-550 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาของ Z_1 จะได้อุณหภูมิที่เหมาะสม (Z_2) โดยพิจารณาทั้งร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีน ที่ประกอบด้วย Isooctane, Benzene, Toluene, p-Xylene, m-Xylene, o-Xylene และ Ethyl benzene เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้การเลือกเกิดเป็นแก๊สโซลีนสูงสุด ซึ่งผังการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4-14



ภาพประกอบที่ 4-14 แสดงผังการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว

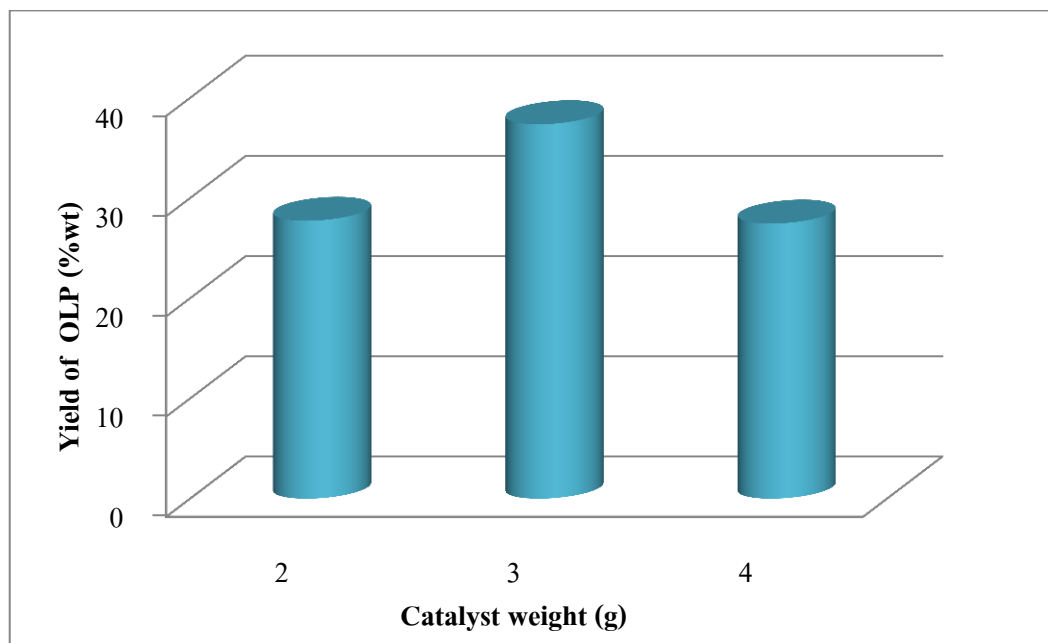
4.4.1.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการคะตะไลติกแครกกิงของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว

ผลการหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4-12 โดยพิจารณาจากร้อยละผลได้ของ OLP เพื่อหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม และนำไปศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อไป ซึ่งจากการทดลองพบว่า ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 กรัม ให้ร้อยละผลได้ของ OLP มากที่สุดที่ร้อยละ 37.37 โดยน้ำหนัก และแสดงความสัมพันธ์เชิงกราฟระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับร้อยละผลได้ของ OLP ดังภาพประกอบที่ 4-15 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการคะตะไลติกแครกกิงของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วนั้นแตกต่างจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ โดยเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทำให้ร้อยละผลได้ของ OLP เพิ่มขึ้น จนกระทั่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 3 กรัม ค่าร้อยละผลได้ของ OLP เริ่มลดลง จากการ

ทดลอง ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 กรัม ให้ค่าร้อยละผลได้ของ OLP สูงสุด อย่างไรก็ตาม ผลของร้อยละผลได้ของ OLP ของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วยังให้ร้อยละผลได้ของ OLP ที่มากกว่าของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วถูกใช้งานมาก่อน ทำให้โซ่ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วมีโซ่ที่สั้นลงกว่าและมีไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวสูงกว่าน้ำมันปาล์มรีไฟน์ ทำให้การแตกตัวโดยกระบวนการคะตะไลติกแครกกิงเป็นไปได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ผลได้ของของเหลวอินทรีย์ที่ได้มากขึ้น ซึ่งที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม 3 กรัม และให้ค่าความเร็วปฏิกิริยาเป็น 15 ต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4-12 แสดงร้อยละผลได้ของ OLP ในการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊ส โซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์แล้ว

Temperature (°C)	Catalyst (g)	Yield of OLP (%wt)
550	2	27.74
550	3	37.37
550	4	27.46



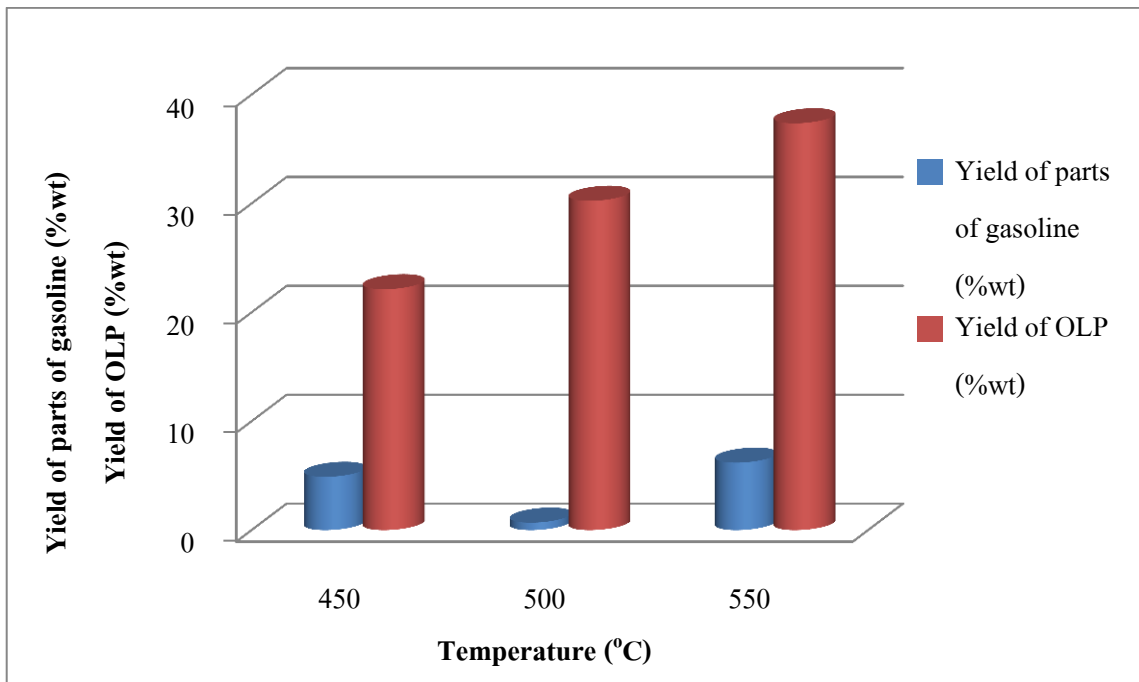
ภาพประกอบที่ 4-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับร้อยละผลได้ของ OLP

4.4.1.2 ผลของอุณหภูมิต่อการคะตะไลติกแครกกิ้งของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว

เมื่อหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความเร็วปฏิกิริยาที่เหมาะสมได้แล้ว จึงนำมาศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งพิจารณาจากร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีน โดยการนำของเหลวอินทรีย์ที่ได้ไปวิเคราะห์สภาพการเลือกเกิดเป็นแก๊สโซลีนเชิงคุณภาพด้วยเครื่อง GC-FID ซึ่งเลือกวิเคราะห์ความเข้มข้นของ Isooctane, Benzene, Toluene, p-Xylene, m-Xylene, o-Xylene และ Ethyl benzene เช่นเดียวกับการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-13 พบว่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 กรัม ความเร็วปฏิกิริยา 15 ต่อชั่วโมง ให้ค่าการเลือกเกิดเป็นแก๊สโซลีนสูงสุด โดยผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะนี้ให้ร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนสูงสุดเป็น 6.20 โดยน้ำหนัก และผลได้ของ OLP ที่สูงที่สุดเป็นร้อยละ 37.37 โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่าร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนและร้อยละผลได้ของ OLP สูงกว่าผลการทดลองของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนกับอุณหภูมิดังภาพประกอบที่ 4-16

ตารางที่ 4-13 แสดงผลได้ของ OLP และผลได้ของแก๊สโซลีนในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว

Temp. (°C)	Iso octane, C ₈ (g)	Ben- zene, C ₆ (g)	Tolu- ene, C ₇ (g)	p-Xy lene, C ₈ (g)	m-Xy lene, C ₈ (g)	o-Xy lene, C ₈ (g)	Ethyl ben zene, C ₈ (g)	Total (g)	Yield of parts of gasoline (%wt)	Yield of OLP (%wt)
450	0.01	0.09	0.47	0.01	0.04	0.12	2.85 E-03	0.73	4.89	22.13
500	0.83 E-03	0.02	0.05	0.02	0.42 E-03	0	0.01	0.10	0.69	30.25
550	7.70 E-03	0.25	0.51	0.01	0.02	0.08	0.06	0.93	6.20	37.37



ภาพประกอบที่ 4-16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนกับอุณหภูมิ

4.4.2 ศึกษาองค์ประกอบ (C_8 - C_{24}) ของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วก่อนกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่งและของเหลวอินทรีย์จากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่ง

การศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วโดย GC-FID ในช่วง C_8 - C_{24} ส่วนใหญ่ปรากฏกรดไขมันชนิด Plametic Acid ($C_{16}:0$), Oleic Acid ($C_{18}:1$), Linoleic Acid ($C_{18}:2$) และ Steric Acid ($C_{18}:0$) ก่อนการคะตะไลติกแครกกิ่ง ในขณะที่องค์ประกอบของ OLP จากการคะตะไลติกแครกกิ่งมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในเกิดขึ้น โดยไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กดังแสดงในตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4-14 แสดงองค์ประกอบ C₈-C₂₄ ของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วก่อนและ OLP กระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่ง

ชื่อกรดไขมัน	สูตรโมเลกุล	องค์ประกอบ UPO ก่อนทำปฏิกิริยา (%)	องค์ประกอบ OLP (%)
Caprylic	C8: 0	0.080	0
Capric	C10: 0	0.015	0.832
Lauric	C12: 0	0.190	0.355
Myristic	C14: 0	0.907	0.351
Palmitic	C16: 0	36.956	2.715
palmitoleic	C16: 1	0.489	0
Stearic	C18:0	4.557	0.280
Oleic	C18: 1	43.074	0.323
Linoleic	C18: 2	10.421	0
Linolenic	C18: 3	0.206	0
Arachidic	C20: 0	0.375	0
Heneicosylic	C20: 1	0.243	0
Behenic	C22: 0	0.057	1.105
Erucic	C22: 1	0.026	0.369
Lignoceric	C24: 0	0.075	0
Nervonic	C24: 1	0.020	0

4.5 การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก

น้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็กมีองค์ประกอบหลักเป็นกรดไขมันชนิด Plametic Acid (C16:0), Linoleic Acid (C18:2) และ Linolenic Acid (C18:3) ดังแสดงในตารางที่ 4-15 ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการนำมาพัฒนาเป็นพลังงานเชื้อเพลิง งานวิจัยนี้ใช้น้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็กมาศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีน โดยน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็กที่นำมาศึกษาถูกสกัดด้วยวิธี Ultrasonic โดยใช้ Acetone เป็นตัวทำละลาย ศึกษาที่สภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาการคะตะไลติกแครกกิ่งจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ ซึ่งได้สภาวะที่เหมาะสมเป็นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัม และความเร็วปฏิภูมิ 22.50 ต่อชั่วโมง แต่เนื่องจากน้ำมันสาหร่ายมีปริมาณน้อยจึงใช้น้ำมันสาหร่ายเริ่มต้นเพียงแค่ 5 กรัม ในขณะที่น้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้ 15 กรัม ดังนั้น จึงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการศึกษาน้ำมัน

สาหร่ายในสัดส่วนเดียวกันกับน้ำมันปาล์มรีไฟน์ที่อัตราส่วนน้ำมันต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 7.5 คือ น้ำมันสาหร่ายเริ่มต้น 5 กรัม ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.67 กรัม ซึ่งร้อยละผลได้ของ OLP และผลการวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนที่ประกอบด้วย Isooctane, Benzene, Toluene, p-Xylene, m-Xylene, o-Xylene และ Ethyl benzene แสดงดังตารางตารางที่ 4-16 และ ตารางที่ 4-17 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าร้อยละผลได้ของ OLP จะไม่สูงมากเมื่อเทียบกับน้ำมันปาล์มรีไฟน์ แต่ร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนที่ปรากฏนั้นสูงถึงร้อยละ 6.45 ในขณะที่ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน ของน้ำมันปาล์มรีไฟน์อยู่ที่ 5.86 แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก ดังแสดงในตารางที่ 4-18 และแสดงดังภาพประกอบที่ 4-17

ตารางที่ 4-15 แสดงองค์ประกอบ C_8 - C_{24} ของน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็ก สายพันธุ์ *Chlorella sp.*

(Georgi et al. 2007)

ชื่อกรดไขมัน	สูตรโมเลกุล	องค์ประกอบของน้ำมันสาหร่าย (%)
Myristic	C14: 0	9
Palmitic	C16: 0	25
Hexadecadienoic	C16: 2	10
Hexadecatrienoic	C16: 3	9
Stearic	C18:0	0.9
Oleic	C18: 1	5
Linoleic	C18: 2	20
Linolenic	C18: 3	19

ตารางที่ 4-16 แสดงสภาวะที่ใช้ทดลองและร้อยละผลได้ของ OLP จากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ้งน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก

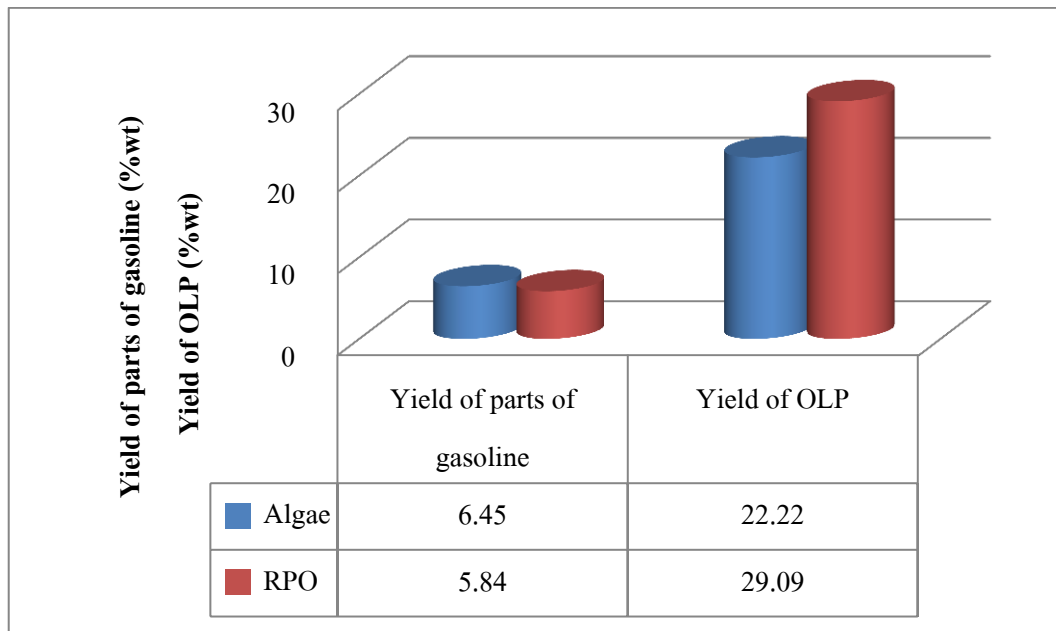
Temperature ($^{\circ}$ C)	Catalyst (g)	Yield of OLP (% wt)
500	0.67	22.22

ตารางที่ 4-17 แสดงร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก

Iso-octane, C ₈ (g)	Benzene, C ₆ (g)	Toluene, C ₇ (g)	p-Xylene, C ₈ (g)	m-Xylene, C ₈ (g)	o-Xylene, C ₈ (g)	Ethyl benzene, C ₈ (g)	Total (g)	Yield of parts of gasoline (%wt)	Yield of OLP (%wt)
0	0.08	0.19	0	0.05	0	6.18 E-03	0.32	6.45	22.22

ตารางที่ 4-18 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนของน้ำมันปาล์มรีไฟน์และน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก

Oil	Iso octane, C ₈ (g)	Ben zene, C ₆ (g)	Tolu ene, C ₇ (g)	p-Xy lene, C ₈ (g)	m-Xy lene, C ₈ (g)	o-Xy lene, C ₈ (g)	Ethyl ben zene, C ₈ (g)	Total (g)	Yield of parts of gasoline (%wt)	Yield of OLP (%wt)
RPO	17.04E-03	0.22	0.49	5.69 E-03	0.02	0.08	0.05	0.88	5.84	29.09
Algae	0	0.08	0.19	0	0.05	0	6.18 E-03	0.32	6.45	22.22



ภาพประกอบที่ 4-17 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของ OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนของน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันปาล์มรีไฟน์

4.6 การควบคุมสารของการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากระบวนการคะตะไลติกแครกกิง

การควบคุม (Material balance) เป็นหลักการพื้นฐานสำหรับกระบวนการทางวิศวกรรมเคมี เพื่อการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการควบคุมของการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันผ่านกระบวนการคะตะไลติกแครกกิงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยของเหลวอินทรีย์ น้ำ แก๊ส น้ำมันตกค้าง (Residue) และ ส่วนที่ไม่สามารถระบุได้ (Unidentified)

4.6.1 การผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์

ทำการควบคุมสารในการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลิตไบโอแก๊สโซลีนโดยกระบวนการคะตะไลติกแครกกิงของน้ำมันปาล์มรีไฟน์

ตารางที่ 4-19 แสดงให้เห็นได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ค่าร้อยละผลได้ของ OLP มากที่สุดคือที่ 2 กรัม และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น แนวโน้มของร้อยละผลได้ของ OLP เริ่มมีแนวโน้มลดลง และมีแนวโน้มที่เกิดเป็นกำขามากขึ้น นั่นแสดงให้เห็นว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากส่งผลให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนได้มากขึ้น และให้ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นโซ่สั้นๆมากกว่าไฮโดรคาร์บอนในช่วงของแก๊สโซลีน ตารางที่ 4-20 แสดงถึงการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นตั้งแต่ 450-500 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของ OLP ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 550 องศาเซลเซียสส่งผลให้ร้อยละผลได้ของ OLP ลดลง และการแตกตัวเกิดเป็นกำขามากขึ้น ซึ่งในการควบคุมของการคะตะไลติกแครกกิงของน้ำมัน

ปาล์มรีไฟน์ ให้ร้อยละผลได้ของ OLP อยู่ในช่วงร้อยละ 24.45-29.08 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของน้ำ ในช่วง 1.55-12.01 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของก๊าซในช่วง 45.60-61.60 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของ ส่วนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ในช่วง 9.31-22.95 ซึ่งในส่วนนี้อาจรวมถึงโค้ก (Coke) ที่เกิดขึ้นและเกาะ บนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย ซึ่งงานวิจัยนี้ไม่ได้วิเคราะห์อย่างละเอียด และไม่มีร้อยละผลได้ของน้ำมันตกค้าง ในการทดลอง เนื่องจากดำเนินการที่อุณหภูมิที่น้ำมันสามารถระเหยกลายเป็นไอ เกิดปฏิกิริยาและ เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ทั้งหมด

ตารางที่ 4-19 แสดงการควบคุมผลจากกระบวนการคละตะไลติกแครกกิ่งจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ในการหา ตัวเร่งปฏิกิริยาและความเร็วปฏิกิริยาที่เหมาะสม

Temperature (°C)	WHSV (h ⁻¹)	Catalyst (g)	Yield of OLP (%wt)	Yield of water (%wt)	Yield of residue (%wt)	Yield of gas (%wt)	Yield of unidentified (%wt)
550	22.50	2	27.72	1.55	0	53.60	17.13
550	15.00	3	25.08	4.54	0	59.60	10.78
550	11.25	4	25.37	1.74	0	61.60	11.29

ตารางที่ 4-20 แสดงการควบคุมผลจากกระบวนการคละตะไลติกแครกกิ่งจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ในการหา อุณหภูมิที่เหมาะสม

Temperature (°C)	WHSV (h ⁻¹)	Catalyst (g)	Yield of OLP (%wt)	Yield of water (%wt)	Yield of residue (%wt)	Yield of gas (%wt)	Yield of unidentified (%wt)
450	22.50	2	24.45	7	0	45.60	22.95
500	22.50	2	29.08	12.01	0	49.60	9.31
550	22.50	2	27.72	1.55	0	53.60	17.13

4.6.2 การผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว

ทำการควบคุมในการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 กรัม ให้ค่าร้อยละผลได้ของ OLP สูงสุด ให้ร้อยละผลได้ของน้ำและก๊าซต่ำสุด จากตารางที่ 4-21 จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่า 3 กรัม จะให้ค่าร้อยละผลได้น้อยกว่า แต่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูงกว่า 4 กรัม จะให้ค่าร้อยละผลได้ของ OLP ลดลง และให้ผลได้ของก๊าซมากขึ้น เนื่องจากเกิดการแตกตัวมากขึ้น และจากตารางที่ 4-22 จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้น จะให้ค่าร้อยละผลได้ของ OLP สูงขึ้น และที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสให้ค่าร้อยละผลได้ของ OLP สูงสุดที่ร้อยละ 37.37 โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วนั้นเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่าน้ำมันปาล์มรีไฟน์ เนื่องจากความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มรีไฟน์แล้วมีมากกว่า แต่ร้อยละผลได้ของ OLP หลังการคละตะไคติกแครกกิ่งนั้นให้ค่าสูงกว่าน้ำมันปาล์มรีไฟน์ เนื่องจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว มีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่าทำให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนได้ดีกว่า ซึ่งจากการควบคุมของการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วให้ร้อยละผลได้ของ OLP ในช่วง 22.13-37.37 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของน้ำในช่วง 5.26-11.80 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของก๊าซในช่วง 46.80-60.30 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของส่วนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ในช่วง 5.63-11.58 โดยน้ำหนัก ซึ่งอาจรวมถึง โคล์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาและก๊าซที่ไม่สามารถเก็บได้ทั้งหมด และไม่มีร้อยละผลได้ของน้ำมันตกค้างเนื่องจากน้ำมันสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ทั้งหมด

ตารางที่ 4-21 แสดงการควบคุมจากกระบวนการคละตะไคติกแครกกิ่งจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วในการหาตัวเร่งปฏิกิริยาและความเร็วปฏิกิริยาที่เหมาะสม

Temperature (°C)	WHSV (h ⁻¹)	Catalyst (g)	Yield of OLP (%wt)	Yield of water (%wt)	Yield of residue (%wt)	Yield of gas (%wt)	Yield of unidentified (%wt)
550	22.50	2	27.74	7.21	0	57.30	7.75
550	15.00	3	37.37	5.26	0	51.30	6.07
550	11.25	4	27.46	6.61	0	60.30	5.63

ตารางที่ 4-22 แสดงการควบคุมผลจากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่งจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วในการหาอุณหภูมิที่เหมาะสม

Temperature (°C)	WHSV (h ⁻¹)	Catalyst (g)	Yield of OLP (%wt)	Yield of water (%wt)	Yield of residue (%wt)	Yield of gas (%wt)	Yield of unidentified (%wt)
450	15	3	22.13	5.99	0	60.30	11.58
500	15	3	30.25	11.80	0	46.80	11.15
550	15	3	37.37	5.26	0	51.3	6.07

4.7 การวิเคราะห์แก๊สในของเหลวอินทรีย์

จากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่งนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาหลังจากกระบวนการประกอบไปด้วยหลายส่วน ซึ่งได้แก่ ของเหลวอินทรีย์ น้ำ ไค้ก และก๊าซ ซึ่งในการทดลองนี้ได้นำตัวอย่างก๊าซที่ได้จากการเก็บระหว่างการทดลองในกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่งของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ที่สภาวะที่เหมาะสม คือที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัม ไปวิเคราะห์องค์ประกอบภายในแก๊สโดยใช้เครื่องมือ Gas chromatography with thermal conductivity detector (GC-TCD) ภายใต้สารมาตรฐาน 3 ชนิด ได้แก่ ก๊าซมาตรฐานไนโตรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซสารมาตรฐานมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซมาตรฐานคาร์บอนไดออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดัง

ตารางที่ 4-23 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ก๊าซที่ได้หลังจากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่งประกอบด้วยก๊าซมีเทน 18.68 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5.9 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าหลังจากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่ง ไฮโดรคาร์บอนสามารถแตกตัวออกกลายเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลเล็กลงและมีโอกาสเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในช่วง C₁-C₄ ที่น้อยกว่าช่วงของแก๊สโซลีนได้ และอาจเกิดการรวมตัวกับออกซิเจนระหว่างปฏิกิริยา ทำให้เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ปรากฏไม่มากนักเนื่องจากป้อนก๊าซไนโตรเจนในระบบ สำหรับก๊าซไนโตรเจนมากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ที่มีค่ามากกว่าปริมาณก๊าซมาตรฐานในการวิเคราะห์ GC-TCD ซึ่งในระบบได้ใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพาของปฏิกิริยาทำให้มีปริมาณก๊าซไนโตรเจนสูง

ตารางที่ 4-23 แสดงผลการวิเคราะห์ก๊าซไนโตรเจน มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซหลังการคะตะไลติกแครกกิ่งของน้ำมันปาล์มรีไฟน์

Nitrogen Concentration, %	Methane Concentration, %	Carbon dioxide Concentration, %
More than 5 %	18.68	5.9

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุป

จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธี FT-IR ได้ลักษณะกราฟที่แสดงหมู่ฟังก์ชันที่ใกล้เคียงกับหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา Zeolite ชนิด H-ZSM-5 และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นพบว่า กราฟที่ได้ใกล้เคียงกับกราฟของตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 ของงานวิจัยอื่นๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 ในการศึกษาการผลิต ไบโอดีเซลโซลีนด้วยกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่ง

จากการศึกษาช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองด้วยเครื่อง TGA โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ น้ำมันปาล์มรีไฟน์ น้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว และน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็ก พบว่า การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักน้ำมันปาล์มรีไฟน์ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยการให้ความร้อนในช่วง 50-800 องศาเซลเซียส น้ำมันปาล์มรีไฟน์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิ 450-550 องศาเซลเซียส ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิตั้งแต่ 350-500 องศาเซลเซียส และสำหรับน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กเริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิ 300-550 องศาเซลเซียส จากนั้นกราฟคงที่และไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักน้ำมัน จากผลการทดลองดังกล่าว จึงเลือกช่วงอุณหภูมิสำหรับการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโซลีนด้วยกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่งตั้งแต่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส

จากนั้นทำการศึกษาช่วงสภาวะที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอดีเซลโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ โดยใช้โปรแกรม RSM ช่วยในการออกแบบการทดลอง ได้การทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง โดยตัวแปรที่ป้อนให้กับโปรแกรม RSM ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 400-550 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ 1-5 กรัม และอัตราการไหลของไนโตรเจน 10-20 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการทดลองและคำนวณจากโปรแกรม RSM พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการคะตะไลติกแครกกิ่งของน้ำมันปาล์มรีไฟน์โดยตรง ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิ ในขณะที่อัตราการไหลของไนโตรเจนมีผลต่อการคะตะไลติกแครกกิ่งน้อยมาก และเมื่อคำนวณหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลโซลีนจาก

น้ำมันปาล์มรีไฟน์โดยใช้โปรแกรม RSM พิจารณาจากร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์ (%Yield of OLP) พบว่าที่อุณหภูมิ 497.3 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 3.96 กรัม ให้ร้อยละผลได้ของเหลวอินทรีย์ เป็น 26.65 โดยน้ำหนัก ตามการคำนวณจากสมการ $Y_{OLP} = -206.55 + 1.245X_1 - 11.35X_3 - 0.00136X_1^2 - 0.308X_3^2 + 0.02773X_1X_3$ ซึ่งจากผลการทดลองและคำนวณดังกล่าว จึงได้มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ อัตราการไหลของไนโตรเจนต่อการคะตะไลติกแครกกิ่งพบว่า ที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 5 มิลลิลิตรต่อนาทีให้ประสิทธิภาพของการเกิดร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์ดีที่สุด จึงใช้อัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 5 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นอัตราการไหลของไนโตรเจนคงที่ตลอดการทดลอง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิและอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นของเบนซินและไอโซออกเทนใน OLP ซึ่งผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของเบนซินมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิไม่มีผลต่อความเข้มข้นของไอโซออกเทนในช่วงอุณหภูมิ 400-475 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 550 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของไอโซออกเทน มีแนวโน้มลดลง การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1 กรัมเป็น 3 กรัม ทำให้ความเข้มข้นของเบนซินเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูงถึง 5 กรัมทำให้ความเข้มข้นของเบนซินลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของไอโซออกเทนแปรผกผันกับน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเลือกช่วงสภาวะที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนที่ให้ค่าร้อยละผลได้ของ OLP มากที่สุด และทำให้ความเข้มข้นของเบนซินและไอโซออกเทนอยู่ในเกณฑ์ที่ดี เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีน โดยเลือกให้ครอบคลุมสภาวะที่เหมาะสมที่คำนวณได้จากโปรแกรม RSM คือ ศึกษาช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 450-550 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 2-4 กรัม อัตราการไหลของไนโตรเจน คงที่ที่ 5 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ค่าความเร็วปริภูมิในช่วง 11.25-22.50 ต่อชั่วโมง และพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมจากร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีน ซึ่งได้จากการนำตัวอย่างของเหลวอินทรีย์ไปวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วย GC-FID ผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัม และความเร็วปริภูมิ 22.50 ต่อชั่วโมง ให้ค่าร้อยละผลได้ของ OLP สูงสุดที่ร้อยละ 29.09 โดยน้ำหนัก และให้ร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนสูงสุดที่ร้อยละ 5.84 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ได้มีการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช่แล้วและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับสภาพเพื่อกลับมาใช้ใหม่ ศึกษาที่สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช่แล้วให้ค่าร้อยละผลได้ของ OLP เป็น 22.10 โดยน้ำหนักและให้ร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนร้อยละ 2.03 โดยน้ำหนัก ในขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับสภาพเพื่อกลับมาใช้ใหม่ ให้ร้อยละผลได้ของ OLP

เป็นร้อยละ 24.03 และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนเป็นร้อยละ 5.31 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่สามารถทำได้และให้ผลใกล้เคียงกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 ใหม่

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนด้วยกระบวนการคละตะไลดิกแครกกิ่งด้วยน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว โดยศึกษาช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 450-550 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 2-4 กรัม อัตราการไหลของไนโตรเจนคงที่ที่ 5 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ค่าความเร็วปฏิกิริยาในช่วง 11.25-22.50 ต่อชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 กรัม และความเร็วปฏิกิริยา 15 ต่อชั่วโมง ให้ค่าร้อยละผลได้ของ OLP เป็นร้อยละ 37.37 โดยน้ำหนัก และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนสูงสุดเป็นร้อยละ 6.20 โดยน้ำหนัก ซึ่งที่สภาวะนี้แสดงค่าของเหลวอินทรีย์ที่สูงสุดของงานวิจัยนี้ และให้สภาพการเลือกเกิดเป็นแก๊สโซลีนที่สูงกว่าการผลิตไบโอแก๊สโซลีนด้วยกระบวนการคละตะไลดิกแครกกิ่งจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ที่สภาวะที่เหมาะสม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้น้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วให้ประสิทธิภาพการแตกตัวเป็นไบโอแก๊สโซลีนที่ดี

จากการศึกษาการผลิตไบโอแก๊สโซลีนด้วยน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็กที่สภาวะที่เหมาะสมจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ ที่อัตราส่วนน้ำมันต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 7.5 คือ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.67 กรัมต่อน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก 5 กรัม ให้ผลได้ของ OLP ร้อยละ 22.22 โดยน้ำหนัก และให้ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน 6.45 โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันปาล์มรีไฟน์นั้น แม้ว่าร้อยละผลได้ของ OLP จะน้อยกว่าร้อยละผลได้จากน้ำมันปาล์มรีไฟน์แต่สำหรับร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนนั้นสูงกว่า แสดงให้เห็นว่าน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็กมีความเป็นไปได้และมีแนวโน้มที่ดีในการนำไปศึกษาและพัฒนาการผลิตไบโอแก๊สโซลีน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้ เมื่อทำการเตรียมเรียบร้อยแล้ว ควรเก็บไว้ในโถสุญญากาศ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีความสามารถในการจับน้ำก่อนข้างสูง

ถังปฏิกรณ์ (Reactor)

ควรทำความสะอาดถังปฏิกรณ์ และเผาด้วยอุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียสประมาณ 20-30 นาทีทุกครั้งก่อนการใช้งานเพื่อความแม่นยำในการทดลอง เนื่องจากอาจยังมีน้ำมันเหลืออยู่จากการทดลองและส่งผลกระทบต่อการทำงานของน้ำมันในครั้งต่อไป นอกจากนี้ควรปรับปรุงชุดอุปกรณ์สำหรับการคะตะไลติกแครกกิ่งเพื่อพัฒนาให้สามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวอินทรีย์ที่มากขึ้น

ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ (OLP)

การเก็บตัวอย่างของเหลวอินทรีย์ควรเก็บไว้ในห้องแช่เย็น เพื่อป้องกันการระเหยของสารอินทรีย์ และควรนำตัวอย่างไปฉีด GC-FID ให้เร็วที่สุด ไม่ควรเก็บตัวอย่างไว้เกินสองวัน

แก๊สโซลีน

งานวิจัยฉบับนี้ได้คำนวณหาแก๊สโซลีนอย่างคร่าวๆจากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของ Benzene, Isooctane, Toluene, p-xylene, m-xylene, o-xylene และ Ethyl benzene ซึ่งเป็นสารที่มีความสำคัญและเป็นสารหลักในไบโอแก๊สโซลีนที่ทำให้ค่าออกเทนัมเบอร์ในแก๊สโซลีนเพิ่มขึ้น แต่ยังมีสารอื่นๆที่เป็นองค์ประกอบในแก๊สโซลีนนอกเหนือจากสารที่ทำการวิเคราะห์เหล่านี้ด้วย

บรรณานุกรม

- ณัฐกฤตต์ เพชรนะ. (2554) ไบโอดีเซลจากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิงของน้ำมันปาล์มรีไฟน์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- มาลี สันติคุณาภรณ์, ชาญณรงค์ อัสวเทศานุกาพ. (2553) การปรับปรุงค่าออกเทนของแก๊สโซลีนด้วยปฏิกิริยาต่อเนื่องสองขั้นตอน: ตอนที่ 1 การใช้โทลูอิน-เมทิลไซโคเฮกเซนเป็นสารตั้งต้น. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 18 (4).
- สถิติพลังงานของประเทศไทยปี 2555. กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน บุญรอด วงษ์สว่าง. เลขออกเทน. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.promma.ac.th/main/chemistry/boonrawd_site/octane_no.htm. (วันที่ค้นข้อมูล: 1 ธันวาคม 2554)
- น้ำมัน (Gasoline)-แหล่งพลังงานของมนุษยชาติ. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://student.nu.ac.th/science/nature/%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3%E0%B8%A1%E0%B8%B1%E0%B8%99.htm>. (วันที่ค้นข้อมูล: 10 ธันวาคม 2554)
- ปิโตรเลียมและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.northeducation.ac.th/elearning/ed_sc30/chap_04/sc4120.html. (วันที่ค้นข้อมูล: 1 ธันวาคม 2554)
- เลขออกเทนและเลขซีเทน. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic8/octane.html>. (วันที่ค้นข้อมูล: 1 ธันวาคม 2554)
- G.D Hobson, Wiley. (1984) Modern Petroleum Technology. 5th Edition Part II. page 786.
- G. Ramya, R.sudhakar, J. Amala Infant Joice, R. Ramakrishman, T. sivakumar. Liquid hydrocarbon fuels from jatropha oil through catalytic cracking technology using AIMCM-41/ZSM-5 composite catalyts. (2012) Applied Catalysis A: General. 433-434: 170-178.

- G. Ciobanu, D. Ignat, G. Carja, S. Ratoi, C. Luca. (2008) Zinc - Modified Forms of Zeolites by Wet Impregnation Method. Chem. Bull. "POLITEHNICA" Univ. Volume 53(67): 1-2.
- Georgi Petkov, Guillermo Garcia. (2007) Which are fatty acids of the green alga *Chlorella*. Biochemical Systematics and Ecology. 35: 281-285.
- Hong Li, Benxian Shen, J.C. Kabalu, Mominou Nchare. (2009) Enhancing the production of biofuels from cottonseed oil by fixed-fluidized bed catalytic cracking. Renewable Energy. 34: 1033–1039.
- Ivan Yared, Hengky Kurniawan, Nico Wibisono, Yohanes Sudaryanto, Herman Hindarso and Suryadi Ismadji. (2008) Modeling of liquid hydrocarbon fuel production from oil via catalytic cracking using MCM-41 as catalyst. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. Volume 3. Number 2.
- Malik Musthofa, Ainul Hakimah Karim, Nurrulhidayah Ahmad Fadzillaha, Nur Hazirah Rozali Annuar, Aishah Abdul Jalil, Sugeng Triwahyono. (2010) Determination of Lewis and Brønsted acid sites by gas flow-injection technique. Journal of Fundamental Sciences Volume 6. Number 2: 127-131.
- Niken T, Abdul R.M., Subhash B. (2010) Deactivation and coke combustion studies of nanocrystalline zeolite beta in catalytic cracking of used palm oil. Chemical Engineering Journal. 163: 413-421.
- Noah I. Tracy, Daniel W. Crunkleton. (2011) Geoffrey L. Price Catalytic cracking of squalene to gasoline-range molecules. Biomass and bioenergy 35: 1060-1065.
- Pramila Tamunaidu, Subhash Bhatia. (2007) Catalytic cracking of palm oil for the production of biofuels : Optimization studies. Bioresource Technology. 98: 3593–3601.

S.M. Sadrameli, Alex E.S. Green, Wayne Seames. (2009) Modeling representations of canola oil catalytic cracking for the production of renewable aromatic hydrocarbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 86: 1–7.

Thiam L.C., Subhash B. (2009) Effect of catalyst additives on the production of biofuels from palm oil cracking in a transport riser. *Bioresource Technology*. 100: 2540-2545.

Catalytic Cracking. *The Best Science, Technology, & Medical eBook*. Available online: <http://www.crcnetbase.com/doi/pdfplus/10.1201/9780824742119.ch15>. 12 January 2012.

Palm oil property. Available online: <http://www.chempro.in/palmoilproperties.htm>. 30 November 2013.

ZSM-5. Available online: <http://beling.net/articles/about/ZSM-5>. 20 January 2012.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบ

ตาราง ก-1 แสดงข้อมูลดิบร้อยละผลได้ของ OLP จากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่งจากโปรแกรม RSM น้ำมันปาล์มรีไฟน์

Temperature (°C)	N ₂ flow rate (ml/min)	Catalyst weight (g)	Weight of OLP (g)	Yield of OLP (% wt)
550	20	3	3.292	21.95
550	10	3	3.307	22.05
400	10	3	2.283	15.22
475	15	3	4.086	27.24
475	10	1	3.520	23.47
550	15	1	2.401	16.01
475	10	5	3.799	25.19
475	15	3	3.964	26.43
475	20	5	4.035	26.90
475	20	1	3.745	24.97
400	15	1	3.102	20.68
475	15	3	3.750	25.00
400	20	3	2.337	15.58
550	15	5	3.342	22.28
400	15	5	1.547	10.31
475	15	3	3.930	26.20

ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไนโตรเจน 15 มิลลิลิตรต่อนาที และตัวเร่งปฏิกิริยา 5 กรัม ร้อยละผลได้ของ OLP = ((1.547)/(15)) x 100% = 10.31 % โดยน้ำหนัก

ตาราง ก-2 แสดงข้อมูลดิบร้อยละผลได้ของ OLP ร้อยละผลได้ของน้ำ ร้อยละผลได้ของน้ำมันตกค้าง ร้อยละผลได้ของก๊าซ และ ร้อยละผลได้ของส่วนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ จากกระบวนการคละไคติกแครกกิงจาก โปรแกรม RSM น้ำมันปาล์มรีไฟน์

T (°C)	N ₂ (ml/min)	C (g)	W _{OLP} (g)	Y _{OLP} (% by weight)	W _{H2O} (g)	Y _{H2O} (% by weight)	R (g)	Y _R (% by weight)	W _G (g)	Y _G (% by weight)	Y _{Un} (% by weight)
550	20	3	3.29	21.95	0.93	6.23	0	0	9.36	62.40	9.42
550	10	3	3.31	22.05	1.16	7.71	0	0	8.88	59.20	11.04
400	10	3	2.28	15.22	1.02	6.77	5.57	37.17	5.88	39.20	1.65
475	15	3	4.09	27.24	0.64	4.23	0	0	7.92	52.80	15.73
475	10	1	3.52	23.47	1.21	8.08	0	0	8.28	55.20	13.25
550	15	1	2.40	16.01	1.01	6.73	0	0	10.32	68.80	8.467
475	10	5	3.79	25.19	1.29	8.59	0	0	8.28	55.20	11.02
475	15	3	3.96	26.43	0.59	3.91	0	0	9.72	64.80	4.86
475	20	5	4.04	26.9	1.66	11.06	0	0	7.56	50.40	11.64
475	20	1	3.75	24.97	0.5	3.33	0	0	6.96	46.40	25.30

T (°C)	N ₂ (ml/min)	C (g)	W _{OLP} (g)	Y _{OLP} (% by weight)	W _{H₂O} (g)	Y _{H₂O} (% by weight)	R (g)	Y _R (% by weight)	W _G (g)	Y _G (% by weight)	Y _{Un} (% by weight)
400	15	1	3.10	20.68	0.24	1.59	5.4	36	4.92	32.80	8.93
475	15	3	3.75	25	2.06	13.77	0	0	7.32	48.80	12.43
400	20	3	2.34	15.58	1.12	7.43	6.11	40.74	4.56	30.40	5.85
550	15	5	3.34	22.28	1.16	7.75	0	0	9.12	60.80	9.17
400	15	5	1.55	10.31	1.26	8.39	6.52	43.46	4.92	32.80	5.04
475	15	3	3.93	26.20	0.89	5.85	0	0	9.72	64.80	3.15

โดย T = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) N₂ = อัตราการไหลของไนโตรเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)

C = ตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม) W_{OLP} = น้ำหนักของของเหลวอินทรีย์ (กรัม)

Y_{OLP} = ร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์ (% โดยน้ำหนัก)

W_{H₂O} = น้ำหนักของน้ำ (กรัม) Y_{H₂O} = ร้อยละผลได้ของน้ำ (% โดยน้ำหนัก)

R = น้ำหนักของน้ำมันตกค้าง (กรัม) Y_R = ร้อยละผลได้ของน้ำมันตกค้าง (% โดยน้ำหนัก)

W_G = น้ำหนักของก๊าซ (กรัม) Y_G = ร้อยละผลได้ของก๊าซ (% โดยน้ำหนัก)

Y_{Un} = ร้อยละผลได้ของส่วนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ (% โดยน้ำหนัก)

ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละผลได้ของ OLP ร้อยละผลได้ของน้ำ ร้อยละน้ำมันตกล้าง ร้อยละผลได้ของก๊าซ และร้อยละส่วนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไนโตรเจน 15 มิลลิลิตรต่อนาที และตัวเร่งปฏิกิริยา 5 กรัม

$$\text{ร้อยละผลได้ของ OLP} = ((1.55)/(15)) \times 100\% = 10.31 \% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของน้ำ} = ((1.26)/(15)) \times 100\% = 8.39 \% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

$$\text{ร้อยละน้ำมันตกล้าง} = ((6.519)/(15)) \times 100\% = 43.46 \% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของแก๊ส} = ((4.92)/(15)) \times 100\% = 32.80 \% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

$$\text{ร้อยละส่วนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้} = 100\% - (10.31+8.39+43.46+32.80)\% = 5.04 \% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

ตาราง ก-3 แสดงข้อมูลคิปร้อยละผลได้ของ OLP จากกระบวนการคละไลดิกแครกกิ่งน้ำมันปาล์มรีไฟน์ในการหาตัวเร่งปฏิกิริยาและความเร็วปฏิกิริยาที่เหมาะสม

Temperature (°C)	WHSV (h ⁻¹)	Catalyst weight (g)	Weight of OLP (g)	Yield of OLP (% by weight)
550	22.50	2	4.158	27.72
550	15	3	3.762	25.08
550	11.25	4	3.805	25.37

ตาราง ก-4 แสดงข้อมูลคิปร้อยละผลได้ของ OLP จากกระบวนการคละไลดิกแครกกิ่งน้ำมันปาล์มรีไฟน์ในการหาอุณหภูมิที่เหมาะสม

Temperature (°C)	WHSV (h ⁻¹)	Catalyst weight (g)	Weight of OLP (g)	Yield of OLP (% by weight)
450	22.50	2	3.667	24.45
500	22.50	2	4.363	29.08
550	22.50	2	4.158	27.72

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความเร็วปฏิกิริยา (WHSV, h⁻¹) ที่ปริมาณน้ำมันปาล์มรีไฟน์ 15 กรัมและตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัม ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 20 นาที

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วปฏิกิริยา} &= (\text{น้ำมัน 15 กรัม} / \text{ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัม}) / \text{เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 20 นาที} \\ &= 0.375 \text{ นาที} \times (60 \text{ นาที} / 1 \text{ ชั่วโมง}) \\ &= 22.50 \text{ ต่อชั่วโมง} \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยผลได้ของ OLP ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ความเร็วปฏิกิริยา 22.50 ต่อชั่วโมง และตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัม

$$\text{ร้อยละผลได้ของ OLP} = ((4.158)/(15)) \times 100\% = 27.72 \% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

ตาราง ก-5 แสดงข้อมูลคิปร้อยละผลได้ของ OLP ร้อยละผลได้ของน้ำ ร้อยละผลได้ของน้ำมันตกค้าง ร้อยละผลได้ของก๊าซ และร้อยละผลได้ของส่วนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ จากกระบวนการคละไลติกแครกกิ้งจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ในการหาตัวเร่งปฏิกิริยาและความเร็วปฏิกิริยาที่เหมาะสม

T (°C)	WHSV (h ⁻¹)	C (g)	W _{OLP} (g)	Y _{OLP} (% by weight)	W _{H2O} (g)	Y _{H2O} (% by weight)	R (g)	Y _R (% by weight)	W _G (g)	Y _G (% by weight)	Y _{Un} (% by weight)
550	22.50	2	4.16	27.72	0.23	1.55	0	0	8.04	53.6	17.13
550	15	3	3.76	25.08	0.68	4.54	0	0	8.94	59.6	10.78
550	11.25	4	3.81	25.37	0.26	1.74	0	0	9.24	61.6	11.29

ตาราง ก-6 แสดงข้อมูลคิปร้อยละผลได้ของ OLP ร้อยละผลได้ของน้ำ ร้อยละผลได้ของน้ำมันตกค้าง ร้อยละผลได้ของก๊าซ และร้อยละผลได้ของส่วนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ จากกระบวนการคละไลติกแครกกิ้งจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ในการหาอุณหภูมิที่เหมาะสม

T (°C)	WHSV (h ⁻¹)	C (g)	W _{OLP} (g)	Y _{OLP} (% by weight)	W _{H2O} (g)	Y _{H2O} (% by weight)	R (g)	Y _R (% by weight)	W _G (g)	Y _G (% by weight)	Y _{Un} (% by weight)
450	22.50	2	3.67	24.45	1.05	7.00	0	0	6.84	45.6	22.95
500	22.50	2	4.36	29.08	1.801	12.01	0	0	7.44	49.6	9.31
550	22.50	2	4.16	27.72	0.232	1.55	0	0	8.04	53.6	17.13

- โดย T = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
 WHSV = ความเร็วปฏิกิริยา (ต่อชั่วโมง)
 C = ตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)
 W_{OLP} = น้ำหนักของของเหลวอินทรีย์ (กรัม)
 Y_{OLP} = ร้อยละผลได้ของ OLP (% โดยน้ำหนัก)
 W_{H_2O} = น้ำหนักของน้ำ (กรัม)
 Y_{H_2O} = ร้อยละผลได้ของน้ำ (% โดยน้ำหนัก)
 R = น้ำหนักของน้ำมันตกค้าง (กรัม)
 Y_R = ร้อยละผลได้ของน้ำมันตกค้าง (% โดยน้ำหนัก)
 W_G = น้ำหนักของก๊าซ (กรัม)
 Y_G = ร้อยละผลได้ของก๊าซ (% โดยน้ำหนัก)
 Y_{Un} = ร้อยละผลได้ของส่วนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ (% โดยน้ำหนัก)

ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละผลได้ของ OLP ร้อยละผลได้ของน้ำ ร้อยละน้ำมันตกค้าง ร้อยละผลได้ของก๊าซ และร้อยละส่วนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความเร็วปฏิกิริยา 22.50 ต่อชั่วโมง และตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัม

$$\text{ร้อยละผลได้ของ OLP} = ((3.66)/(15)) \times 100\% = 24.45 \% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของน้ำ} = ((1.05)/(15)) \times 100\% = 7.00 \% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

$$\text{ร้อยละน้ำมันตกค้าง} = ((0)/(15)) \times 100\% = 0 \% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของก๊าซ} = ((6.84)/(15)) \times 100\% = 45.6 \% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

$$\text{ร้อยละส่วนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้} = 100\% - (24.45+7.00+0+45.6)\% = 22.90 \% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

ตาราง ก- 7 แสดงข้อมูลดิบร้อยละผลได้ของ OLP จากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่งน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วในการหาตัวเร่งปฏิกิริยาและความเร็วปฏิกิริยาที่เหมาะสม

Temperature (°C)	WHSV (h ⁻¹)	Catalyst weight (g)	Weight of OLP (g)	Yield of OLP (% by weight)
550	22.50	2	4.16	27.74
550	15	3	5.61	37.37
550	11.25	4	4.12	27.46

ตาราง ก- 8 แสดงข้อมูลดิบร้อยละผลได้ของ OLP จากกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่งน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วในการหาอุณหภูมิที่เหมาะสม

Temperature (°C)	WHSV (h ⁻¹)	Catalyst weight (g)	Weight of OLP (g)	Yield of OLP (% by weight)
450	15	3	3.32	22.13
500	15	3	4.54	30.25
550	15	3	5.61	37.37

ตาราง ก-9 แสดงข้อมูลคิปร้อยละผลได้ของ OLP ร้อยละผลได้ของน้ำ ร้อยละผลได้ของน้ำมันตกค้าง ร้อยละผลได้ของก๊าซ และร้อยละผลได้ของส่วนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ จากกระบวนการคະຕະໂລຕິកແຕຣກິງຈາກน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วในการหาตัวเร่งปฏิกิริยาและความเร็วปฏิกิริยาที่เหมาะสม

T (°C)	WHSV (h ⁻¹)	C (g)	W _{OLP} (g)	Y _{OLP} (% by weight)	W _{H2O} (g)	Y _{H2O} (% by weight)	R (g)	Y _R (% by weight)	W _G (g)	Y _G (% by weight)	Y _{Un} (% by weight)
550	11.25	2	4.16	27.74	1.08	7.21	0	0	9.05	60.30	4.75
550	15	3	5.61	37.37	0.79	5.26	0	0	7.69	51.30	6.07
550	22.50	4	4.12	27.46	0.99	6.61	0	0	9.05	60.30	5.63

ตาราง ก-10 แสดงข้อมูลคิปร้อยละผลได้ของ OLP ร้อยละผลได้ของน้ำ ร้อยละผลได้ของน้ำมันตกค้าง ร้อยละผลได้ของก๊าซ และร้อยละผลได้ของส่วนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ จากกระบวนการคະຕະໂລຕິກແຕຣກິງຈາກน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้วในการหาอุณหภูมิที่เหมาะสม

T (°C)	WHSV (h ⁻¹)	C (g)	W _{OLP} (g)	Y _{OLP} (% by weight)	W _{H2O} (g)	Y _{H2O} (% by weight)	R (g)	Y _R (% by weight)	W _G (g)	Y _G (% by weight)	Y _{Un} (% by weight)
450	15	3	3.32	22.13	0.90	5.99	0	0	9.05	60.3	11.58
500	15	3	4.54	30.25	1.77	11.80	0	0	7.02	46.8	11.15
550	15	3	5.61	37.37	0.79	5.26	0	0	7.69	51.3	6.07

- โดย T = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
 $WHSV$ = ความเร็วปฏิกิริยา (ต่อชั่วโมง)
 C = ตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)
 W_{OLP} = น้ำหนักของของเหลวอินทรีย์ (กรัม)
 Y_{OLP} = ร้อยละผลได้ของ OLP (% โดยน้ำหนัก)
 W_{H_2O} = น้ำหนักของน้ำ (กรัม)
 Y_{H_2O} = ร้อยละผลได้ของน้ำ (% โดยน้ำหนัก)
 R = น้ำหนักของน้ำมันตกค้าง (กรัม)
 Y_R = ร้อยละผลได้ของน้ำมันตกค้าง (% โดยน้ำหนัก)
 W_G = น้ำหนักของก๊าซ (กรัม)
 Y_G = ร้อยละผลได้ของก๊าซ (% โดยน้ำหนัก)
 Y_{Un} = ร้อยละผลได้ของส่วนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ (% โดยน้ำหนัก)

ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละผลได้ของของเหลวอินทรีย์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก), ร้อยละผลได้ของน้ำ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก), ร้อยละน้ำมันตกค้าง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก), ร้อยละผลได้ของแก๊ส (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก), และร้อยละส่วนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ความเร็วปฏิกิริยา 92 ต่อชั่วโมง และตัวเร่งปฏิกิริยา 3 กรัม

$$\text{ร้อยละผลได้ของ OLP} = ((5.61)/(15)) \times 100\% = 37.37\% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของน้ำ} = ((0.79)/(15)) \times 100\% = 5.26\% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

$$\text{ร้อยละน้ำมันตกค้าง} = ((0)/(15)) \times 100\% = 0\% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของก๊าซ} = ((7.69)/(15)) \times 100\% = 51.3\% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

$$\text{ร้อยละส่วนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้} = 100\% - (37.37+5.26+0+51.3)\% = 6.07\% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

ตาราง ก-11 แสดงพื้นที่และความเข้มข้นของเบนซีน (C_6) และไอโซออกเทน (C_8) ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการกะตะไลติกแครกกิ่งน้ำมันปาล์มรีไฟน์

Temperature (°C)	Catalyst weight (g)	Area C_6 (pA*s)	Area C_8 (pA*s)	Concentration C_6 (%v/v)	Concentration C_8 (%v/v)
400	3	13007.74	1688.14	0.37	0.05
400	3	11964.80	1570.65	0.34	0.05
475	3	84671.70	1272.10	5.19	0.04
475	3	73643.20	2138.52	4.30	0.07
550	3	79026.50	731.98	4.76	0.02
550	3	94631.30	32.47	5.88	1.05E-03

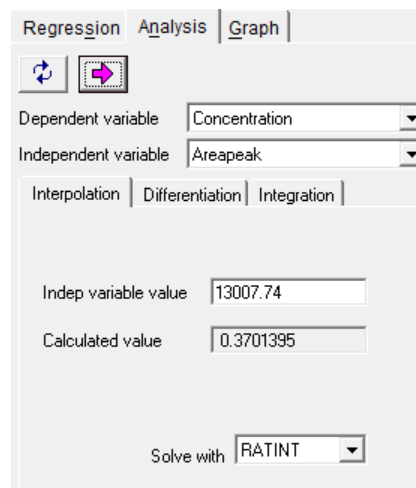
ตาราง ก-12 แสดงพื้นที่และความเข้มข้นของเบนซีน (C_6) และไอโซออกเทน (C_8) ในการศึกษาอิทธิพลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกะตะไลติกแครกกิ่งน้ำมันปาล์มรีไฟน์

Temperature (°C)	Catalyst weight (g)	Area C_6 (pA*s)	Area C_8 (pA*s)	Concentration C_6 (%v/v)	Concentration C_8 (%v/v)
475	1	61173.70	4639.59	3.04	0.15
475	1	44760.50	3363.94	1.45	0.11
475	3	40357.20	1192.18	1.20	0.04
475	3	84671.70	1272.10	5.19	0.04
475	5	155.49	5.35	4.43E-03	1.73E-04
475	5	147.70	6.95	4.66E-03	2.24E-04

ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของเบนซีนจากพื้นที่ใต้กราฟของเบนซีน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 กรัม พื้นที่ใต้กราฟของเบนซีนเป็น 13007.74 ใช้การประมาณค่าในช่วง (Interpolation) และการประมาณค่านอกช่วง (Extrapolation) โดยใช้ข้อมูลจากกราฟมาตรฐานของเบนซีนดังแสดงในตาราง ก-13 และใช้โปรแกรม Polymath software version 6.0 ในการคำนวณดังแสดงตัวอย่างในภาพประกอบที่ ก-1 จะได้ ร้อยละความเข้มข้นของเบนซีน (โดยปริมาตร) = 0.37

ตาราง ก-13 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของสารมาตรฐานเบนซีนที่ความเข้มข้นต่างๆ

Concentration (% by volume)	Area (pA*s)
0.1	3372.54
0.5	18000.30
1	35868.60
5	82048.30
10	164712
15	248788
20	329985
25	409109



ภาพประกอบที่ ก-1 แสดงตัวอย่างการแปลงพื้นที่ใต้กราฟเป็นความเข้มข้นของเบนซีนโดยใช้โปรแกรม Polymath

ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของไอโซออกเทนจากพื้นที่ใต้กราฟของไอโซออกเทน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 กรัม พื้นที่ใต้กราฟของไอโซออกเทนเป็น 1688.14 ใช้การประมาณค่าในช่วง (Interpolation) และการประมาณค่านอกช่วง (Extrapolation) โดยใช้ข้อมูลจากกราฟมาตรฐานของไอโซออกเทนดังแสดงในตาราง ก-14 และใช้โปรแกรม Polymath Software Version 6.0 ในการคำนวณดังแสดงตัวอย่างในภาพประกอบที่ ก-2 จะได้ ร้อยละความเข้มข้นของไอโซออกเทน (โดยปริมาตร) = 0.05

ตาราง ก-14 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของสารมาตรฐานไอโซออกเทนที่ความเข้มข้นต่างๆ

Concentration (% by volume)	Area (pA*s)
0.1	3071.43
0.5	15040.30
1	31501.60
5	63423
10	115468
15	175452
20	232216
25	298561

Regression Analysis | Graph

Dependent variable: Concentration

Independent variable: Areapeak

Interpolation | Differentiation | Integration

Indep variable value: 1688.14

Calculated value: 0.0547358

Solve with: RATINT

ภาพประกอบที่ ก-2 แสดงตัวอย่างการแปลงพื้นที่ใต้กราฟเป็นความเข้มข้นของไอโซออกเทนโดยใช้โปรแกรม Polymath

ตาราง ก-15 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของ Isooctane, Benzene, Ethyl benzene, p-xylene, m-xylene และ o-xylene ในการหาตัวเร่งปฏิกิริยาและความเร็วปฏิกิริยาที่เหมาะสมของน้ำมันปาล์มรีไฟน์

Temperature (°C)	Catalyst weight (g)	WHSV (h ⁻¹)	Area(p*As)						
			Isooctane	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	p-Xylene	m-Xylene	o-Xylene
550	2	22.50	10.35	1495.36	3241.88	529.68	848.87	0	28.86
550	3	15	286.95	4321.85	81353.5	13888.1	2611.46	4427.73	21821.2
550	4	11.25	4.02	577.67	1136.67	261.24	0	0	7.78

ตาราง ก-16 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของ Isooctane, Benzene, Ethyl benzene, p-xylene, m-xylene และ o-xylene ในการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมของน้ำมันปาล์มรีไฟน์

Temperature (°C)	Catalyst weight (g)	WHSV (h ⁻¹)	Area(p*As)						
			Isooctane	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	p-Xylene	m-Xylene	o-Xylene
450	2	22.50	109.96	8745.87	33185.50	10612.90	19514.20	0	27.72
500	2	22.50	3623.61	61947.90	158854	15760.70	1737.33	7397.07	26030.64
550	2	22.50	10.35	1495.36	3241.88	529.68	848.87	0	28.86

ตาราง ก-17 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของ Isooctane, Benzene, Ethyl benzene, p-xylene, m-xylene และ o-xylene ในการหาตัวเร่งปฏิกิริยาและความเร็วปฏิกิริยาที่เหมาะสมของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว

Temperature (°C)	Catalyst weight (g)	WHSV (h ⁻¹)	Area (p*As)						
			Isooctane	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	p-Xylene	m-Xylene	o-Xylene
550	2	22.50	40.80	3111.04	8452.23	1993.58	3164.62	0	51.01
550	3	15	1270.03	54433.40	128131	15467.90	2832.34	5588.80	19937.20
550	4	11.25	25290.70	97253.90	0	12416.20	15964.80	22388.50	3694.83

ตาราง ก-18 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของ Isooctane, Benzene, Ethyl benzene, p-xylene, m-xylene และ o-xylene ในการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ใช้แล้ว

Temperature (°C)	Catalyst weight (g)	WHSV (h ⁻¹)	Area (p*As)						
			Isooctane	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	p-xylene	m-Xylene	o-Xylene
450	3	15	3408.59	31892	199754	1254.14	4246.16	16430.1	51782.40
500	3	15	165.92	5368.95	15529.80	4042.66	5969.27	135.49	0
550	3	15	1270.03	54433.40	128131	15467.90	2832.34	5588.80	19937.20

ตาราง ก-19 แสดงปริมาณสาร Isooctane, Benzene, Ethyl benzene, p-xylene, m-xylene และ o-xylene ใน OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนในการหาตัวเร่งปฏิกิริยาและความเร็วปฏิกิริยาที่เหมาะสมของน้ำมันปาล์มรีไฟน์

Temperature (°C)	Catalyst weight (g)	gram in OLP								Yield of parts of gasoline (%wt)	Yield of OLP (%wt)
		Isooctane	Benzene	Toluene	p-Xylene	m-Xylene	o-Xylene	Ethyl benzene	Total		
550	2	6.37 E-05	5.05 E-03	9.52 E-03	2.64 E-03	1.76 E-06	7.92 E-05	1.51 E-03	1.90 E-02	0.13	27.72
550	3	1.18 E-03	0.01	0.22	7.37 E-03	0.01	0.06	0.04	3.41 E-01	2.27	25.08
550	4	3.24 E-05	1.81 E-03	3.06 E-03	0	1.61 E-06	1.80 E-05	6.80 E-04	5.59 E-03	0.04	25.37

ตาราง ก-20 แสดงปริมาณสาร Isooctane, Benzene, Ethyl benzene, p-xylene, m-xylene และ o-xylene ใน OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนในการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมของน้ำมันปาล์มรีไฟน์

Temperature (°C)	Catalyst weight (g)	gram in OLP								Yield of parts of gasoline (%wt)	Yield of OLP (%wt)
		Isooctane	Benzene	Toluene	p-Xylene	m-Xylene	o-Xylene	Ethyl benzene	Total		
450	2	4.50 E-04	0.03	0.09	0.05	1.55 E-06	6.70 E-05	0.03	0.19	1.29	24.45
500	2	0.02	0.22	0.49	5.69 E-03	0.02	0.08	0.05	0.88	5.84	29.09
550	2	6.37 E-05	5.05 E-03	9.52 E-03	2.64 E-03	1.76 E-06	7.92 E-05	1.50 E-03	1.90 E-02	0.13	27.72

ตาราง ก- 21 แสดงปริมาณสาร Isooctane, Benzene, Ethyl benzene, p-xylene, m-xylene และ o-xylene ใน OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนในการหาตัวเร่งปฏิกิริยาและความเร็วปฏิกิริยาที่เหมาะสมของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ไว้แล้ว

Temperature (°C)	Catalyst weight (g)	gram in OLP								Yield of parts of gasoline (%wt)	Yield of OLP (%wt)
		Isooctane	Benzene	Toluene	p-Xylene	m-Xylene	o-Xylene	Ethyl benzene	Total		
550	2	2.00 E-04	0.01	0.02	9.88 E-03	1.76 E-06	1.40 E-04	5.69 E-03	0.05	0.34	27.74
550	3	7.68 E-03	0.25	0.51	0.01	0.02	0.08	0.06	0.93	0.69	37.37
550	4	2.12 E-03	0.08	0.28	0.04	0.04	0.06	0	0.51	3.43	27.46

ตาราง ก- 22 แสดงปริมาณสาร Isooctane, Benzene, Ethyl benzene, p-xylene, m-xylene และ o-xylene ใน OLP และร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนในการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ไว้แล้ว

Temperature (°C)	Catalyst weight (g)	gram in OLP								Yield of parts of gasoline (%wt)	Yield of OLP (%wt)
		Isooctane	Benzene	Toluene	p-Xylene	m-Xylene	o-Xylene	Ethyl benzene	Total		
450	3	0.01	0.09	0.47	0.01	0.04	0.12	2.85 E-03	0.73	4.89	22.13
500	3	8.29 E-03	0.02	0.05	0.02	4.16 E-04	0	0.01	0.10	0.69	30.25
550	3	7.69 E-03	0.25	0.51	0.01	0.02	0.08	0.06	0.93	6.20	37.37

การคำนวณร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีน เริ่มต้นด้วยการเปลี่ยนพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย GC-FID จากกราฟมาตรฐาน (แสดงในภาคผนวก ง.) มาเป็นความเข้มข้นในหน่วย ppm และแปลงหน่วยให้อยู่ในรูปของร้อยละโดยน้ำหนัก จึงสามารถคำนวณร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีน ตัวอย่างการคำนวณร้อยละผลได้ของส่วนหนึ่งของแก๊สโซลีนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 กรัม และความเร็วปฏิกิริยา 15 ต่อชั่วโมง แสดงได้ดังนี้

พื้นที่ใต้กราฟของ Isooctane = 1270.03 pA*s แปลงเป็นความเข้มข้น ได้ = 1261.80 ppm

$$\begin{aligned} 1261.80 \text{ ppm} &= \frac{1261.80 \text{ mg C8}}{1 \text{ OLP}} = 1261.80 \times 10^{-3} \frac{\text{g C8}}{1 \text{ OLP}} \\ &= 1.2618 \frac{\text{g C8}}{1 \text{ OLP}} \times \frac{11}{1000 \text{ ml}} = 1.2618 \times 10^{-3} \frac{\text{g C8}}{\text{ml OLP}} \\ &= 1.2618 \times 10^{-3} \frac{\text{g C8}}{\text{ml OLP}} \times \frac{1}{0.92 \left(\frac{\text{g}}{\text{ml}}\right)} = 0.14\% \frac{\text{g}}{\text{g}} = 0.14 \% \text{ by weight} \end{aligned}$$

$$0.14 \% \text{ by weight in OLP} \Rightarrow \frac{0.14}{100} \times \text{gram of OLP}$$

$$= \frac{0.14}{100} \times 5.606 \text{ g} = 7.69 \times 10^{-3} \text{ g C8 in OLP}$$

$$\text{gram of isooctane in OLP} = 7.69 \times 10^{-3} \text{ g}$$

$$\text{gram of benzene in OLP} = 0.25 \text{ g}$$

$$\text{gram of toluene in OLP} = 0.51 \text{ g}$$

$$\text{gram of p - xylene in OLP} = 0.01 \text{ g}$$

$$\text{gram of m - xylene in OLP} = 0.02 \text{ g}$$

$$\text{gram of o - xylene in OLP} = 0.08 \text{ g}$$

$$\text{gram of ethylbenzene in OLP} = 0.06 \text{ g}$$

$$\text{Total in OLP} = 7.69 \times 10^{-3} + 0.25 + 0.51 + 0.01 + 0.02 + 0.08 + 0.06 = 0.93 \text{ g}$$

$$\% \text{ Yield of parts of gasoline} = \frac{\text{gram of gasoline}}{\text{gram of feed}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Yield of parts of gasoline} = \frac{0.93}{15} \times 100\% = 6.20\% \text{ by weight}$$

ภาคผนวก ข.

วิธีและสถานะที่ใช้วิเคราะห์

1. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Gas Chromatograph- Flame Ionization Detector (GC-FID)



ภาพประกอบที่ ข- 1 Gas Chromatograph- Flame Ionization Detector (GC-FID)

ยี่ห้อและรุ่นของเครื่องมือ

Gas Chromatograph- Flame Ionization Detector (GC-FID) ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น 6890A (GC-Lampang)

ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิค Gas Chromatograph- Flame Ionization Detector (GC-FID) ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น 6890A (GC-Lampang) ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนในของเหลวอินทรีย์ (OLP) จากกระบวนการคละตะไครดกแครกกิ้ง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5

1.1 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเบนซีนและไอโซออกเทนในการศึกษาผลของอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยาต่อกระบวนการคละตะไครดกแครกกิ้ง

สภาวะการทดลองของ GC-FID

- Inlet temperature: 225°C, Split ratio 10:1, Carrier (He) flow 1.0 ml/min
- Detector temperature: 250 °C
- Oven initial temperature: Initial Temperature 50°C, hold 3 minutes
- Ramp to: 185°C, at 8°C/min, hold 5 minutes
- Hydrogen flow: 35 ml/min
- Air flow: 450 ml/min

- Make up flow: 35ml/min
- Column: HP-5, length 30 m., 0.32 μm I.D, film thickness 0.25 μm

1.2 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ Isooctane, Benzene, Ethyl benzene, p-xylene, m-xylene และ o-xylene ในการหาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอแก๊สโซลีนจากน้ำมันพืช

สภาวะการทดลองของ GC-FID

- Inlet temperature: 250 °C, Split ratio 5: 1, Carrier(He) flow 1.0 ml/min
- Detector temperature: 250°C
- Oven initial temperature: Initial Temperature 40°C, hold 5 minutes
- Ramp to: 140°C, at 5°C/min, hold 5 minutes, Post Run 250 °C hold 1 minute
- Hydrogen flow: 30 ml/min
- Air flow: 300 ml/min
- Make up flow: 25 ml/min
- Column: Select for FAME, length 30 m., 320 μm I.D, 0.1 μm film thickness

1.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของน้ำมันก่อนและหลังกระบวนการคะตะไลติกแครกกิ่ง (C₈-C₂₄)

สภาวะการทดลองของ GC-FID

- Inlet temperature: 290°C, Split ratio 50: 1, Carrier(He) flow 1.0 ml/min
- Detector temperature: 300°C
- Oven initial temperature: Initial Temperature 210°C, hold 12 minutes
- Ramp to: 250°C, at 20°C/min, hold 8 min
- Hydrogen flow: 30 ml/min
- Air flow: 300 ml/min
- Make up flow: 25 ml/min
- Column: Select for FAME, length 30 m., 320 μm I.D, 0.1 μm film thickness

2. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analyzer (TGA)



ภาพประกอบที่ ข- 2 Thermogravimetric Analyzer (TGA)

ยี่ห้อและรุ่นของเครื่องมือ

Thermogravimetric Analyzer (TGA) ยี่ห้อ perkin Elmer รุ่น TGA7

2.1 การวิเคราะห์หาช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง

นำน้ำมันพืชวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA โดยให้ความร้อนกับน้ำมันพืชภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของน้ำมันเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ต้องการหาอุณหภูมิเริ่มต้นที่สามารถทำให้น้ำมันพืชมีการเปลี่ยนแปลงสถานะไปเป็นสถานะแก๊สให้ได้มากที่สุด

สภาวะการทดลองของ TGA

-Purge gas: Nitrogen

-Scanning program: Heat from 80 °C to 750 °C at 10 °C /min

3. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)



ภาพประกอบที่ ๓- 3 Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

ยี่ห้อและรุ่นของเครื่องมือ

Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) ยี่ห้อ Bruker Germany รุ่น EQUINOX 55

3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา

เป็นการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมเรียบร้อยแล้วไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ FT-IR Spectroscopy ซึ่งใช้เทคนิคการเตรียมสารแบบ KBr Disc โดยบดสารตัวอย่างของแข็งบริสุทธิ์ (1-2 มิลลิกรัม) รวมกับผง KBr (100 มิลลิกรัม) นำเข้าเครื่องอัด minipress จนได้แผ่นกลมแบนใสคล้ายแก้ว หลังจากอัดเป็นแผ่นแบนแล้ว นำแผ่น KBr disc ใส่ที่ยึดพิเศษแล้ววางบนลำรังสี IR

สภาวะการทดลองของ FT-IR

-Test Technique: Pellet KBr

-Test Condition: 4000-400 cm^{-1}

ภาคผนวก ก.

กระบวนการคละไลติกแครกิ้งด้วยเครื่อง Fixed-bed micro reactor

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Fixed-bed micro reactor เพื่อใช้ในการคละไลติกแครกิ้ง ระบบคละไลติกแครกิ้งประกอบด้วย เตาเผาให้ความร้อนก่อนการคละไลติกแครกิ้ง (Pre-heater) เครื่องปฏิกรณ์ (Fixed-bed micro reactor) ระบบควบคุมและหล่อเก็บผลผลิต เครื่องปฏิกรณ์เป็นหัวใจของระบบคละไลติกแครกิ้ง เป็นตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมัน โดยน้ำมันที่ถูกให้ความร้อนจาก Pre-heater จะไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์จากด้านบนที่ภายในใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ ด้านล่างเป็นทางออกของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะถูกลบโดยใช้หลอดเก็บตัวอย่าง โดยผ่านการควบคุมที่เชื่อมต่อกันเป็นระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมให้ดีขึ้น ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานแสดงได้ดังต่อไปนี้

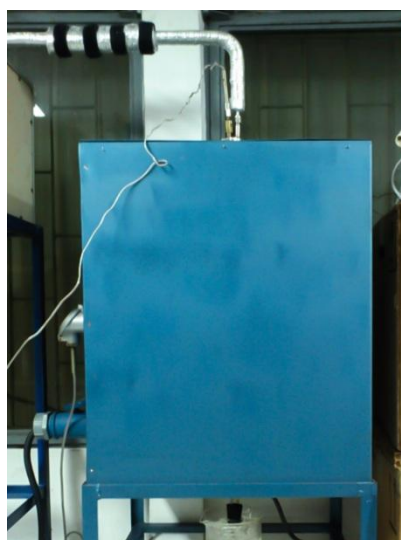
1. ใส่น้ำมันในถังปฏิกรณ์ที่อยู่ใน Pre-heater และใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาใน Fixed-bed micro reactor
2. ต่อระบบคละไลติกแครกิ้งให้เรียบร้อยแล้วเปิดก๊าซใน โตรเจนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหล 20-30 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 15-20 นาที ก่อนการทดลอง จากนั้นปรับอัตราการไหลของไนโตรเจนเป็นอัตราการไหลที่ต้องการใช้จริงในการทดลอง
3. เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิใน Fixed-bed micro reactor ให้ถึงอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิใน Fixed-bed micro reactor ถึงตามที่ต้องการแล้ว ให้เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิของ Pre-heater น้ำมันจะถูกให้ความร้อนและระเหยกลายเป็นไอเข้าสู่ Fixed-bed micro reactor และไหลเข้าสู่ระบบควบคุม
4. เมื่อดำเนินการเสร็จสิ้นให้นำผลิตภัณฑ์ของเหลวไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาผลได้ของของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการทดลองและนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ผลต่อไป



ภาพประกอบที่ ค-1 แสดงกระบวนการคละตะไลดติกแตรกิ้ง



(a)



(b)

ภาพประกอบที่ ค-2 (a) Pre-heater, (b) Fixed-bed micro reactor



(a)



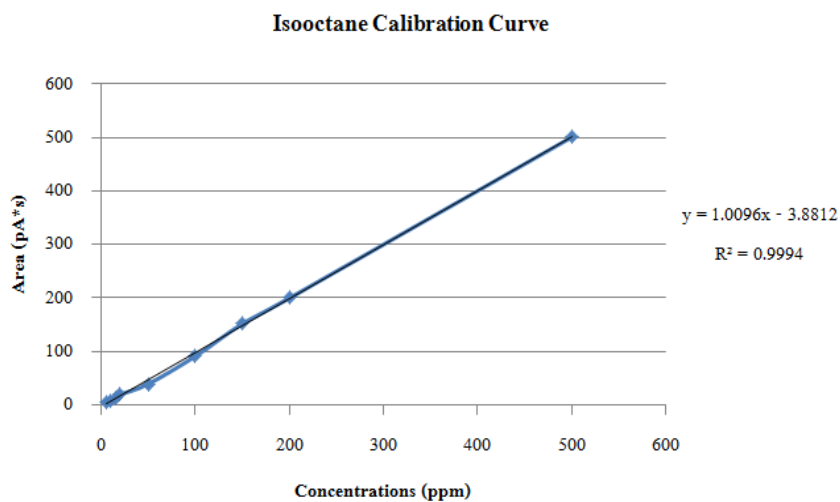
(b)

ภาพประกอบที่ ค-3 (a) ระบบควบคุมแรงดัน, (b) ตัวอย่างการเก็บผลิตภัณฑ์

ภาคผนวก ง.

กราฟมาตรฐานของสารมาตรฐานและโครมาโตแกรมของ OLP

1. กราฟมาตรฐานของ Isooctane

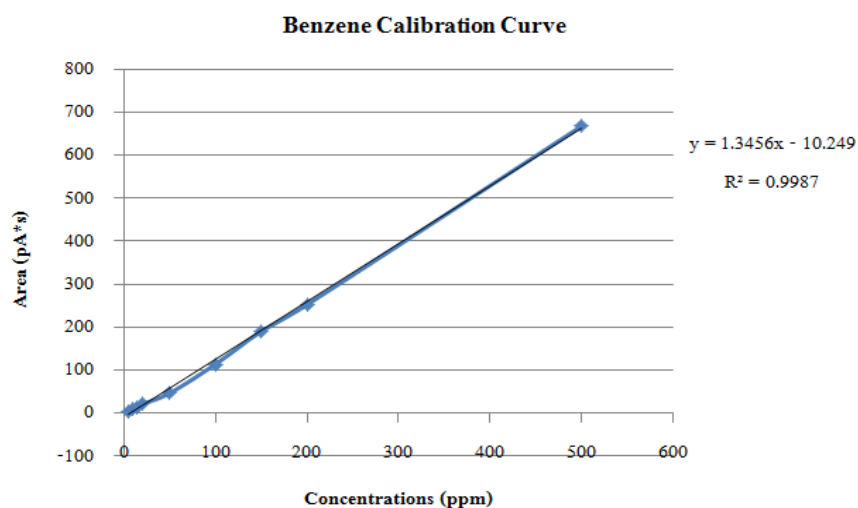


ภาพประกอบที่ ง-1 Isooctane calibration curve

สมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน : $Y=1.0096X-3.8812$ ค่าความเชื่อมั่น : $R^2=0.99$

เมื่อ Y : พื้นที่ใต้กราฟ (pA*s) X : ความเข้มข้น (ppm)

2. กราฟมาตรฐานของ Benzene

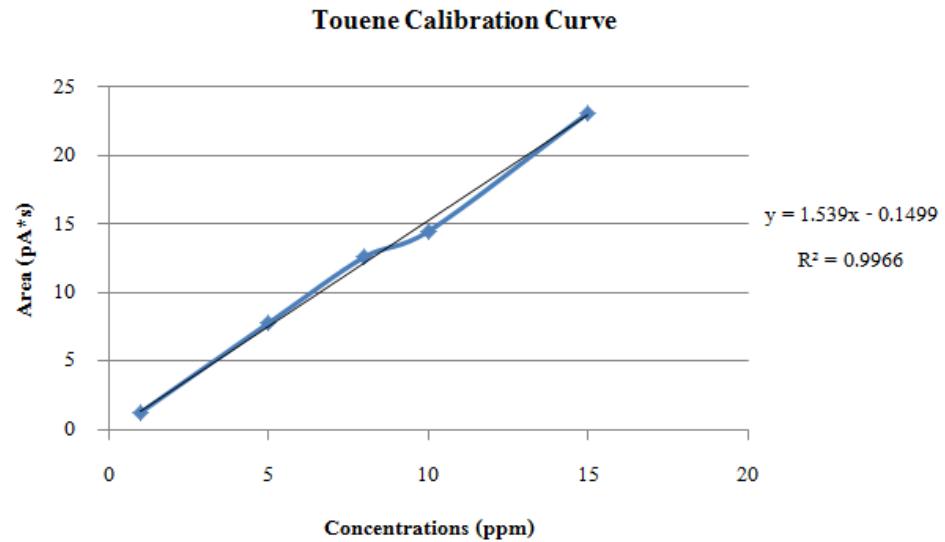


ภาพประกอบที่ ง-2 Benzene calibration curve

สมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน : $Y=1.3456X-10.2490$ ค่าความเชื่อมั่น : $R^2=0.99$

เมื่อ Y : พื้นที่ใต้กราฟ (pA*s) X : ความเข้มข้น (ppm)

3. กราฟมาตรฐานของ Toluene

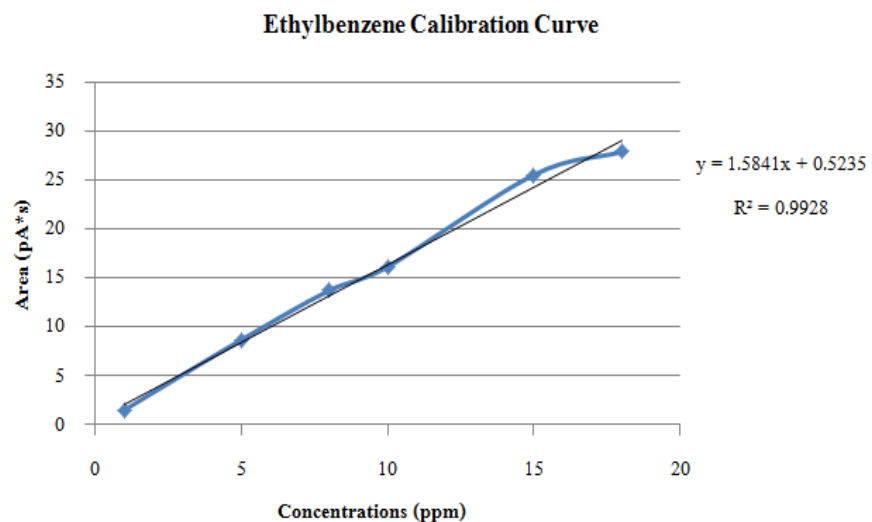


ภาพประกอบที่ ง-3 Toluene calibration curve

สมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน : $Y=1.5390X-0.1499$ ค่าความเชื่อมั่น : $R^2=0.99$

เมื่อ Y : พื้นที่ใต้กราฟ (pA*s) X : ความเข้มข้น (ppm)

4. กราฟมาตรฐานของ Ethyl benzene

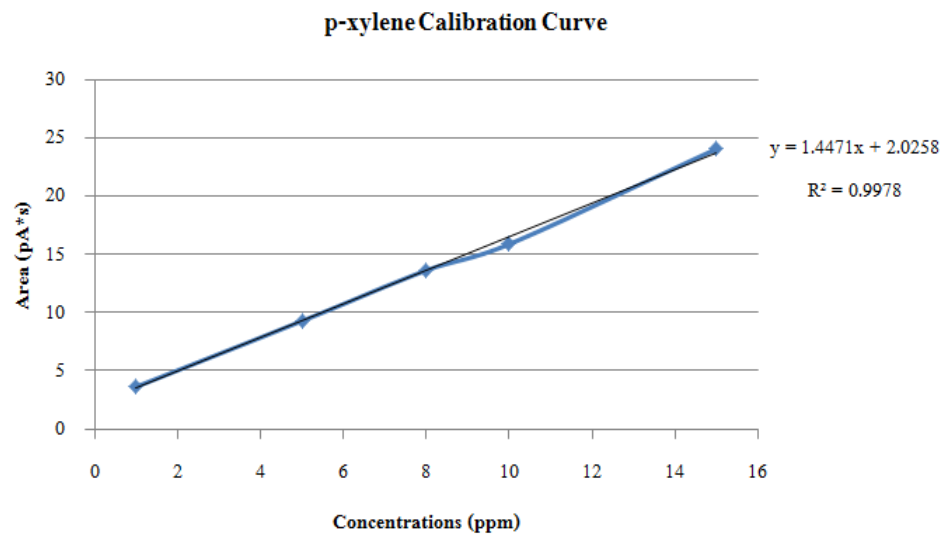


ภาพประกอบที่ ง-4 Ethyl benzene calibration curve

สมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน : $Y=1.5841X-0.5235$ ค่าความเชื่อมั่น : $R^2=0.99$

เมื่อ Y : พื้นที่ใต้กราฟ (pA*s) X : ความเข้มข้น (ppm)

5. กราฟมาตรฐานของ p-xylene

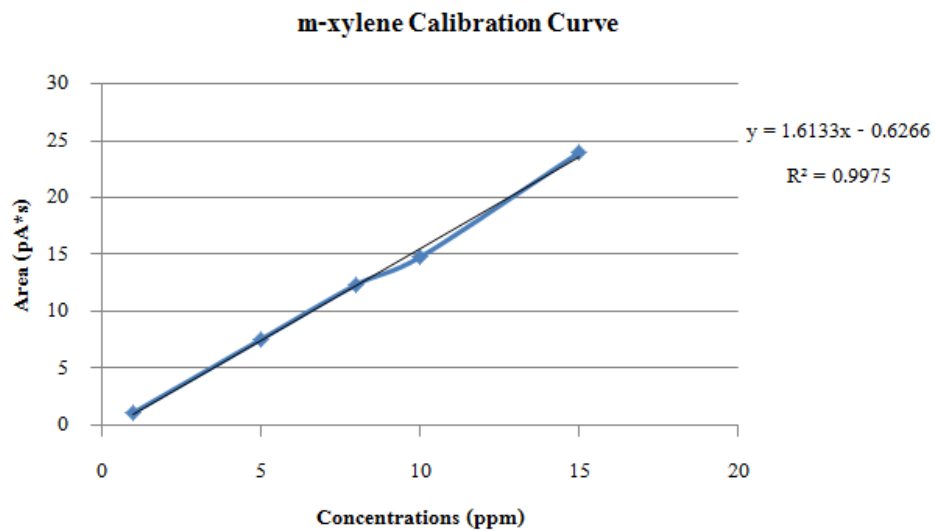


ภาพประกอบที่ ๖-5 p-xylene calibration curve

สมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน : $Y=1.4471X-2.0258$ ค่าความเชื่อมั่น : $R^2 =0.99$

เมื่อ Y : พื้นที่ใต้กราฟ (pA*s) X : ความเข้มข้น (ppm)

6. กราฟมาตรฐานของ o-xylene

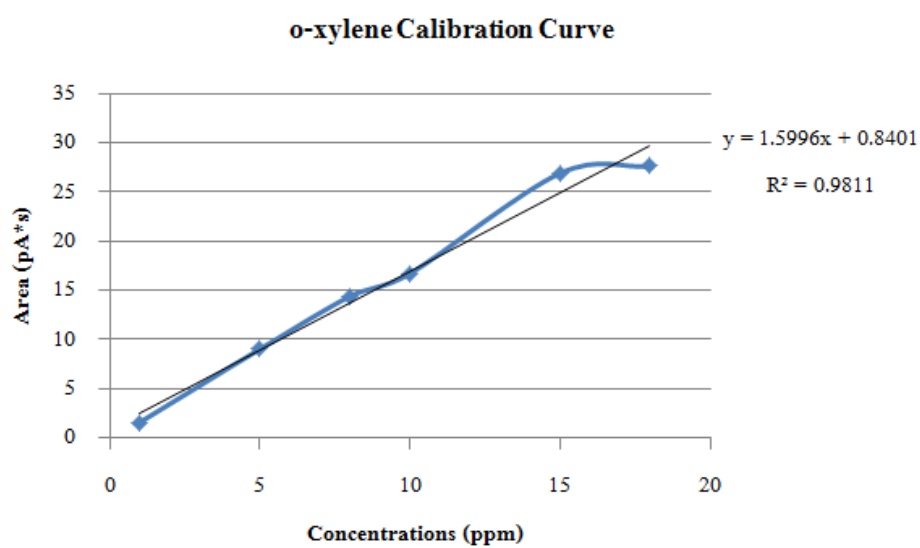


ภาพประกอบที่ ๖-6 m-xylene calibration curve

สมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน : $Y=1.6133X-0.6266$ ค่าความเชื่อมั่น : $R^2 =0.99$

เมื่อ Y : พื้นที่ใต้กราฟ (pA*s) X : ความเข้มข้น (ppm)

7. กราฟมาตรฐานของ m-xylene



ภาพประกอบที่ ๗-7 o-xylene calibration curve

สมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน : $Y=1.5996X-0.8401$ ค่าความเชื่อมั่น : $R^2=0.98$

เมื่อ Y : พื้นที่ใต้กราฟ (pA*s) X : ความเข้มข้น (ppm)

8. ตัวอย่างโครมาโตกราฟของ OLP จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-FID

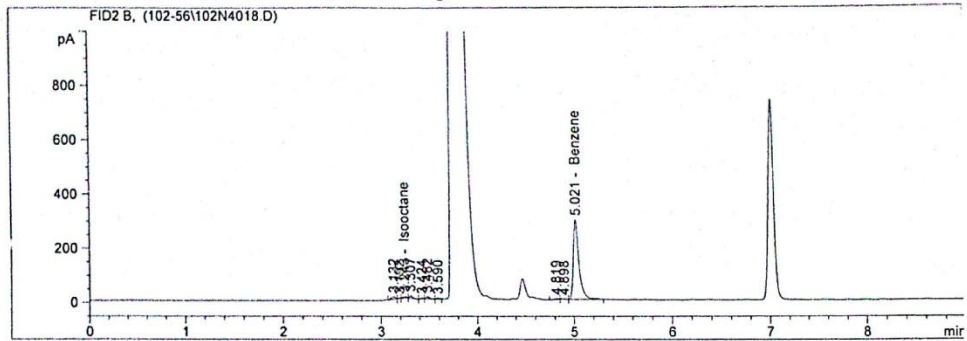
Data File C:\HPCHEM\1\DATA\102-56\102N4018.D Sample Name: 9UPO-Exp3

dilution factor 2

```

=====
Injection Date : 10/22/2013 04:03:35 PM      Seq. Line : 10
Sample Name   : 9UPO-Exp3                    Vial       : 10
Acq. Operator : Pim                          Inj        : 1
                                           Inj Volume : 1 µl

Acq. Method   : C:\HPCHEM\1\METHODS\102-56M.M
Last changed  : 10/18/2013 16:17:19 PM by Sujanya
Analysis Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\102-C2.M
Last changed  : 10/25/2013 10:33:08 PM by Sujanya
                (modified after loading)
    
```



Area Percent Report

```

Sorted By      : Signal
Calib. Data Modified : Friday, October 25, 2013 10:17:00 PM
Multiplier     : 1.0000
Dilution       : 1.0000
    
```

Signal 1: FID2 B,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Area %	Name
1	3.054	+	0.0000	0.00000	0.00000	Pentene
2	3.243	BB +	0.0288	12.84914	1.00759	Isooctane
3	5.021	BB +	0.0596	1171.33386	91.85245	Benzene

Totals : 1184.18300 92.8600

Results obtained with enhanced integrator!
1 Warnings or Errors :

Warning : Time reference compound(s) not found

*** End of Report ***

ภาพประกอบที่ ง-8 แสดงตัวอย่างโครมาโตกราฟของ Isooctane และBenzene จากผลการวิเคราะห์ OLP ด้วย GC-FID

Data File C:\HPCHEM\1\DATA\102-56\102N4018.D

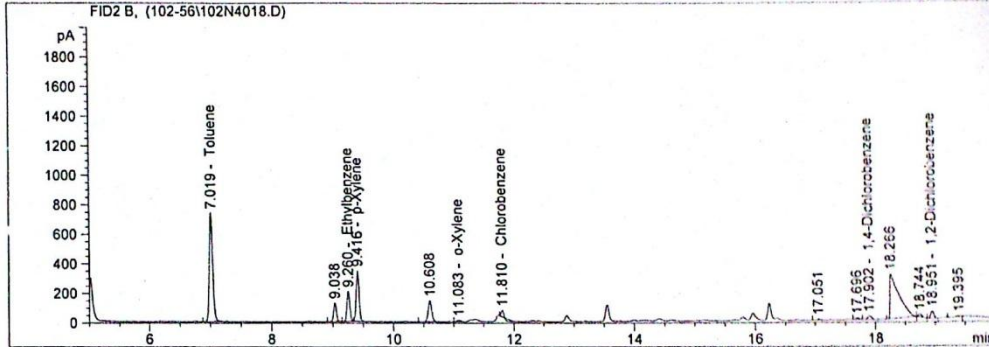
Sample Name: 9UPO-Exp3

dilution factor 2

```

=====
Injection Date : 10/22/2013 04:03:35 PM      Seq. Line : 10
Sample Name    : 9UPO-Exp3                    Vial       : 10
Acq. Operator  : Pim                          Inj        : 1
                                           Inj Volume : 1 µl

Acq. Method   : C:\HPCHEM\1\METHODS\102-56M.M
Last changed  : 10/18/2013 16:17:19 PM by Sujanya
Analysis Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\102-C1.M
Last changed  : 10/25/2013 15:16:53 PM by Sujanya
                (modified after loading)
    
```



Area Percent Report

```

=====
Sorted By      :      Signal
Calib. Data Modified : 10/25/2013 15:07:11 PM
Multiplier     :      1.0000
Dilution       :      1.0000
    
```

Signal 1: FID2 B,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Area %	Name
1	7.019	BB +	0.0593	2856.31689	30.91646	Toluene
2	9.260	BB +	0.0498	637.86798	6.90421	Ethylbenzene
3	9.416	BB +	0.0516	1127.21509	12.20085	p-Xylene
4	10.030		0.0000	0.00000	0.00000	m-Xylene
5	11.083	BB +	0.0579	33.85718	0.36647	o-Xylene
6	11.810	BPA +	0.0236	35.82144	0.38773	Chlorobenzene
7	17.282		0.0000	0.00000	0.00000	1,3-Dichlorobenzene
8	17.902	BB +	0.0641	104.04699	1.12619	1,4-Dichlorobenzene
9	18.951	BB +	0.0554	177.54868	1.92177	1,2-Dichlorobenzene

Totals : 4972.67425 53.8237

Results obtained with enhanced integrator!

1 Warnings or Errors :

Warning : Time reference compound(s) not found

ภาพประกอบที่ ง-9 แสดงตัวอย่างโครมาโตกราฟของ Toluene, Ethyl benzene และ Xylene จากผลการวิเคราะห์ OLP ด้วย GC-FID

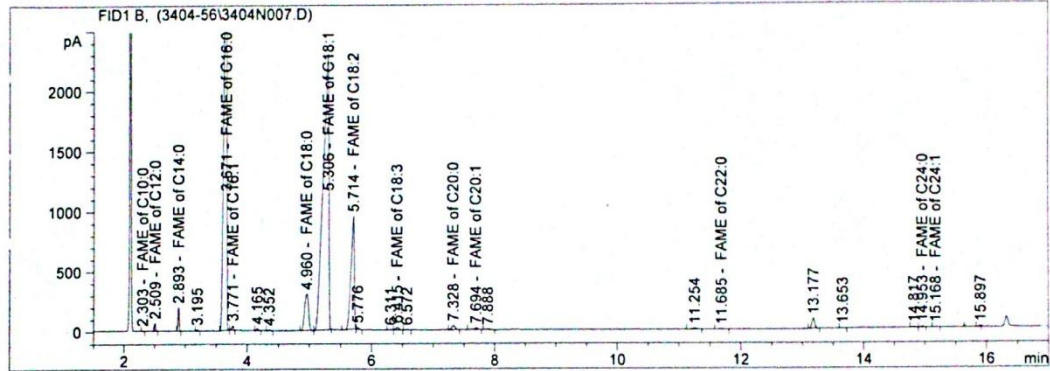
Data File C:\HPCHEM\1\DATA\3404-56\3404N007.D

Sample Name: 3404-56RPO1

```

=====
Injection Date : 8/21/2013 12:26:12 PM      Seq. Line : 7
Sample Name    : 3404-56RPO1                Vial       : 6
Acq. Operator  : Pim                        Inj        : 1
                                           Inj Volume : 1 µl

Acq. Method    : C:\HPCHEM\1\METHODS\3404-56.M
Last changed   : 8/21/2013 09:55:30 PM by Pim
Analysis Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\3404-56C.M
Last changed   : 8/23/2013 09:54:48 PM by Pim
                (modified after loading)
This method is for 3404/56 and 3468/56
    
```



Area Percent Report

```

=====
Sorted By      : Signal
Calib. Data Modified : 8/23/2013 09:51:39 PM
Multiplier    : 1.0000
Dilution      : 1.0000
    
```

Signal 1: FID1 B,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Area %	Name
1	2.180	+	0.0000	0.00000	0.00000	FAME of C8:0
2	2.303	PB	0.0169	4.95858	0.01541	FAME of C10:0
3	2.509	BB	0.0189	74.52970	0.23161	FAME of C12:0
4	2.893	BV	0.0217	266.88467	0.82939	FAME of C14:0
5	3.671	PB	0.0417	1.16649e4	36.25065	FAME of C16:0
6	3.771	BB	0.0271	65.04438	0.20214	FAME of C16:1
7	4.960	PB	0.0723	1336.37561	4.15303	FAME of C18:0
8	5.306	BB	0.0797	1.44370e4	44.86550	FAME of C18:1
9	5.714	BB	0.0519	3566.97266	11.08500	FAME of C18:2
10	6.415	BBA	0.0458	62.41735	0.19397	FAME of C18:3
11	7.328	BBA	0.0539	120.83328	0.37551	FAME of C20:0
12	7.694	BBA	0.0637	60.84971	0.18910	FAME of C20:1
13	11.685	BBA	0.0855	18.59996	0.05780	FAME of C22:0
14	12.266	+	0.0000	0.00000	0.00000	FAME of C22:1
15	14.953	BBA	0.0449	22.41276	0.06965	FAME of C24:0
16	15.168	BBA	0.0466	6.43258	0.01999	FAME of C24:1
Totals :				3.17082e4	98.5388	

Instrument 1 8/23/2013 09:54:57 PM Pim

Page 1 of 2

ภาพประกอบที่ ง-10 แสดงตัวอย่างโครมาโตกราฟขององค์ประกอบ C₈-C₂₄ ด้วย GC-FID

ภาคผนวก จ.

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

เรื่อง **Biogasoline from Catalytic Cracking of Refined Palm Oil Using H-ZSM-5 catalyst**

**IICBE 2014 International Conference Program-
Jan. 21-22, 2014 Patong Beach, Phuket (Thailand)
International Conference on Biological, Chemical and
Environmental Sciences (BCES-2014)**

	<p>CONFERENCE VENUE KEE Resort & Spa Hotel 152/1 Thaveewong Rd., Patong Beach, Kathu, Phuket 83150 Thailand Tel : 076 335 888 Fax : 076 335 808 www.thekeeresort.com</p>
--	--

Jan. 21, 2014 (Tuesday)

Venue: Hotel Lobby

Biogasoline from Catalytic Cracking of Refined Palm Oil Using H-ZSM-5 catalyst

Jiratchaya Chuaykleang¹, Sukritthira Ratanawilai²

Abstract— Recently, fuels are becoming more necessary thing in daily life. Especially diesel and gasoline are primary fuel in transportation. Most of fuels made from fossil, however, this has caused global warming issue. Renewable energy is an important source for replacing fossil fuels. In this study, the catalytic cracking of refined palm oil to gasoline was studied. The effect of reaction temperature (673-823 K), weight hourly space velocity (108-1080 h⁻¹) and weight of catalyst (1-5 g.) on the catalytic cracking activity of H-ZSM-5 in fixed-bed reactor at atmospheric pressure was studied. The response surface methodology was used to design the experiments for study the operating variable effect over yield of organic liquid product. In addition, this research studies effect of operating variable on benzene and isooctane fractions. The optimum condition of maximum yield of organic liquid product, benzene and isooctane was determined.

Keywords— Biogasoline, Catalytic cracking, H-ZSM-5, Refined palm oil

I. INTRODUCTION

Nowadays, there are two kinds of critical problems, energy crisis and global warming. Global petroleum crude oil prices are likely to become scarce and costly, it has effect to energy situations. Using fossil fuel as petroleum fuel has caused global warming problem because of air pollution emissions [1]. Biofuel can be substitute fossil fuels as renewable energy. Biofuel is defined as liquid and gaseous fuel that can be produced from utilization of biomass. In the recent years there have been several studies on the production of hydrocarbons from biomass. Biomass is any organic matter, it can be derived from plant oils or

animal fats such as castor, soybean, canola, cotton and palm oil [2]. The production of biofuel is becoming as an alternative transportation fuels such as diesel and gasoline. So the transportation is the next user of biomass.

Different types of vegetable oils, edible and non-edible types are utilized in the production of biofuel. The choice of these raw materials depends on its availability, cost and climate in each country. Oil palm is widely grown in Thailand, which is considered as the third largest producer in the world. Nearly 1.2 million tons of palm oil produced in 2010 [3].

There have been several methods reported for the production of biofuel in previous studies on alternative fuel; one of these methods was, catalytic cracking. Catalytic cracking is a conversion process, converts high molecular weight oil components to lower molecular weight by catalyst. The catalyst directs the course of the cracking reactions to produce more of the desired higher octane hydrocarbon products which can be used for the production of higher octane gasoline [4].

The catalyst properties in catalytic cracking process were the catalyst can convert large hydrocarbon to small hydrocarbon, stability form high temperature and low pressure condition, small coke formation and catalyst has acidity. H-ZSM-5 is one type of zeolite catalyst. They are inorganic porous materials with a highly regular structure of pores and chambers that allow some molecules to pass through while others to be excluded or broken down. H-ZSM-5 have important features shape selectivity: avoids reactant oversized molecules from diffusing into its pores, allows only small molecules product to be formed during reaction to diffuse out of the zeolite pores and molecular traffic control. The reactant

Jiratchaya Chuaykleang¹ is with the Chemical Engineering Department, Prince of Songkla University, Songkhla, 90112 Thailand (e-mail: chuaykleang.j@gmail.com).

Asst.Prof.Dr. Sukritthira Ratanawilai² is with the Chemical Engineering Department, Prince of Songkla University, Songkhla, 90112 Thailand (e-mail: sukritthira.b@psu.ac.th).

molecules enter the catalyst through one type of channels, and the products, due to their size and shape limitation, leave the catalyst through the other type of channel, thus minimizing counter-diffusion [5]. So the H-ZSM-5 catalyst should be the main catalyst for catalytic cracking process.

The scopes of the present study is to study the optimum condition for produce biogasoline by catalytic cracking process from refined palm oil. The effect of temperature, WHSV and catalyst weight were study. The respons surface methodology was used to design the experiments for study the operating variables effect over yield of organic liquid product. Benzene and isooctane fractions in OLP was analyzed.

II. EXPERIMENT METHODS

A. Materials and Chemical

Refined palm oil (RPO) in commertail grade (density of oil = 0.889 g/ml), purchased form local market under name "Morakot". It was used as a raw material. Analytical grade of nitrogen gas (99.99% of purity) was used for carrier gas. Ammonium-ZSM-5 (code no. CBV 3024 E) with the Si/Al ratio of 30 and 99.98% of purity was purchased from Zeolyst International Company, USA. Benzene and isooctane analytical standard for GC (CAS no. = 71-43-2 and CAS no. = 540-84-1 respectively.) were purchased from S.M. Chemical supplies company, Thailand.

B. Catalyst preparation

Firstly, NH_4 -ZSM-5 was dried at 393 K for 24 hours. Dreid NH_4 -ZSM-5 was put in the furnace under N_2 flow rate of 20 ml/min. The NH_4 -form was transformed to the proton form of zeolite (H^+) and ammonia (NH_3) by was heated at 823 K for 6 hours. The H-ZSM-5 catalyst was prepared for catalytic cracking process.

C. Fourier-transformed Infrared analysis

Fourier-transformed Infrared (FT-IR) is a method of obtaining infrared spectra by first collecting an interferogram of a sample signal using an interferometer. In this study, the FT-IR of H-ZSM-5 was studied. The H-ZSM-5 was prepared from NH_4 -ZSM-5, heated at 823 K for 6 hours.

D. Thermo gravimetric analysis

Thermo gravimetric Analyzer (TGA) is a type of testing performed on samples that determines changes in weight in relation to change in temperature, weight

loss curve can identify the point where weight loss is most apparent. TGA is commonly employed in research and testing to determine characteristics of materials to determine degradation temperatures [7]. In this study, the weight loss of refined palm oil was studied. Study between 323-1073 K, the temperature was increase with heating rate 10 K/min.

E. Catalytic cracking

The catalytic cracking was performed at atmospheric pressure with reaction temperature range of 673-823 K using a fixed-bed reactor. This study using two reators for catalytic cracking, first reactor for feed of refined palm oil and second reactor for catalytic cracking reaction. Refined palm oil fed into the first reactor and was heated. Then the oil in liquid phase was evaporated to gas phase and ready for cracking. The oil in gas phase was carried to second reactor by nitrogen gas at certain weight hourly space velocity range of 108-1080 h^{-1} and weight of H-ZSM-5 catalyst was varied between 1-5 g. After the reaction, the gas product leaving the reactor were cooled to 313K in the condenser system. The organic liquid product (OLP) were collected in glass liquid sampler at room temperature. Fig.1 shows the experimental cracking process used for this study. Finally, OLP was kept and the benzene (C_6) and isooctane (C_8) were measured by gas chromatograpy with frame ionization detector (GC-FID).

The study intents to study the activity of catalytic cracking of refined palm oil to determine the effect of reaction temperature, weight hourly space velocity and amount of catalyst. The temperature was maintained at 673-823 K, weight hourly space velocity at 108-1080 h^{-1} and weight of catalyst at 1-5 g. A response surface methodology was developed by Box-Behnken Design (BBD) and was carried out by performing 16 experiments based on a three factors. The low, center and high levels of each variable were designated as -1, 0 and +1 respectively as shown in Table I. After the reaction, the OLP was determined to for find the optimum condition of catalytic cracking. The OLP and residual products are calculated as in (1), C_6 and C_8 were analyzed.

$$\text{Yield of OLP}(\% \text{wt}) = \frac{\text{Desied product}}{\text{Oil feed}} \times 100 \quad (1)$$

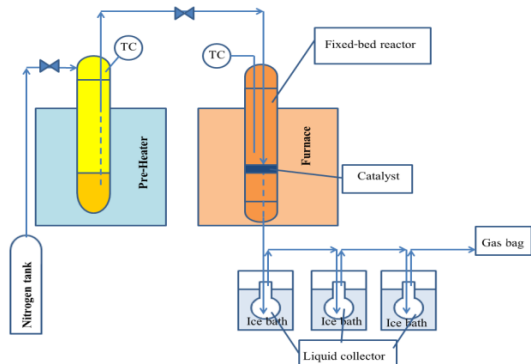


Fig.1. Diagram of catalytic cracking process.

TABLE I
INDEPENDENT VARIABLES CODED AND REAL VALUES USED IN
LINEAR MODEL

Variables	Code	Real values		
		-1	0	1
Temperature (K)	X ₁	673	748	823
Flow rate of N ₂ (ml/min)	X ₂	10	15	20
Weight of catalyst (gram)	X ₃	1	3	5

F. Design of experiment

The RSM is a collection of mathematical and statistical techniques for developing, improving and optimizing processes by finding the true relationship between the response and a set of independent variables [6].

The Box–Behnken design was used in the resent investigation to assess the effect of the reaction parameters. In this study, 3 factors, reaction temperature, nitrogen flow rate and weight of catalyst (Weight hourly space velocity (WHSV) was calculated from Nitrogen flow rate and weight of catalyst as show in (2).) were identified as important factors that influence the catalytic cracking of vegetable oil on the organic liquid product. A total number of 16 experimental runs including 3 center runs were generated in Table II.

$$WHSV \text{ (time}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Mass flow rate} \left(\frac{\text{weight}}{\text{time}} \right)}{\text{Catalyst weight (weight)}} \quad (2)$$

The regression model was used to approximate the responses based on a second-order polynomial model show in (3)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 \quad (3)$$

where Y is the response, β_0 is a constant coefficient, X are the independent variables and β_i , β_{ii} and β_{ij} are interaction coefficients of linear, quadratic and the second order terms respectively.

TABLE II
DESIGN OF EXPERIMENT FOR CATALYTIC CRACKING OF REFINE
PALM OIL

Run No.	X ₁	X ₂	X ₃
1	823	20	3
2	823	10	3
3	673	10	3
4	748	15	3
5	748	10	1
6	823	15	1
7	748	10	5
8	748	15	3
9	748	20	5
10	748	20	1
11	673	15	1
12	748	15	3
13	673	20	3
14	823	15	5
15	400	15	5
16	748	15	3

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Thermogravimatic analysis studies

In this research, it is used to estimate the range of temperature that used to experiment for production of biogasoline.

Fig. 2 shows curve of derivative weight and temperature of refined palm oil. Weight of RPO was begun to change at temperature of 623 K and derivate between 623 – 823 K, weight loss was not significantly changed by increasing temperature from 823-1073 K.

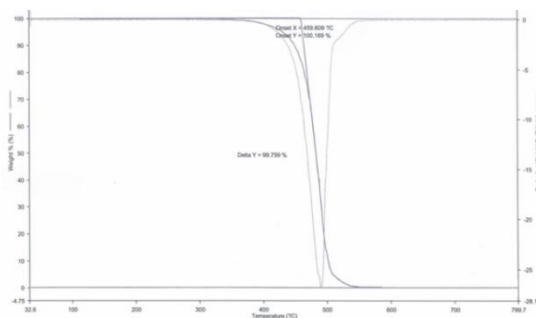


Fig. 2. Graph between derivative weight and temperature of refined palm oil .

B. FTIR analysis studies

The transmission spectroscopy of H-ZSM-5 are shown in Fig. 3. The spectrum of H-ZSM-5 has wave number in range of 400-2000 cm^{-1} and 3400-3500 cm^{-1} . Significant transmission bands are observed at 452, 548, 801, 1107, 1226 and 3454 cm^{-1} . This transmission bands are assigned to T-O bend, double five member ring, symmetric stretching, internal asymmetric of TO_4 tetrahedral, external asymmetric of TO_4 tetrahedral and functional group of Si-(OH)-Al respectively.

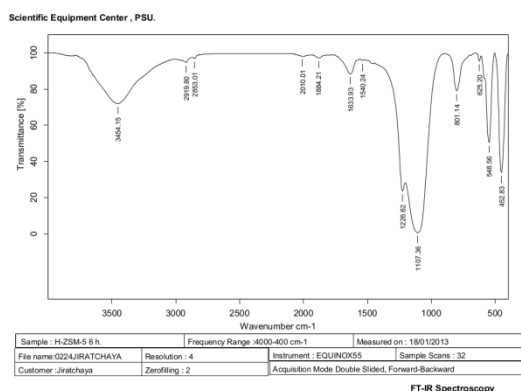


Fig. 3. Transmission spectroscopy of H-ZSM-5 from FT-IR.

C. Organic liquid product yield

The significant variables and their effects on the responses have to be identified in order to study the effects of the reaction variables on the yield of organic liquid product (Y_{OLP})

Nitrogen flow rate factor has not a significant effect on yield of OLP among the three response factors. It was neglected from the design, so the design equation is shown in (4).

Table III shows the analysis of variance (ANOVA) at 95% confidence level for the three independent factors of yield of organic liquid product (Y_{OLP}).

$$Y_{OLP} = -260.55 + 1.245X_1 - 11.35X_3 - 0.00136X_1^2 - 0.308X_3^2 + 0.02773X_1X_3 \quad (4)$$

TABLE III
ANOVA FOR THE QUADRATIC EQUATION MODEL FOR (4)

Source	Sum of Square	Mean of square	F-value
Regression	362.79	72.56	42.25
Residual	17.17	1.717	
LOF Error	11.95	3.984	5.3392
Pure Error	5.223	0.746	
Total	379.96		

$R^2 = 0.955$

Table IV shows the analysis of variance (ANOVA) at 95% confidence level for the three independent factors of yield of organic liquid product (Y_{OLP}). Yield of OLP of catalytic cracking process is between 15 to 27 percentage by weight (% wt). Yield of OLP increased with temperature more than 673 K and decreased with temperature up to 823 K. The predicted optimum condition of temperature, weight of catalyst and nitrogen flow rate were 770 K, 3.96 g respectively, with no effect of nitrogen flow rate. On the optimum condition from RSM was shown WHSVs of 136, 204 and 272 h^{-1} . WHSVs were calculated by (2) with optimum catalyst weight of 3.96 g. and various nitrogen flow rate of 10, 15 and 20 ml/min respectively. In this predicted optimum condition show 26.66 %wt yield of OLP. Fig. 4. presents temperature and weight of catalyst effects on yield of OLP.

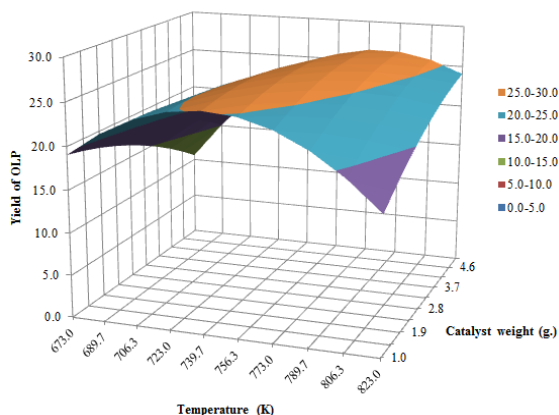


Fig. 4. Percentage yielded of OLP as a function of temperature and weight of catalyst.

TABLE IV
MATRIX FOR THE SIXTEEN EXPERIMENTAL AND PREDICTED YIELD OF OLP

X ₁	X ₂	X ₃	Yield of OLP (% wt)	
			Experimental	Predicted
823	20	3	21.95	21.19
823	10	3	22.05	21.19
673	10	3	15.22	16.06
748	15	3	27.24	26.29
748	10	1	23.47	25.11
823	15	1	16.01	15.85
748	10	5	25.19	25
748	15	3	26.43	26.29
748	20	5	26.9	25
748	20	1	24.97	25.11
673	15	1	20.68	19.05
748	15	3	25	26.29
673	20	3	15.58	16.06
823	15	5	22.28	24.06
673	15	5	10.31	10.62
748	15	3	26.2	26.29

D. Benzene and Isooctane analysis

On this above discussion, nitrogen flow rate has not a direct effect on the yield of OLP, hence, the study on percentage of gasoline and isooctane was carried out depending on two factors (Temperature and weight of catalyst). This study selected some of experimental to study the effect of temperature and weight of catalyst in benzene and isooctane concentration. The experiments were divided into two parts. Study of the effect of temperature (T) in 673, 748 and 823 K with the constant weight of catalyst (3 gram) and study the effect weight of catalyst (WC) with constant temperature (748 K). The experiments are shown in table V. Benzene and Isooctane were analyzed by GC-FID. The result of Benzene and Isooctane Concentration with effect of temperature and catalyst weight are shown in table VI and VII.

TABLE V
EXPERIMENTAL OF BENZENE AND ISOCTANE STUDIED.

Effect of Temperature		Effect of Catalyst weight	
T (K)	WC (g.)	WC (g.)	T (K)
673	3	1	748
673	3	1	748
748	3	3	748
748	3	3	748
823	3	5	748
823	3	5	748

TABLE VI
EFFECT OF TEMPERATURE FOR BENZENE AND ISOCTANE CONCENTRATION.

Temperature	Concentration (% by weight)	
	Benzene	Isooctane
673	0.3539	0.0414
673	0.3271	0.0385
748	4.9685	0.0311
748	4.1160	0.0525
823	4.5544	0.0179
823	5.6209	0.0007

TABLE VII
EFFECT OF CATALYST WEIGHT FOR BENZENE AND ISOCTANE
CONCENTRATION

Catalyst weight	Concentration (%by weight)	
	Benzene	Isooctane
1	1.3847	0.0825
1	2.9114	0.1149
3	4.9686	0.0319
3	4.1161	0.0526
5	0.0042	0.00013
5	0.0044	0.00016

It has been observed that the concentration of benzene increased with the increase of temperature, particularly above 673 K, however for isooctane, temperature has no significant effect because the concentration did not change with temperature

Effect of catalyst weight, while the benzene concentration increases with catalyst weight increase, reach to the maximum at 1-3 gram and then level off at higher catalyst weight regions. Isooctane concentration is decreased with catalyst weight increase.

In addition, the catalyst is important effect for catalytic cracking process. Amount of catalyst is directly affecting catalytic cracking reaction, as the reaction used higher catalyst weight, the longchain hydrocarbon was broken to small hydrocarbon. When the reaction was put more catalyst weight, some hydrocarbon was cracked in smaller hydrocarbon than gasoline range (less than benzene and isooctane range) and it did not show in this study.

IV. CONCLUSION

The response surface methodology was used to design the experiments to study the operating variable effect of catalytic cracking reaction over yield of organic liquid product. The optimum condition from RSM prediction was temperature of 770 K, weight of catalyst of 3.96 g. and no effect of nitrogen flow rate (WHSVs are 136, 204 and 272 h⁻¹). The yield of OLP obtained was 26.66 % wt.

The Effect of temperature on benzene and isooctane concentration was studied, and it was observed that, benzene concentration increased with

the increase of temperature, which had not a significant effect on isooctane concentration.

Furthermore, the effect of catalyst weight on benzene and isooctane concentration was studied, too. The concentration of benzene increased with the increase of catalyst weight and decreased at higher weight of catalyst. Isooctane concentration decreased with the increase of catalyst weight.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by Faculty of Engineering, Prince of Songkla University.

REFERENCES

- [1] S. Amin, "Review on biofuel oil and gas production processes from microalgae," *Energy Conversion and Management*. Vol. 50, pp. 1834–1840, April 2009
- [2] T. L. Chew and S. Bhatia, "Effect of catalyst additives on the production of biofuels from palm oil cracking in a transport riser reactor," *Bioresource Technology*. Vol. 100, pp. 2540–2545, January 2009
- [3] J. Dallinger, "Oil palm development in Thailand: economic, social and environmental considerations," *Oil Palm Expansion in South East Asia: trends and implications for local communities and indigenous peoples*.
- [4] James G. Speight, "Petroleum Technology-Part III," The process and technology of cracking. The Chemistry & Technology of Petroleum, Marcel Dekke, pp. 255-257
- [5] T. B. Siregar, "Catalytic cracking of palm oil to gasoline using zeolite catalysts," M. Eng. Dissertation, Faculty of Chemical and Natural Resources Engineering., University Technology Malaysia., Malaysia, 2005
- [6] S. Raissi and R. E. Farsani, "Statistical Process Optimization Through Multi-Response Surface Methodology," *Engineering and Technology*, vol. 27, 2009
- [7] "Thermo Gravimetric Analysis," [Available online : <http://www.chemsultants.com/technical-resources/article-description.aspx?id=7> (1/10/2013)]

Jiratchaya Chuaykleang was born in Bangkok, Thailand, in 1990. She received the B.Eng. degree in Chemical Engineering from Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand. She current research interest is catalytic cracking for biogasoline. She is studying M. Eng. Degree in Chemical Engineering at Prince of Songkla University, Thailand.

Sukrittira Rattanawilai received the B.Eng. degree in Chemical Engineering from Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand. She received the M.S. degree in Chemical Engineering from Colorado School of Mines, USA and received Ph.D. degree in Chemical Engineering from Colorado School of Mines, USA.

She joined the Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand, as an Assistance Professor. Her current research interest is catalytic cracking for biogasoline, catalyst development for biodiesel production and application of adhesive from epoxidized natural rubber.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล จิรัชญา ช่วยเกลี้ยง

รหัสนักศึกษา 5410120097

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีการศึกษาที่สำเร็จ
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2554

ทุนการศึกษา (ระหว่างที่ได้รับการศึกษา)

ทุนความเป็นเลิศทางวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Jiratchaya Chuaykleang, Sukrittira Ratanawilai. (2014) Biogasoline from Catalytic Cracking of Refined Palm Oil Using H-ZSM-5 catalyst. IICBE 2014 International Conference on Biological, Chemical and Environmental Sciences (BCES-2014), Phuket, Jan 21-22, 2014.