

การนำน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิส

เนาวรัตน์ ชมภูงูช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

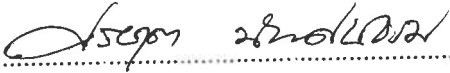
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา


กุมภาพันธ์ 2563

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยบูรพา


คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา  
วิทยานิพนธ์ของ เนาวรัตน์ ชมภูนุช ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

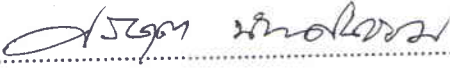
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์


 ..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรีสุดา นิเทศน์ธรรม)


 ..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอมมา อาสนจินดา)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

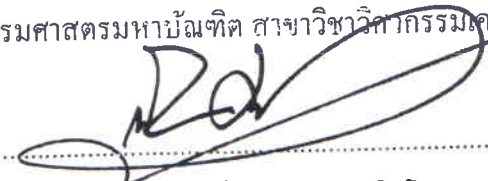
 ..... ประธาน  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไชยยันต์ ไชยยะ)

 ..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรีสุดา นิเทศน์ธรรม)

 ..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอมมา อาสนจินดา)

 ..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แดง แซ่เปี๊ยะ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ของมหาวิทยาลัยบูรพา

 ..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ญยศ คุณกิจโกศล)

วันที่ 24 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นโครงการวิจัยภายใต้โปรแกรมวิจัยการจัดการกากอุตสาหกรรม-นโยบายและแนวปฏิบัติ (Industrial Waste Management-Policies and Practices) โดยศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.)

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรีสุดา นิเทศน์ธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอ็มมา อาสนจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้โอกาส สนับสนุน และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ไชยยันต์ ไชยยะ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แดง แซ่เบ๊ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้เกียรติร่วมเป็นประธานและคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณบริษัท เบรฟ เทคโนโลยี จำกัด ที่ให้คำปรึกษาในการออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสต้นแบบ ขอขอบคุณบริษัท แสงวิทย์ ชายนี่ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวัดปริมาณซัลเฟอร์ในน้ำมัน ขอขอบคุณ คุณสุดใจ ผุฒผาด เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนและให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีในการวิเคราะห์ GC-MS และ TGA สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัวและเพื่อน ๆ ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนด้านการศึกษา ตลอดจนครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้แก่ข้าพเจ้าจนประสบความสำเร็จในการศึกษา

เนาวรัตน์ ชมภูนุช

60910109: สาขาวิชา: วิศวกรรมเคมี; วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี)

คำสำคัญ: ไพโรไลซิส/ น้ำมันเครื่องยนต์/ ตัวเร่งปฏิกิริยา/ การจัดการสิ่งแวดล้อม/

เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสต้นแบบ

เนาวรัตน์ ชมภูษ: การนำน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิส (RECOVERY OF USED ENGINE OIL BY PYROLYSIS DISTILLATION PROCESS) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: ศรีสุดา นิเทศน์ธรรม, Ph.D., เอมมา อาสนจินดา, Ph.D. 93 หน้า. ปี พ.ศ. 2563.

การนำน้ำมันเครื่องยนต์กลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิส เพื่อเปลี่ยนน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วให้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถใช้งานทดแทนน้ำมันดีเซล ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบคู่ (Two-stage reactor) และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์และคอลัมน์กลั่นน้ำมัน อัตราการไหลของแก๊สตัวพา และอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด ได้แก่  $Fe_2O_3$ ,  $Na_2CO_3$  และ Bentonite จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิมีอิทธิพลโดยตรงต่อกระบวนการไพโรไลซิสที่มีปฏิกิริยาหลัก คือ Thermal cracking และการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สตัวพาช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนของ น้ำมันตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งส่งผลต่อการแตกตัวของน้ำมันในปฏิกิริยาดังกล่าว โดยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันไพโรไลซิส ได้แก่ อุณหภูมิไพโรไลซิสเท่ากับ  $400^{\circ}C$  อุณหภูมิในคอลัมน์กลั่นน้ำมันเท่ากับ  $250^{\circ}C$  และอัตราการไหลของแก๊สตัวพาเท่ากับ  $30 \text{ mL/min}$  ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวสามารถผลิตน้ำมันไพโรไลซิสที่มีองค์ประกอบของเนฟทา เคโรซีน และแก๊ส ออยล์รวมกันสูงที่สุด และสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิส ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ และความหนืด มีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐานของน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว ในขณะที่จุดวาบไฟยังมีค่าที่ต่ำกว่ามาตรฐาน ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการเกิดปฏิกิริยา Catalytic cracking พบว่า  $Na_2CO_3$  มีความสามารถในการเลือกเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ โดยน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จะมีองค์ประกอบของ Heavy oil เจือปนอยู่ และการใช้  $Fe_2O_3$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ปริมาณน้ำมันไพโรไลซิสต่ำกว่า  $Na_2CO_3$  แต่มีความสามารถในการลดปริมาณซัลเฟอร์ในน้ำมันอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา Bentonite ให้ปริมาณน้ำมันไพโรไลซิสค่าที่ต่ำที่สุดแต่มีความสามารถในการเลือกเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเนฟทาสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสไม่มีผลในการเพิ่มค่าจุดวาบไฟของน้ำมัน แต่พบว่าการเพิ่มค่าจุดวาบไฟสามารถทำได้ด้วยการนำน้ำมันไพโรไลซิสมากลั่นซ้ำอีกครั้ง

60910109: MAJOR: CHEMICAL ENGINEERING; M.Eng. (CHEMICAL ENGINEERING)

KEYWORDS: USED ENGINE OIL/ PYROLYSIS DISTILLATION/ CATALYST/ WASTE  
MANAGEMENT/ PYROLYSIS REACTOR

NAOWARAT CHOMPOONUCH: RECOVERY OF USED ENGINE OIL BY  
PYROLYSIS DISTILLATION PROCESS. ADVISORY COMMITTEE: SRISUDA  
NITHETHAM, Ph.D., EMMA ASNACHINDA, Ph.D. 93 P. 2020.

This research focuses on producing diesel-like fuel oil from used engine oil by pyrolysis distillation process. Two-stage reactor was employed for pyrolysis of used engine oil in this study. The operating conditions affected on the pyrolysed oil were studied as following: pyrolysis temperature, distillation temperature and carrier gas flowrate. The effect of catalysts ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , bentonite) on the pyrolysis of used engine oil was also investigated. The results revealed that thermal cracking, primary reaction in pyrolysis process, was directly affected by pyrolysis temperature. An increase in carrier gas flowrate could improve the heat transfer in raw used oil during pyrolysis. The optimum condition for pyrolysis of used engine oil was found by using pyrolysis temperature at  $400^\circ\text{C}$ , distillation temperature at  $250^\circ\text{C}$  and carrier gas flowrate at 30 mL/min. By using such condition, pyrolysed oil with the maximum compositions of naphtha, kerosene and gasoil was obtained. The properties of pyrolysed oil such as specific gravity and viscosity met the value of diesel standard except the flash point. According to the effect of catalysts, we found that  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  catalyst had the high selectivity with large molecule of hydrocarbons, resulting in the presence of heavy oil in pyrolysed oil. Moreover,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  yielded the higher amount of pyrolysed oil than  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  while the later was highly effective for removing sulfur from pyrolysed oil. Bentonite had higher selectivity for producing naphtha than the other catalysts but it yielded the lowest amount of pyrolysed oil. However, flash point of pyrolysed oil was not improved by using catalyst. It was found that flash point can be improved by re-distillation of pyrolysed oil.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ .....	5
กระบวนการไฟโรไลซิส.....	14
เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฟโรไลซิสน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว.....	19
ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	25
สมบัติของน้ำมันดีเซล.....	32
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบสำหรับกระบวนการกลั่นแบบไฟโรไลซิส และกระบวนการทำงาน.....	35
การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาช่วงอุณหภูมิในกระบวนการไฟโรไลซิส.....	39
การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการไฟโรไลซิส.....	39
การศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไฟโรไลซิส.....	42
การคำนวณสมดุลมวลสารและร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์.....	43
การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางพลังงาน.....	43
การวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วและน้ำมันไฟโรไลซิส.....	43

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลอง.....	46
การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาช่วงของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส.....	46
การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการไพโรไลซิส.....	51
ผลของการศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	68
การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางพลังงาน.....	73
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	74
สรุปผลการศึกษาผลสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิส และอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	74
ข้อเสนอแนะ.....	75
บรรณานุกรม.....	77
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก.....	82
ภาคผนวก ข.....	84
ภาคผนวก ค.....	91
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	93

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากน้ำมันดิบชนิดต่าง ๆ .....	6
2-2	สารเพิ่มคุณภาพหลักในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์.....	9
2-3	สถานะของกระบวนการและผลิตภัณฑ์หลักของกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่าง ๆ .....	16
2-4	สมบัติของน้ำมันดีเซลตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน.....	33
3-1	คุณลักษณะจำเพาะของเครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบ.....	37
3-2	แผนการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการไพโรไลซิส.....	40
3-3	เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพน้ำมัน.....	44
4-1	ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมแบ่งตามช่วงการกลั่น.....	49
4-2	ประเภทและปริมาณสารประกอบเจือปนในน้ำมันไพโรไลซิส.....	50
4-3	สมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว.....	54
4-4	ช่วงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ.....	54
4-5	สมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยวและแบบคู่.....	58
4-6	สมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพา.....	62
4-7	สมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการกลั่น.....	66
4-8	ผลิตภัณฑ์ที่แบ่งตามช่วงจำนวนคาร์บอนของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400°C.....	70
4-9	สมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการไพโรไลซิสที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	72
4-10	ค่าพลังงานความร้อนจากน้ำมันไพโรไลซิสเปรียบเทียบกับน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว.....	73



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1	ส่วนประกอบของน้ำมันเครื่องยนต์..... 5
2-2	ส่วนประกอบของน้ำมันเครื่องยนต์ชนิดต่าง ๆ ..... 11
2-3	ภาวะการดำเนินการของกระบวนการแปลงสภาพทางเคมีความร้อน..... 14
2-4	กลไกของกระบวนการไพโรไลซิสอย่างง่าย..... 17
2-5	การนำผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไปใช้ประโยชน์..... 18
2-6	กระบวนการเปลี่ยนขยะให้เป็นเชื้อเพลิง..... 19
2-7	กระบวนการไพโรไลซิสอย่างง่าย..... 20
2-8	เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง..... 21
2-9	เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (1)..... 22
2-10	เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (2)..... 23
2-11	เครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้ไมโครเวฟ..... 24
2-12	เครื่องปฏิกรณ์แบบถ่วงถ่วงต่อเนื่อง..... 25
2-13	Oxygen vacancy ในโครงสร้างของ $Fe_2O_3$ ..... 31
2-14	กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ $Fe_2O_3$ ..... 31
3-1	แผนภาพของกระบวนการไพโรไลซิสแบบขั้นตอนเดียวด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว..... 36
3-2	แผนภาพของกระบวนการไพโรไลซิสแบบสองขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่..... 36
4-1	กราฟ TG และ DTG ของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว..... 46
4-2	ร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ..... 47
4-3	องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400°C 450°C และ 500°C..... 48
4-4	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว..... 52
4-5	ลักษณะทางกายภาพของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยวที่อุณหภูมิ ก) 350°C ข) 400°C และ ค) 500°C..... 53

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-6	ปริมาณองค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว.....	55
4-7	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยวและแบบคู่.....	56
4-8	ลักษณะทางกายภาพของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วย ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว และ ข) เครื่องปฏิกรณ์แบบคู่.....	57
4-9	ปริมาณองค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยวและแบบคู่.....	59
4-10	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสที่มีอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่แตกต่างกัน.....	60
4-11	ลักษณะทางกายภาพของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สตัวพา ก) 15 ข) 30 ค) 50 และ ง) 100 mL/min.....	61
4-12	ปริมาณองค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สตัวพา.....	63
4-13	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการกลั่น..	64
4-14	ลักษณะทางกายภาพของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการกลั่น ก) 250°C ข) 300°C และ ค) 350°C.....	65
4-15	ปริมาณองค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการกลั่น.....	67
4-16	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.	68
4-17	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น (%Conversion) ที่ได้จากการไพโรไลซิสที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	69

# บทที่ 1

## บทนำ

### ที่มาและความสำคัญ

สถานการณ์การใช้น้ำมันของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2561 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเป็นผลจากจำนวนรถที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2561) ในปัจจุบันประเทศไทยมีรถยนต์และรถขนส่งจดทะเบียนกับกรมขนส่งทั้งสิ้น 39 ล้านคัน (กลุ่มสถิติการขนส่ง กองแผนงาน กรมการขนส่งทางบก, 2561) โดยรถยนต์ทุกคันจำเป็นต้องได้รับการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องตามระยะทางหรือเวลาที่ศูนย์บริการรถยนต์กำหนด รวมทั้งสภาพการใช้งานก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลให้น้ำมันเครื่องเสื่อมสภาพ จึงมีน้ำมันเครื่องใช้แล้วจำนวนมากที่ต้องถูกกำจัดซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของเสียอันตรายและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปนเปื้อนในแหล่งน้ำ เนื่องจากน้ำมันเครื่องใช้แล้วจะประกอบด้วยโลหะหนักและสารประกอบอะโรมาติกอันเป็นสารอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ ที่มาจากสารเพิ่มคุณภาพ (Randles, Mazur, & Milanes, 2007) แต่นอกจากนี้จากสารเพิ่มคุณภาพ (Additives) น้ำมันเครื่องยังมีส่วนประกอบของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานหรือน้ำมันปิโตรเลียม (Base oil) ที่สามารถนำกลับไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงสามารถพัฒนาสมบัติให้เหมาะสมเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในรถยนต์ได้ ดังนั้นการศึกษาและพัฒนากระบวนการที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับน้ำมันเครื่องใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจในปัจจุบันและอนาคต

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่เป็นส่วนประกอบของน้ำมันเครื่องมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวมีคาร์บอนตั้งแต่ 13-50 และมีการเติมสารเพิ่มคุณภาพเพื่อปรับปรุงสมบัติของน้ำมันเครื่องให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น สารป้องกันการกัดกร่อน สารป้องกันสนิม สารเพิ่มความหนืด สารต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศ สารป้องกันการเกิดฟอง ฯลฯ ทำให้น้ำมันเครื่องใช้แล้วมีสารเคมีอันตรายรวมถึงเศษโลหะที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายในเครื่องยนต์เจ็ปอยู่ในปริมาณมากและต้องได้รับการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Extraction) การดูดซับด้วยวัสดุจากธรรมชาติ (Adsorption) (Mohammed, Ibrahim, Taha, & McKay, 2013; Salem, Salem, & Babaei, 2015) และการชะล้างด้วยสารเคมี (Hamawand, Yusaf, & Rafat, 2013) วิธีการดังกล่าวนี้สามารถ

ช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วได้ แต่ยังมีข้อจำกัดในส่วนของวิธีการที่ต้องใช้ สารเคมีซึ่งเป็นวัสดุสิ้นเปลืองและเกิดของเสียเพิ่มมากขึ้น และได้น้ำมันที่เป็นผลิตภัณฑ์ใน ปริมาณน้อย อีกทั้งยังเป็นวิธีการที่ซับซ้อนสามารถทำได้เฉพาะในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นในงานวิจัย ส่วนใหญ่จึงศึกษาการเปลี่ยนน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วให้กลายเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการ ไพโรไลซิส ซึ่งเป็นการให้ความร้อนแก่น้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วในสภาวะที่ไม่มีแก๊สออกซิเจน ทำให้เกิดการแตกตัวทางความร้อนของพันธะเคมีในน้ำมัน (Thermal cracking) เกิดเป็น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่สั้นลงซึ่งเทียบได้กับสายโซ่คาร์บอนของแก๊สโซลีน ( $C_5-C_{12}$ ) และน้ำมันดีเซล ( $C_8-C_{24}$ ) นอกจากนี้กระบวนการไพโรไลซิสยังให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส และ ถ่านชาร์ ในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในกระบวนการ เช่น อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ ในการทำปฏิกิริยา เป็นต้น (ศิริรัตน์ จิตการคำ, 2551) แต่เนื่องจากการปนเปื้อนของ สารเพิ่มคุณภาพที่เสื่อมสภาพนั้นทำให้น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้มีความบริสุทธิ์ต่ำ ส่งผลให้ ไม่สามารถจำหน่ายเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้เนื่องจากข้อจำกัดด้านคุณภาพของน้ำมัน จึงจำเป็นต้อง ปรับปรุงคุณภาพให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานตามข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงาน ซึ่งการออกแบบกระบวนการและเครื่องมือที่เหมาะสม รวมถึงการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถ ช่วยเพิ่มคุณภาพให้กับน้ำมันไพโรไลซิส

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีผู้ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์รูปแบบ ต่าง ๆ เช่น งานวิจัยของ Bhaskar et al. (2004) ได้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้เตาเผาแนวตั้งหรือ Fixed bed reactor ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจะ สามารถถูกเปลี่ยนเป็นน้ำมันไพโรไลซิสได้ในปริมาณน้อย เตาเผาจึงเหมาะสมในการศึกษา ปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ไม่เหมาะสำหรับการพัฒนาในเชิงพาณิชย์ งานวิจัยบางส่วนจึงใช้ การไพโรไลซิสแบบใช้เตาเผาแนวนอนหรือ Tubular furnace (Khan et al., 2016; Sinag, Gulbay, Uskan, Ucar, & Ozgurler, 2010) ซึ่งการใช้เตาเผาในลักษณะนี้ก็ยังมีมุ่งเน้นเพื่อศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา มากกว่าการผลิตน้ำมันไพโรไลซิส เพราะผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีปริมาณที่น้อย นอกจากนี้ยังมีงานวิจัย ที่พัฒนาแหล่งให้ความร้อนในการไพโรไลซิสน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ (Lam, Russell, & Chase, 2010) ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้กล่าวถึงวิธีนี้เป็นเทคโนโลยีที่กำลังพัฒนา เนื่องจากมีความคุ้มค่าทางพลังงานและสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนไปยังวัตถุดิบมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้เตาเผาไฟฟ้า แต่มีต้นทุน ในการสร้างค่อนข้างสูงและได้ผลิตภัณฑ์ในปริมาณน้อยซึ่งเป็นข้อจำกัดในการพัฒนาเชิงพาณิชย์ สำหรับการถลุงแบบไพโรไลซิสที่มีความจุในระดับกึ่งการค้า (Semi-commercial) ในการเปลี่ยนน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วให้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวที่เทียบเคียงน้ำมันดีเซลด้วย

เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนหรือ Stirred tank reactor ขนาดความจุ 25 ลิตร (Arpa, Yumrutas, & Demirbas, 2010) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณและคุณภาพที่เหมาะสมกับการพัฒนาในเชิงพาณิชย์ แต่กระบวนการนี้ยังมีต้นทุนค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ การออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์ที่สามารถกำจัดน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วได้ในราคาถูกและมีประสิทธิภาพจึงเป็นแนวคิดที่ได้รับการสนับสนุนในการทำวิจัยนี้

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบ สร้างและทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสต้นแบบ ขนาดความจุ 300 mL ที่มีส่วนประกอบแบ่งเป็น 3 หน่วยหลัก คือ หน่วยไพโรไลซิส หน่วยการกลั่น และหน่วยควบแน่น เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา Thermal cracking รวมถึงปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีสมบัติใกล้เคียงกับมาตรฐานน้ำมันดีเซลโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด ได้แก่  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ Bentonite ร่วมในกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งจากการศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ในงานวิจัยต่าง ๆ พบว่า มีวัตถุประสงค์ของการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดยในงานวิจัยของ Arpa et al. (2010) กล่าวว่า สารประกอบเกลือของโลหะ เช่น  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  สามารถเพิ่มอุณหภูมิของจุดควบไไปได้จาก  $26^\circ\text{C}$  เป็น  $43^\circ\text{C}$  เมื่อใส่  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ในปริมาณ 10wt% และได้มีการรายงานว่าตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทโลหะออกไซด์ เช่น  $\text{CaO}$  ในปริมาณ 10wt% สามารถลดปริมาณซัลเฟอร์ที่เจือปนในน้ำมันไพโรไลซิสจาก 5,000 mg/kg เหลือ 2,500 mg/kg อีกทั้งในงานวิจัยของ Cheng, Yuhua Wang, Takahashi, Li, and Yoshikawa (2016) พบว่า  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  สามารถช่วยลดปริมาณซัลเฟอร์ที่เจือปนในกากตะกอนน้ำมัน (Oil sludge) เนื่องจากสารประกอบออกไซด์ของโลหะมี Oxygen vacancy ที่สามารถจับกับสารประกอบซัลเฟอร์ได้ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทซีโอไลต์หรือ Bentonite ที่เป็น Mixed oxide และมีบริเวณ Acid sites ที่คล้ายคลึงกับ ZSM-5 (Aho et al., 2008) ซึ่งอาจจะสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาในส่วนของ Catalytic cracking ร่วมกับปฏิกิริยา Thermal cracking ในกระบวนการไพโรไลซิส โดยงานวิจัยนี้คาดหวังว่าจะสามารถเปลี่ยนน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วเป็นน้ำมันไพโรไลซิสที่มีคุณภาพด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่ถูกออกแบบมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบสำหรับกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิสของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว ได้แก่ อุณหภูมิ ไพโรไลซิส อุณหภูมิในคอลัมน์กลั่นน้ำมัน และอัตราการไหลของแก๊สตัวพา

3. ศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ Bentonite ที่มีผลในเชิงปริมาณและคุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิส

### ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทดสอบการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสต้นแบบ เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส ดังต่อไปนี้

1.1 ศึกษาอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยวในช่วงอุณหภูมิ 350-500°C

1.2 ศึกษาผลของกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่เปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว

1.3 ศึกษาอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในช่วง 15-100 mL/min

1.4 ศึกษาอุณหภูมิของกระบวนการกลั่นในช่วง 250-350°C

1.5 ศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ Bentonite ในปริมาณ 3wt%

2. วิเคราะห์สมบัติเชิงคุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิส ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความหนืด ค่าพลังงานความร้อน จุดวาบไฟ วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละช่วงการกลั่นด้วยเครื่อง Distillation gas chromatography (DGC) และหาลองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Gas chromatography-Mass spectrometer (GC-MS)

3. วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางพลังงาน โดยเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้กับค่าพลังงานความร้อนของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วตั้งต้น

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถช่วยลดปริมาณของเสียจากน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วเพื่อแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย

2. สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วให้เป็นน้ำมันไพโรไลซิสที่มีคุณภาพเทียบเคียงกับน้ำมันดีเซลและอาจจะสามารถใช้ทดแทนกันได้ เครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกล

3. เสนอแนะวิธีการที่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (Lubricant oil)

น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์หรือเรียกกันโดยทั่วไปว่า น้ำมันหล่อลื่น หรือน้ำมันเครื่องยนต์ ซึ่งหมายถึงน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่มีการสันดาปภายในทั้งในเครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล โดยจะทำหน้าที่หล่อลื่นชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่เคลื่อนไหวภายในเครื่องยนต์ เช่น ลูกสูบ เพลา ลูกเบี้ยว และแบริ่ง ต่าง ๆ เป็นต้น การผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปที่มีคุณภาพดีและเหมาะสมกับการใช้งานสำหรับเครื่องยนต์แต่ละชนิดนั้น จะแบ่งขั้นตอนในการผลิตออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และการผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปโดยการเติมสารเพิ่มคุณภาพต่าง ๆ ลงในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ส่วนประกอบของน้ำมันหล่อลื่นดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 ส่วนประกอบของน้ำมันเครื่องยนต์

1. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base oil) (ประเสริฐ เทียนนิมิตร, ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์ และปานเพชร ชินินทร, 2554)

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันพืชหรือสัตว์ น้ำมันแร่ และน้ำมันสังเคราะห์ โดยส่วนใหญ่แล้วมักใช้น้ำมันแร่นำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป เพราะมีคุณภาพดีและราคาถูก ส่วนน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากสัตว์และน้ำมันสังเคราะห์นั้น จะนำไปใช้ในงานที่ต้องการสมบัติพิเศษต่าง ๆ บางอย่างเท่านั้น โดยที่มาของแหล่งน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีดังนี้

##### 1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืชหรือสัตว์ (Vegetable or Animal base oil)

น้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้เคยนิยมใช้ในอดีตแต่ปัจจุบันมีการใช้น้อยมาก เนื่องจากน้ำมันจากพืชหรือสัตว์จะมีความคงตัวทางเคมีต่ำ เสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะใช้งาน เมื่อนำมาใช้จะต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ทำให้ราคาแพงมากจึงทำให้ไม่นิยมใช้ แต่จะใช้เฉพาะในงานหล่อลื่น

ที่ต้องการสมบัติพิเศษบางอย่างเท่านั้น ส่วนใหญ่มักใช้เป็นตัวเติมสำหรับเพิ่มคุณภาพ ให้แก่น้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียมเพื่อเพิ่มความข้น และความสามารถในการผสมเข้ากับน้ำได้ เป็นต้น ตัวอย่างของน้ำมันพืชที่ถูกนำมาใช้ ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง และน้ำมันปาล์ม ส่วนน้ำมันจากสัตว์ ได้แก่ น้ำมันหมู และน้ำมันปลา เป็นต้น

### 1.2 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมหรือน้ำมันแร่ (Mineral base oil)

น้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้เป็นน้ำมันที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีคุณภาพดีและราคาถูก โดยได้มาจากการกลั่นน้ำมันดิบในหอกลั่น ซึ่งส่วนที่เป็นน้ำมันเบา เช่น แก๊สธรรมชาติ แก๊สหุงต้ม แก๊สโซลีน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล จะระเหยเป็นไอแยกออกมาตามจุดเดือด ส่วนที่เป็นน้ำมันหนักมีจุดเดือดสูงจะไม่ระเหยและเหลืออยู่ใต้หอกลั่นบรรยากาศและจะถูกนำมากลั่นซ้ำอีกครั้งที่หอกลั่นสุญญากาศ เช่น น้ำมันเตา ไข และยางมะตอย และแยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดไฮและชนิดชั้นออกมา ที่เหลือเป็นกากซึ่งสามารถนำไปผลิตยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมากลั่น น้ำมันดิบบางชนิดก็ไม่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตน้ำมันแร่ เช่น น้ำมันแร่ที่ได้จากน้ำมันดิบพวกพาราฟินิกมักจะมีไขสูง จะต้องผ่านกระบวนการกำจัดเอาไขออก โดยสามารถแยกสมบัติได้ 3 พื้นฐาน ซึ่งขึ้นอยู่กับฐานของน้ำมันปิโตรเลียมที่นำมาใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากน้ำมันดิบชนิดต่าง ๆ

ประเภทน้ำมันปิโตรเลียม	สมบัติ
1. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบมาตรฐานพาราฟินิก (Paraffinic base oil)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีจุดวาบไฟสูง มีการระเหยตัวต่ำ</li> <li>- รักษาสมบัติทางเคมีไว้ได้ดี</li> <li>- จุดไหลเทสูง มีสมบัติหล่อลื่นได้ดี</li> <li>- มีความถ่วงจำเพาะต่ำ</li> <li>- เกิดไขได้ดี มีค่าดัชนีความข้นในสูง</li> <li>- ถ้าเผาไหม้จะให้เขม่าแข็ง แต่หลุ่ร้อนได้ง่าย</li> <li>- โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนยึดเกาะกันเหนียวแน่น ทำให้ฟิล์มน้ำมันแตกตัวได้ยาก</li> <li>- มีความต้านทานการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดี</li> <li>- ฟิล์มน้ำมันเหนียวและแข็งแรง</li> </ul>



## ตารางที่ 2-1 (ต่อ)

ประเภทน้ำมันปิโตรเลียม	สมบัติ
2. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบ ฐานแนฟทินิก (Naphthenic base oil)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีจุดวาบไฟต่ำ</li> <li>- มีการระเหยตัวต่ำ</li> <li>- รักษาสมบัติโครงสร้างทางเคมีได้ดีพอสมควร</li> <li>- จุดไหลเทต่ำ</li> <li>- มีความถ่วงจำเพาะสูงและรวมตัวกันได้ดี</li> <li>- มีสมบัติทางการหล่อลื่นต่ำ</li> <li>- มีค่าดัชนีความข้นใสต่ำ</li> <li>- เมื่อเผาไหม้จะให้เขม่าที่อ่อนตัว</li> <li>- การยึดเกาะโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนดีเป็นบางส่วน</li> <li>- มีความต้านทานการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนต่ำ</li> </ul>
3. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบ อะโรมาติก (Aromatic base oil)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีค่าดัชนีความข้นใสต่ำ</li> <li>- จุดไหลเทต่ำมาก</li> <li>- ไม่มีไข</li> <li>- มีสมบัติทางการหล่อลื่นไม่ดี</li> <li>- โครงสร้างการจับตัวระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนไม่เสถียร</li> <li>- ไม่รักษาสมบัติทางเคมีให้แน่นอน</li> <li>- มีความถ่วงจำเพาะสูง</li> </ul>

1.3 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic base oil) เป็นน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียมส่วนใหญ่ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานพิเศษเฉพาะที่ต้องการสมบัติพิเศษในด้านดัชนีความข้นใสสูง จุดไหลเทต่ำ และมีการระเหยต่ำ เป็นต้น น้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้กันมากมีอยู่หลายชนิด และมีราคาค่อนข้างแพงมาก ตัวอย่างของน้ำมันสังเคราะห์ที่นิยมใช้กันมากมีดังนี้

1.3.1 โพลีแอลฟาโอเลฟิน (Polyalphaolefin; PAO) เป็นสารที่มีค่าดัชนีความข้นใสสูงมาก มีจุดไหลเทต่ำ การระเหยตัวต่ำ และมีความต้านทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันดี ปัจจุบันเริ่มนิยมใช้กันมากขึ้น เพราะราคาถูกลงและสามารถผลิตได้ง่าย

1.3.2 เอสเทอร์ (Ester) ไดเอสเทอร์ (Diester) และคอมเพล็กซ์เอสเทอร์ (Complex Ester) เป็นสารที่มีค่าดัชนีความข้นใสสูงมาก การระเหยตัวต่ำ และมีความอยู่ตัวดี ใช้เป็นน้ำมันพื้นฐานในงานที่ต้องทำงานกับสภาวะที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงมาก ๆ เช่น น้ำมันเทอร์ไบของเครื่องบิน ไอพ่น นอกจากนี้พวกฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate ester) ก็ยังใช้ทำพวกน้ำมันไฮดรอลิกส์ที่ไม่ติดไฟ หรือที่เรียกกันว่าน้ำมันทนไฟ

1.3.3 โพลีไกลคอล (Polyglycol) เป็นสารที่มีจุดเดือดสูงและจุดไหลเทต่ำ นิยมใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ใช้ทำน้ำมันเบรก และน้ำมันไฮดรอลิกส์ที่ไม่ติดไฟ เป็นต้น

1.3.4 ซิลิโคน (Silicone) ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานที่ใช้อุณหภูมิสูง

1.3.5 ฮาโลจีเนตไฮโดรคาร์บอน (Halogenated hydrocarbon) เช่น คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbons) หรือสารซีเอฟซี (CFC) ใช้ทำน้ำมันสำหรับเครื่องอัดออกซิเจนเพราะมีความอยู่ตัวทางเคมีและความอยู่ตัวเชิงความร้อนดีมาก

1.3.6 โพลีฟีนีลอีเทอร์ (Polyphenyl ether) เป็นสารที่ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูงมาก ถึง 800°C เช่น น้ำมันไฮดรอลิกส์ในยานอวกาศ เนื่องจากมีความอยู่ตัวเชิงความร้อนสูงมาก และมีความสามารถในการต้านทานต่อรังสีนิวเคลียร์ได้ด้วย

## 2. สารเพิ่มคุณภาพ (Additives)

น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ดีจะต้องมีสารเพิ่มคุณภาพผสมอยู่ด้วย เพื่อเสริมให้น้ำมันมีคุณภาพสูงขึ้น และทำหน้าที่ต่าง ๆ ได้อย่างครบถ้วน ทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงและยืดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ โดยสารเพิ่มคุณภาพหลักดังตารางที่

ตารางที่ 2-2 สารเพิ่มคุณภาพหลักในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์

ประเภทของสารเพิ่มคุณภาพ	ชนิดของสารเคมี	ประโยชน์
1. สารต้านทาน การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Anti-Oxidants)	- ZDDP - Bis-Phenol - Aromatic amine	- ใช้กับน้ำมันหล่อลื่นในงานที่มีอุณหภูมิสูงและน้ำมันต้องสัมผัสอากาศ - ใช้ลดการเกิดยางเหนียวและตะกอนจากน้ำมัน ยืดอายุการใช้งานของน้ำมัน
2. สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion Inhibitors)	- สารเพิ่มความเป็นด่าง ซัลโฟเนตฟอสเฟต - High base additives - ZDDP - ฟอสโฟซัลฟูไรซ์เทอร์ปีน	ใช้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของสารเคมี เช่น กรดที่จะกระทำต่อผิวชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล เช่น ในเครื่องยนต์
3. สารป้องกันการสึกหรอ (Anti-Wear Additives)	- ZDDP - ไตรครีซิลฟอสเฟต	ใช้เพื่อป้องกันการสึกหรอของผิวชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่รับภาระน้ำหนักสูง ซึ่งมักจะเกิด Boundary Lubrication ขึ้น
4. สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (Detergents and Dispersants)	- เมทาลิกซัลโฟเนต ฟีนอล และฟอสเฟต - เอมีน ฟีนอล - Alkyl substitute salisylate - ซักซินีมีด	ใช้ชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวชิ้นส่วนของเครื่องจักรและกระจายมิให้รวมตัวเป็นโคลน ตะกอน จำเป็นสำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์
5. สารเพิ่มค่าดัชนีความข้นใส (Viscosity-Index Improver)	- Polyisobutylene - Methacrylate - Acrylate co-polymer	ใช้ลดอัตราการเปลี่ยนแปลงความข้นใสตามอุณหภูมิของน้ำมัน ใช้ในน้ำมันชนิดมัลติเกรดหรือเกรดรวม

## ตารางที่ 2-2 (ต่อ)

ประเภทของสารเพิ่มคุณภาพ	ชนิดของสารเคมี	ประโยชน์
6. สารลดจุดไหลเท (Pour point depressants)	- Methacrylate polymer - แวกซ์อัลคิลเลตฟีนอล และ อิตส์โพลีเมอร์ - แวกซ์อัลคิลเลต แนทพาลีน และอิตส์โพลีเมอร์	ใช้ลดจุดแข็งตัวของน้ำมัน ซึ่งเกิดขึ้นเพราะไขในน้ำมัน แยกตัวเป็นผลึก โดยป้องกัน ไม่ให้ไขเกาะตัวเป็นกลุ่ม ทำให้น้ำมันสามารถไหลได้ ในอุณหภูมิต่ำ
7. สารป้องกันการเกิดฟอง (Anti-Foamants)	- Silicone polymer - Organic polymer	ใช้ป้องกันการเกิดฟองถาวร เมื่อน้ำมันถูกหมุนเวียนใช้ใน ระบบ เช่น ในอ่างน้ำมัน เครื่องยนต์ เกียร์ไฮดรอลิกส์

### 3. ประเภทของน้ำมันเครื่องยนต์ (กลุ่มพัฒนามาตรฐานน้ำมันหล่อลื่น, 2554)

น้ำมันเครื่องยนต์ในปัจจุบันแบ่งออกเป็นชนิดและเกรดที่เหมาะสมสำหรับใช้กับเครื่องยนต์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องแยกประเภทเพื่อให้เลือกใช้ได้อย่างถูกต้อง โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่

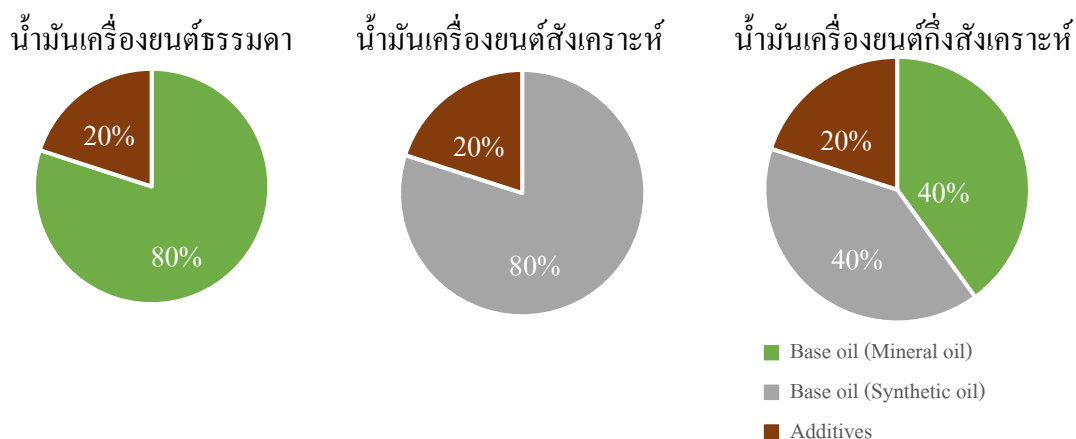
#### 3.1 แบ่งตามชนิดของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

3.1.1 น้ำมันเครื่องยนต์ธรรมดา (Conventional oil) ผลิตมาจากน้ำมันพื้นฐาน Base oil เป็นน้ำมันซึ่งได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ ที่เรียกว่า Mineral oils

3.1.2 น้ำมันเครื่องยนต์สังเคราะห์ (Synthetic oil) หรือ น้ำมันเครื่องสังเคราะห์ ซึ่งน้ำมันเครื่องยนต์ชนิดนี้จะผลิตมาจากน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี เพราะฉะนั้น ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์จึงสามารถเพิ่มสมบัติบางอย่างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับตัวน้ำมันเครื่องได้อย่างอิสระ น้ำมันเครื่องสังเคราะห์มีสมบัติทนทานต่อสภาพการใช้งานที่ความร้อนสูงได้ดี และไหลได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ อีกทั้งมีอายุการใช้งานนานกว่า น้ำมันเครื่องธรรมดา แต่ราคาน้ำมันเครื่องสังเคราะห์ก็สูงกว่าเช่นกัน

3.1.3 น้ำมันเครื่องกึ่งสังเคราะห์ (Semi-synthetic oil) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Synthetic blends เป็นน้ำมันเครื่องยนต์ที่ใช้ Base oil แบบผสม ซึ่งประกอบไปด้วย Base oil จากการสังเคราะห์ และ Base oil ที่กลั่นจากน้ำมันดิบซึ่งโดยส่วนมากจะผสม Base oil

แบบสังเคราะห์ลงไปเป็นปริมาณมากกว่า 30% ซึ่งสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 ส่วนประกอบของน้ำมันเครื่องยนต์ชนิดต่าง ๆ

3.2 แบ่งตามชนิดความหนืด เนื่องจากความหนืดจะมีส่วนสำคัญในการป้องกันการสึกหรอของชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ กล่าวคือ หากน้ำมันเครื่องยนต์ที่มีความหนืดน้อยเกินไป จะไม่สามารถคงสภาพเป็นฟิล์มบาง ๆ แทรกระหว่างผิวของโลหะ หรือถ้ามีความหนืดมากเกินไป ก็ไม่สามารถถูกปั๊มไปหล่อลื่นชิ้นส่วนต่าง ๆ ได้อย่างทั่วถึง โดยแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

3.2.1 น้ำมันเครื่องยนต์เกรดเดียว (Monograde) โดย SAE (Society of automotive engineers) หรือสมาคมวิศวกรยานยนต์แห่งสหรัฐอเมริกา ได้วางมาตรฐานโดยแบ่งตามค่าความข้นใส ได้แก่ SAE 0W 5W 10W 15W 20W 25W อักษร W (Winter) สำหรับใช้ในเขตหนาว และ SAE 20 30 40 50 และ 60 สำหรับใช้ในเขตร้อน โดยตัวเลขที่มากขึ้นแสดงถึงความหนืดที่สูงขึ้น

3.2.2 น้ำมันเครื่องยนต์เกรดรวม (Multigrade) เป็นการพัฒนาน้ำมันเครื่องยนต์ให้สามารถใช้งานได้ทั้งสภาพอากาศร้อนและเย็น น้ำมันเครื่องยนต์เกรดรวมจะมีค่าดัชนีความหนืดสูงสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศได้ดีกว่าน้ำมันเครื่องยนต์เกรดเดียว เช่น SAE 5W-40 10W-30 15W-40 และ 20W-50 เป็นต้น

3.3 แบ่งตามชั้นคุณภาพด้านการใช้งาน คุณภาพด้านการใช้งานถูกแบ่งออกด้วยมาตรฐาน API โดยสถาบันปิโตรเลียมแห่งสหรัฐอเมริกา (American petroleum institute) ที่กำหนดมาตรฐานน้ำมันเครื่องยนต์โดยแบ่งออกตามประเภทของเครื่องยนต์ ดังนี้

3.3.1 น้ำมันเครื่องยนต์สำหรับเครื่องยนต์เบนซิน จะใช้อักษร S (Station Service) นำหน้า เรียงตามลำดับ ได้แก่ API SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG, SH, SJ, SL, SM และสูงสุดในปัจจุบัน คือ SN โดย A, B, C,...,N เป็นการแบ่งระดับชั้นคุณภาพของน้ำมันเครื่องยนต์ที่ได้พัฒนาให้มีคุณภาพสูงขึ้น

3.3.2 น้ำมันเครื่องยนต์สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล จะใช้อักษร C (Commercial Service) นำหน้า เรียงตามลำดับ ได้แก่ API CA, CB, CC, CD, CD-II, CE, CF-4, CF, CF-2, CG-4, CH-4, CI-4, CI-4 PLUS และสูงสุดในปัจจุบัน คือ CJ-4

API บ่งบอกถึงคุณภาพและประสิทธิภาพของน้ำมันเครื่องยนต์ โดยน้ำมันเครื่องยนต์ที่กำหนดในปัจจุบันส่วนใหญ่มีการระบุ API ที่มีอักษร S และ C อยู่ด้วยกัน ซึ่งสามารถนำไปใช้ร่วมกับเครื่องยนต์เบนซินและดีเซล เช่น API SF/CF, CG-4/SG เป็นต้น แต่การนำไปใช้จะเหมาะสมกับเครื่องยนต์ประเภทใดมากกว่ากันให้สังเกตจากชั้นคุณภาพของ API นั้น ขึ้นต้นด้วยอักษร S หรือ C

ประเทศไทยมีการจำหน่ายน้ำมันเครื่องยนต์เกือบทุกชั้นคุณภาพ ยกเว้น SA, SB, CA, CB เนื่องจากเป็นชั้นคุณภาพที่ไม่มีสารเติมแต่งหรือมีน้อยมากจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน ซึ่งตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่น ได้กำหนดห้ามไม่ให้มีการจำหน่ายน้ำมันเครื่องยนต์ชั้นคุณภาพดังกล่าว

#### 4. หน้าที่ของน้ำมันเครื่องยนต์ (ประเสริฐ เทียนนิมิตร และคณะ, 2554)

4.1 ช่วยหล่อลื่น (Lubricate) น้ำมันเครื่องยนต์จะสร้างฟิล์มหรือเยื่อบาง ๆ เพื่อทำหน้าที่เคลือบผิวโลหะหรือชิ้นงานที่มีการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสีกันโดยตรง หรือเพื่อเป็นการลดการสึกหรอของชิ้นงาน ทำให้เครื่องยนต์มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น น้ำมันเครื่องยนต์ที่ดีจะต้องมีสมบัติในการคงความหนาของเยื่อน้ำมันและฟิล์มน้ำมันให้เกือบคงที่ตลอดเวลาแม้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ก็จะต้องไม่บางเกินไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และไม่หนาเกินไปเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ซึ่งสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้เรียกว่า ดัชนีความข้นใส (Viscosity index)

4.2 ช่วยระบายความร้อน (Coolant) น้ำมันเครื่องยนต์จะช่วยดูดซับความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในเครื่องยนต์ รวมถึงจะต้องลดอุณหภูมิหรือระบายความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบอกสูบ และควบคุมอุณหภูมิของเครื่องยนต์ให้เหมาะสม

4.3 ช่วยรักษาความสะอาด (Clean) เมื่อเครื่องยนต์ทำงานจะก่อให้เกิดสิ่งสกปรกหรือเขม่าตกค้างจากการเผาไหม้เกาะติดอยู่เป็นจำนวนมาก น้ำมันเครื่องยนต์จะมีสารชะล้างสิ่งสกปรกต่าง ๆ เมื่อไหลเวียนไปตามจุดต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ก็จะชำระล้างสิ่งสกปรกหรือเขม่าและตะกอนที่สะสมอยู่ไหลปะปนมากับน้ำมันเครื่องยนต์แล้วเข้าสู่ไส้กรองน้ำมันเครื่อง

4.4 ช่วยป้องกันการเกิดสนิมและการกัดกร่อน (Protect) กรดที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ถูกกัดกร่อน น้ำมันเครื่องยนต์จะเคลือบผิวชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ ป้องกันการเกิดสนิมและทำให้ความเป็นกรดลดลง และไม่สามารถไปกัดกร่อนโลหะของชิ้นงานได้

4.5 ช่วยกระจายความสกปรก (Dispersancy) น้ำมันเครื่องยนต์ที่ดีต้องมีคุณสมบัติในการกระจายสิ่งสกปรกต่าง ๆ เพื่อไม่ให้สิ่งสกปรกรวมตัวกันได้ง่ายและเกิดเป็นยางเหนียว ทำให้เครื่องยนต์เกิดความเสียหาย

4.6 ช่วยในการรักษากำลังอัดของเครื่องยนต์ น้ำมันเครื่องยนต์จะแทรกเข้าไประหว่างลูกสูบ แหวนลูกสูบ และกระบอกสูบ ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างแรงอัดให้กับเครื่องยนต์ ป้องกันแก๊สที่เป็นส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศไม่ให้เล็ดลอดผ่านช่องห่างระหว่างแหวน เพื่อไม่ให้กำลังอัดของเครื่องยนต์ที่อยู่บริเวณบนหัวลูกสูบรั่วไหลออกจากห้องเผาไหม้ จนทำให้เครื่องยนต์ไม่มีกำลัง

## 5. การเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่องยนต์ (กลุ่มพัฒนามาตรฐานน้ำมันหล่อลื่น, 2554)

น้ำมันเครื่องยนต์แต่ละชนิดถูกออกแบบเพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานของเครื่องยนต์ แต่เมื่อใช้ไประยะหนึ่งคุณภาพของน้ำมันเครื่องยนต์จะเสื่อมสภาพจนไม่เหมาะสมกับการใช้งานซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุดังต่อไปนี้

5.1 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันเครื่องยนต์ เมื่อน้ำมันเครื่องยนต์ถูกใช้งานในระยะเวลาาน สารเพิ่มคุณภาพป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันถูกใช้หมดไปหรือเสื่อมสภาพ น้ำมันก็จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศแล้วเกิดเป็นสารประเภทกรดและคราบยางเหนียว ปฏิกิริยานี้จะเกิดได้เร็วที่อุณหภูมิสูง ทำให้น้ำมันเครื่องยนต์เสื่อมสภาพ เกิดความเป็นกรด และความหนืดเพิ่มขึ้น เกิดยางเหนียว และในที่สุดก็จะเกิดการกัดกร่อนเนื้อโลหะในเครื่องยนต์

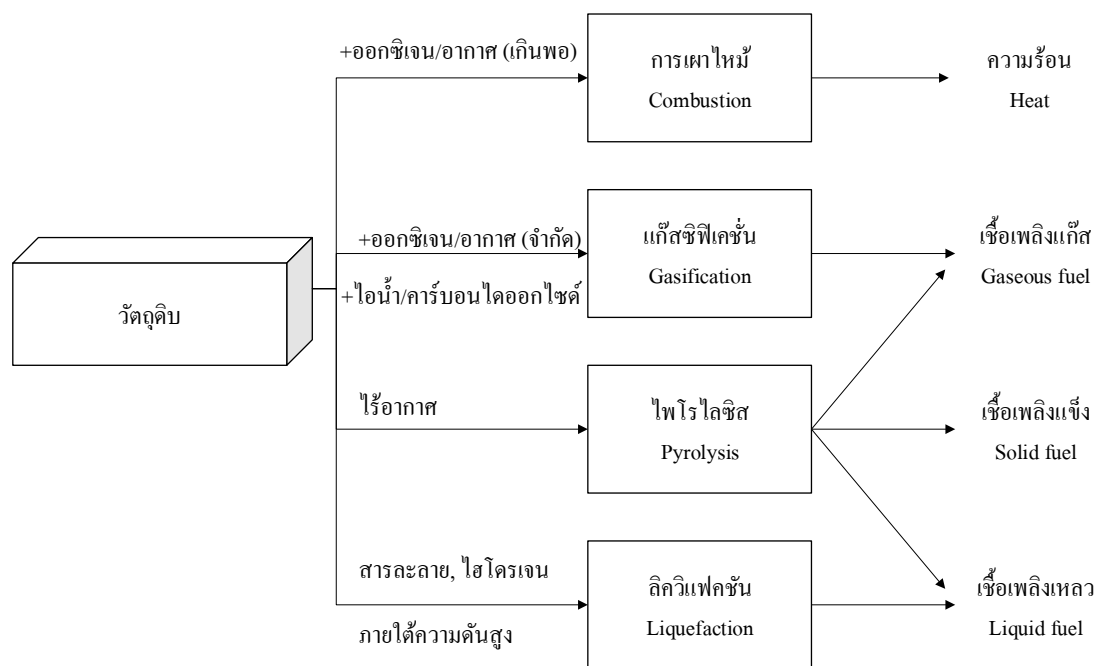
5.2 สารเพิ่มคุณภาพถูกใช้หมดไปหรือเสื่อมสภาพ เมื่อมีการใช้น้ำมันเครื่องยนต์เป็นระยะเวลาาน หรืออาจจะมีการเปลี่ยนเป็นสารอื่นที่ไม่ช่วยเพิ่มคุณภาพ ทำให้น้ำมันเครื่องยนต์ขาดสมบัติที่จะทำงานได้

5.3 สิ่งสกปรกจากภายนอกเข้าไปปนเปื้อนอยู่ในระบบ สารปนเปื้อนหรือสิ่งสกปรกที่สามารถเข้าไปปะปนกับระบบและส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่องยนต์ได้ เช่น น้ำอนุภาคของน้ำจะเข้าไปแทรกตัวในเนื้อน้ำมัน ทำให้น้ำมันเครื่องยนต์มีลักษณะขาว ขุ่น ความหนืดจะเปลี่ยนไป ทำให้ไม่เหมาะสมที่จะใช้งานได้ เศษโลหะ เมื่อมีเป็นปริมาณมากในเนื้อน้ำมันจะไปขูดกับผิวโลหะของเครื่องจักร ทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องจักร น้ำมันเชื้อเพลิง

เมื่อมีน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าไปปนเปื้อนในน้ำมันเครื่องยนต์ จะทำให้จุดวาบไฟ (Flash point) ของน้ำมันเครื่องยนต์ลดลง ทำให้เกิดอันตรายรวมถึงความหนืดของน้ำมันเครื่องยนต์ก็จะลดลงด้วย

### กระบวนการไพโรไลซิส (ประพันธ์ คูชดธารา และศศิธร สรรพอคำ, 2558)

การแปลงสภาพทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) เป็นกระบวนการที่อาศัยความร้อนร่วมกับปฏิกิริยาเคมี โดยทั่วไปหมายถึงกระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องประกอบไปด้วย การเผาไหม้ (Combustion) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) หรือลิกวิเฟกชัน (Liquefaction) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับภาวะการดำเนินการของกระบวนการดังภาพที่ 2-3

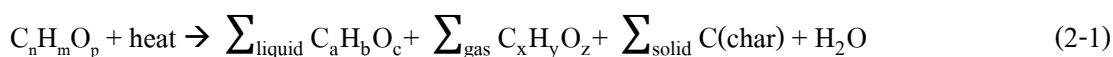


ภาพที่ 2-3 ภาวะการดำเนินการของกระบวนการแปลงสภาพทางเคมีความร้อน

จากภาพที่ 2-3 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไพโรไลซิสเป็นการแปลงสภาพทางเคมีความร้อนหรือการสลายตัวทางเคมีความร้อน (Thermochemical decomposition) ของวัตถุดิบในภาวะที่ไม่มีอากาศหรือแก๊สออกซิเจน และให้ผลิตภัณฑ์ได้ 3 สถานะ คือ แก๊ส ของแข็ง และของเหลว ซึ่งปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ในแต่ละสถานะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในกระบวนการ โดยจัดเป็นกระบวนการแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible process) และ



ต้องการพลังงานหรือความร้อนเพื่อสลายพันธะเคมีของโครงสร้างสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งสามารถเขียนสมการปฏิกิริยาอย่างง่ายได้ตามสมการที่ 2-1 ดังนี้



ไพโรไลซิสเป็นกลไกหลักที่เกิดในกระบวนการอื่น ๆ อาทิ การแตกตัว (Cracking) การปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization) คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) การสลายด้วยความร้อน (Thermolysis) ทำให้บางครั้งเมื่อกล่าวถึงกระบวนการดังกล่าวจะมีความหมายเดียวกับไพโรไลซิส นอกจากนี้ไพโรไลซิสถูกพิจารณาเป็นกระบวนการย่อยที่เกิดขึ้นในช่วงต้นของกระบวนการอื่นที่มีความซับซ้อนหรือมีส่วนร่วมทำปฏิกิริยา เช่น การเผาไหม้ แก๊สซิฟิเคชัน และลิกวิเฟกชัน โดยกระบวนการนี้จะเกิดในช่วงอุณหภูมิประมาณ 300-650°C

### 1. ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส

1.1 ไพโรไลซิสแบบช้า (Conventional pyrolysis) ไพโรไลซิสแบบช้าหรืออาจเรียกว่า คาร์บอนไนเซชัน เป็นกระบวนการที่ถูกนำมาใช้ตั้งแต่อดีตในการผลิตถ่านจากไม้ อุณหภูมิถูกเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในภาวะอับออกซิเจนหรืออากาศที่อุณหภูมิไม่สูงมากประมาณ 400°C และใช้เวลามากกว่า 24 ชั่วโมง เพื่อเพิ่มผลิตภัณฑ์ในส่วนของแข็งหรือถ่าน สำหรับไพโรไลซิสแบบช้าที่ไม่เน้นผลิตภัณฑ์ของแข็ง จะดำเนินการที่อุณหภูมิประมาณ 500-600°C และใช้เวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง

1.2 ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) ไพโรไลซิสแบบเร็วเน้นการเพิ่มผลิตภัณฑ์ในส่วนของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ วัตถุประสงค์จะถูกให้ความร้อนอย่างรวดเร็วไปที่อุณหภูมิที่เหมาะสมโดยเป็นอุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวสูงสุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ หากอุณหภูมิสูงกว่า 650°C ผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นแก๊สจะเพิ่มขึ้น อัตราการให้ความร้อนแบบเร็วอยู่ที่ประมาณ 1,000-10,000°C/s ไพโรไลซิสแบบเร็วนิยมใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพ และเพื่อให้ได้ร้อยละผลได้น้ำมันสูงที่สุดจำเป็นต้องควบคุมภาวะดำเนินการต่าง ๆ คือ อุณหภูมิของปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 400-600°C อัตราการให้ความร้อนเป็นไปอย่างรวดเร็ว เวลาในการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหยภายในเตาปฏิกรณ์สั้น (ไม่เกิน 3-5 วินาที) และการลดอุณหภูมิของไอระเหยจากการสลายตัวเป็นไปอย่างรวดเร็วด้วย

1.3 แฟลชไพโรไลซิส (Flash pyrolysis) กระบวนการนี้มีลักษณะคล้ายกับการไพโรไลซิสแบบเร็ว คือ ดำเนินการที่อุณหภูมิประมาณ 400-600°C แต่จะมีเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหยภายในเตาปฏิกรณ์สั้นมาก (น้อยกว่า 1 วินาที) ภายใต้ภาวะดำเนินการนี้พบว่า ร้อยละผลได้น้ำมันของของแข็ง (ชาร์) จะต่ำและร้อยละผลได้น้ำมันจะสูงถึงร้อยละ 70-75

1.4 ไฮโดรไพโรไลซิส (Hydro pyrolysis) การสลายตัวด้วยความร้อนในบรรยากาศของไฮโดรเจน (อัดความดัน) แต่อุณหภูมิดำเนินการจะต่ำกว่ากรณีของ ไฮโดรแก๊สซิฟิเคชัน ผลึกภัณฑ์ที่ได้จะเป็นของเหลวเพิ่มขึ้นจากการเกิดไฮโดรจิเนชันของอนุมูลอิสระ (Free radical) ที่เกิดขึ้นระหว่างการสลายตัว ทำให้เกิดความเสถียรและมีการรวมตัวกลายเป็นชาร์ลดลง น้ำมันที่ได้จะประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลเบากว่ากรณีที่เป็นไพโรไลซิสโดยทั่วไป

1.5 ไฮดรัสไพโรไลซิส (Hydrous pyrolysis) การสลายตัวด้วยความร้อนในตัวกลางที่เป็นน้ำร้อนอัดความดันเกิดไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ร่วมกับการสลายตัวด้วยความร้อน ผลึกภัณฑ์ของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการนี้มักจะมีออกซิเจนในองค์ประกอบสูง เนื่องจากมีออกซิเจนจากโมเลกุลของน้ำร่วมทำปฏิกิริยาคั่ว

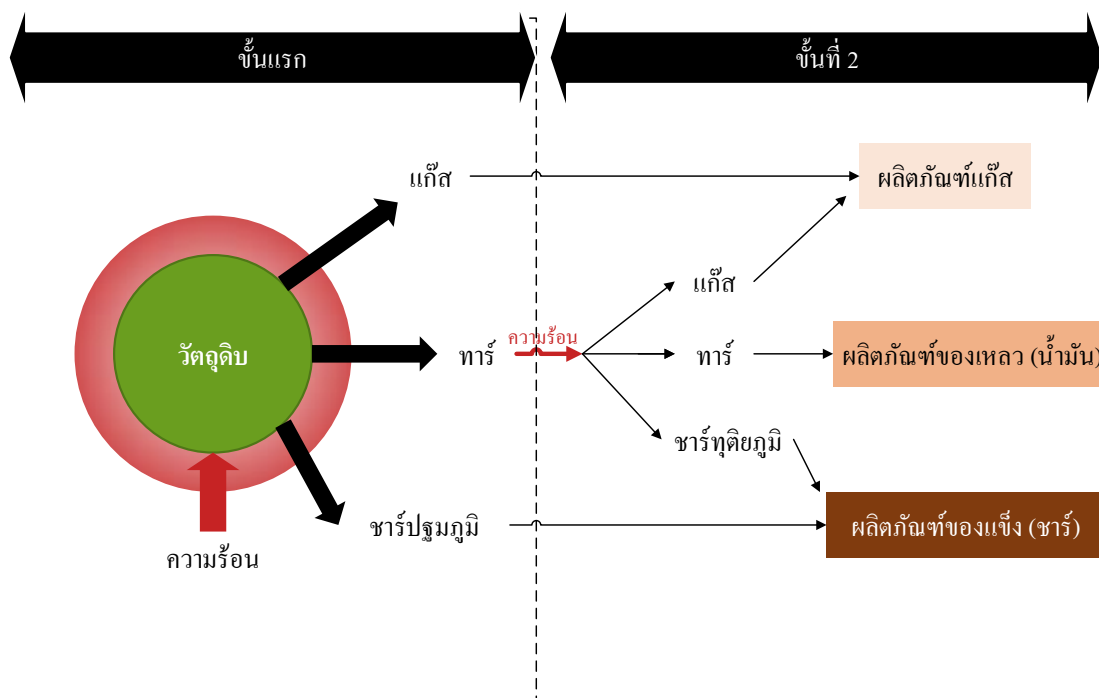
จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่าง ๆ สามารถกล่าวโดยสรุปดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 สภาวะของกระบวนการและผลึกภัณฑ์หลักของกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่าง ๆ

กระบวนการ	เวลาที่ใช้ ในการทำ ปฏิกิริยา	อัตราการให้ ความร้อน	อุณหภูมิที่ใช้ ในการทำ ปฏิกิริยา	ผลึกภัณฑ์
ไพโรไลซิสแบบช้า	24 ชั่วโมง 5-30 นาที	ช้ามาก ( $\ll 1^{\circ}\text{C/s}$ ) ช้า ( $< 1^{\circ}\text{C/s}$ )	$400^{\circ}\text{C}$ $600^{\circ}\text{C}$	ของแข็ง ถ่านชาร์ แก๊ส น้ำมัน ชาร์
ไพโรไลซิสแบบเร็ว	$< 2$ วินาที	เร็ว ( $> 500^{\circ}\text{C/s}$ )	$500^{\circ}\text{C}$	น้ำมันไบโอออยล์
แฟลชไพโรไลซิส	$< 1$ วินาที	เร็วมาก ( $> 10^5^{\circ}\text{C/s}$ )	$< 650^{\circ}\text{C}$	แก๊ส และ น้ำมันไบโอออยล์
ไฮโดรไพโรไลซิส	$< 10$ วินาที	เร็ว	$< 500^{\circ}\text{C}$	น้ำมันไบโอออยล์
ไฮดรัสไพโรไลซิส	5-30 นาที	ปานกลาง	$< 400^{\circ}\text{C}$	น้ำมันไบโอออยล์

## 2. กลไกของกระบวนการไพโรไลซิส ผลึกภัณฑ์ และการนำไปใช้ประโยชน์

ชีวมวลและวัสดุเหลือใช้มีส่วนประกอบทางเคมีที่หลากหลาย หากที่จะเขียนปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสอย่างชัดเจน กลไกอย่างง่ายที่นิยมใช้ในการอธิบายกระบวนการโดยรวมดังภาพที่ 2-4

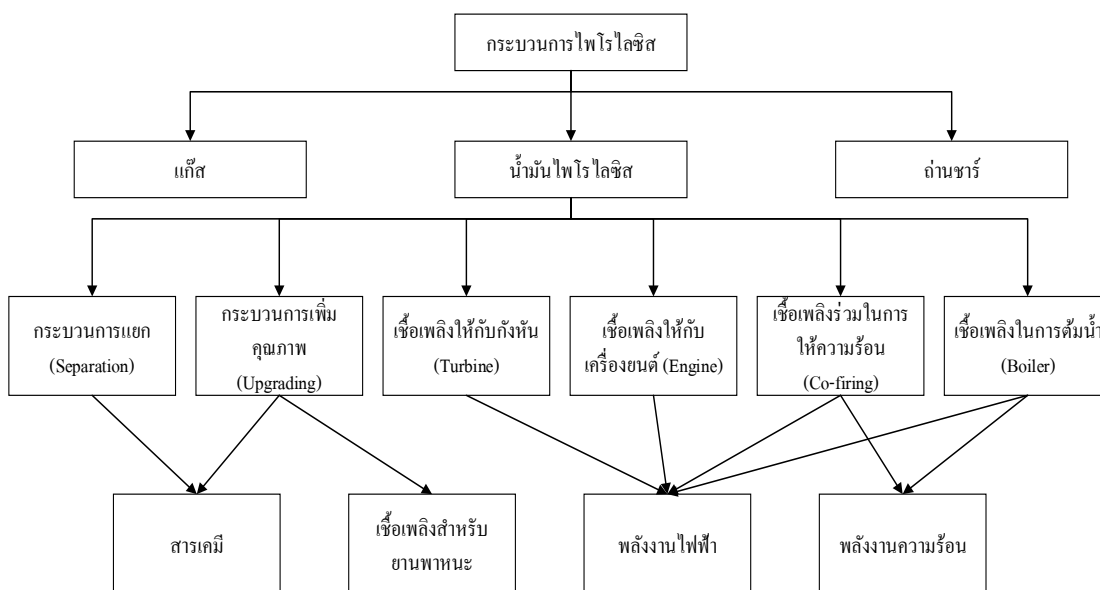


ภาพที่ 2-4 กลไกของกระบวนการไพโรไลซิสอย่างง่าย

ขั้นแรก เมื่อวัสดุได้รับความร้อนและมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะเริ่มเกิดการสลายตัวของโครงสร้างปลดปล่อยแก๊สและสารระเหยที่ไม่สามารถควบแน่นได้หรือทาร์ และส่วนของของแข็งที่เหลือหรือเรียกว่า ชาร์ปฐมภูมิ (Primary char) ขั้นนี้เป็นปฏิกิริยาแบบสองวัฏภาค แก๊ส-ของแข็ง

ขั้นที่สอง ทาร์เกิดปฏิกิริยาแตกตัวต่อในวัฏภาคของแก๊ส ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสุดท้าย ได้แก๊สและของแข็งเพิ่มขึ้น ของแข็งที่ได้เรียกว่า ชาร์ทุติยภูมิ (Secondary char)

จากกระบวนการไพโรไลซิสวัตถุดิบ ดังภาพที่ 2-4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกเป็น 3 สถานะ ได้แก่ แก๊ส ของเหลว และของแข็ง ขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ในกระบวนการ ดังตารางที่ 2-3 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 การนำผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไปใช้ประโยชน์ (กุลนันท์ วีรณรงค์กร และอมรชัย อารณวิธานพ, 2558)

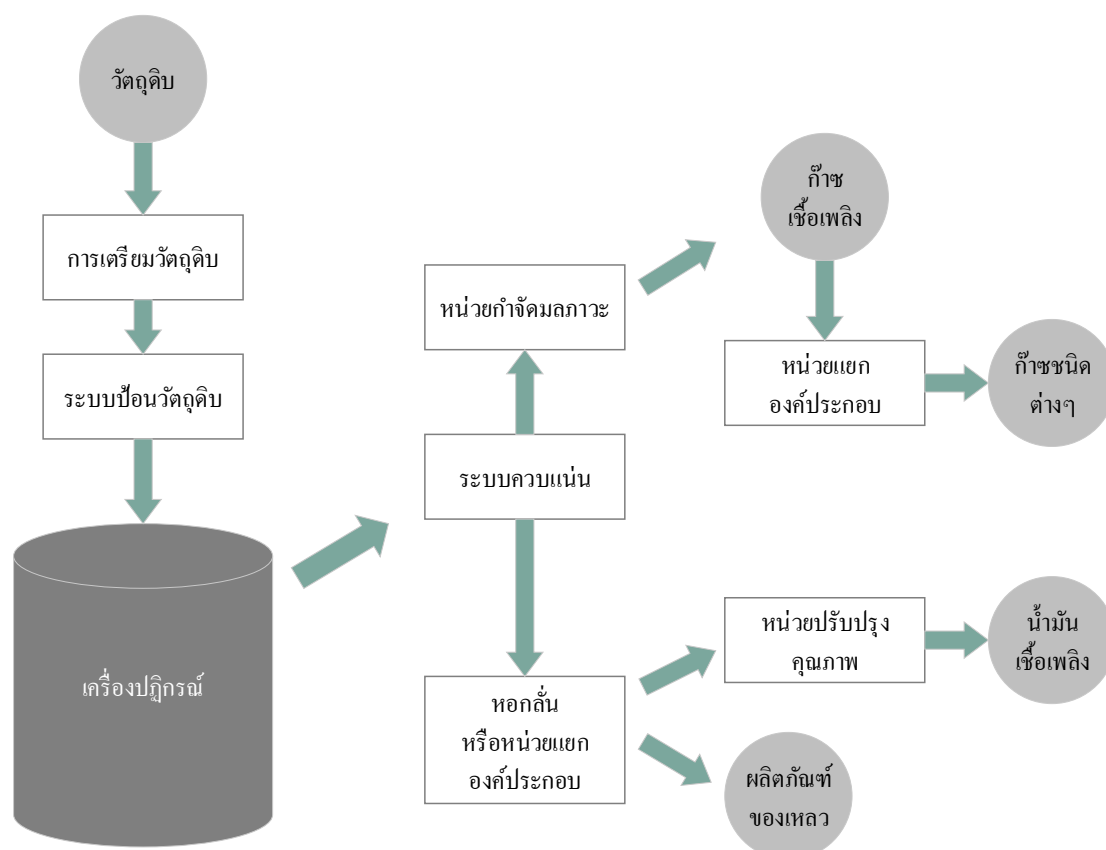
แก๊ส (Gas) แก๊สที่ได้จะเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 1-5 ตัว เป็นองค์ประกอบหลัก และมีแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 6-8 ตัว เป็นองค์ประกอบย่อย นอกจากนี้ยังมีแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นองค์ประกอบด้วย ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงนี้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทั่วไป เช่น ใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงหมุนเวียนในกระบวนการ หรือนำไปใช้แทนแก๊สธรรมชาติได้

ของเหลว หรือน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis oil) น้ำมันเชื้อเพลิงเหลวที่ได้นั้นจะมีลักษณะคล้ายน้ำมันปิโตรเลียมแต่มีส่วนที่เป็นยางมะตอยที่น้อยกว่ามาก เนื่องจากความพยายามในการใช้สภาวะที่ดีที่สุดในการผลิต น้ำมันเชื้อเพลิงเหลวที่ได้นั้นสามารถนำไปกลั่นแยกเป็นสัดส่วนตามจุดเดือดได้ โดยแยกเป็น น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา เป็นต้น นอกจากนี้ น้ำมันเชื้อเพลิงเหลวสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นได้ด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของน้ำมันที่ได้ซึ่งแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ อย่างไรก็ตาม ถ้าสามารถนำเอา น้ำมันเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตได้ไปผ่านกระบวนการกลั่นในโรงกลั่นที่ได้คุณภาพตามมาตรฐาน น้ำมันที่ได้จากกระบวนการดังกล่าว จะมีสมบัติตามที่กระทรวงพาณิชย์กำหนด ซึ่งสามารถขายได้ในราคาเดียวกับราคาน้ำมันเชื้อเพลิงต่าง ๆ ในตลาด

ของแข็ง หรือถ่านชาร์ (Char) ผลิตภัณฑ์จากของแข็งหรือถ่านที่ได้ในส่วนใหญ่มักจะมีองค์ประกอบของคาร์บอนที่ยังไม่มีความบริสุทธิ์เพียงพอจัดว่าเป็นคาร์บอนแบล็กเกรดต่ำ เนื่องจากการปนเปื้อนสารต่าง ๆ จากกระบวนการไพโรไลซิส จึงต้องนำไปผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยการล้างหรือใช้ความร้อนเพื่อปรับสภาพให้มีคุณลักษณะเพียงพอในการนำกลับมาใช้ใหม่

### เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว

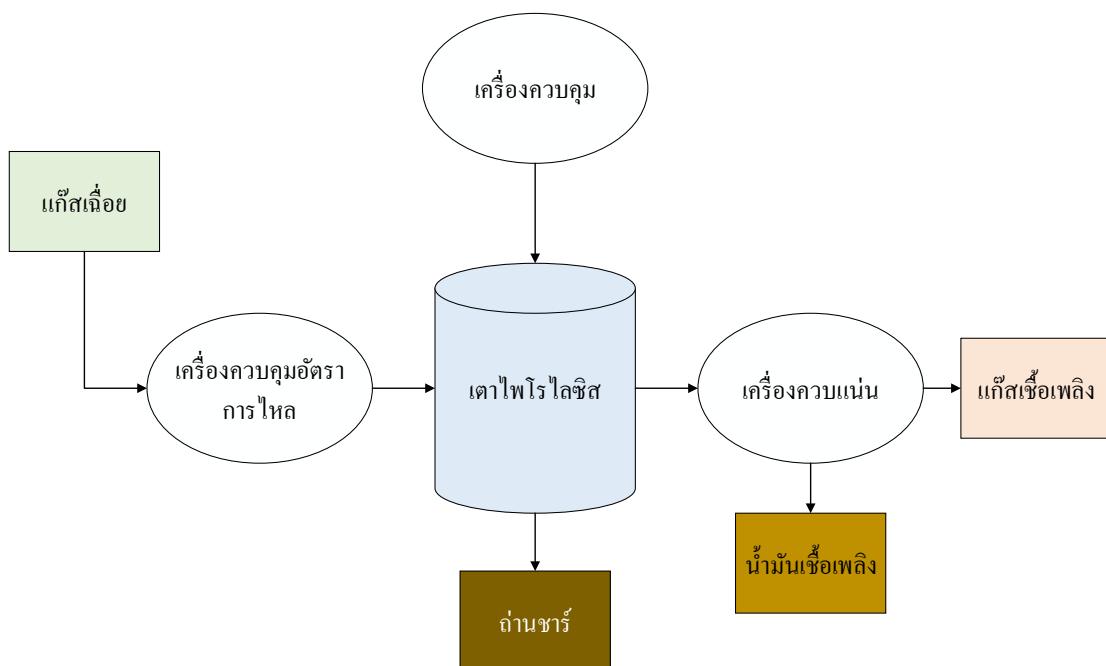
แนวทางการเปลี่ยนน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วให้เป็นเชื้อเพลิง ถูกสนับสนุนต่อยอดออกมาจากแนวคิดจากกระบวนการเปลี่ยนขยะให้เป็นพลังงานซึ่งเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นนั้น มักมีองค์ประกอบเชิงโครงสร้างโดยทั่วไปดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 กระบวนการเปลี่ยนขยะให้เป็นเชื้อเพลิง (ศิริรัตน์ จิตการคำ, 2551)

องค์ประกอบหลักของเทคโนโลยีเปลี่ยนขยะเป็นพลังงาน คือ ชุดเครื่องปฏิกรณ์หลัก หน่วยกำจัดมลภาวะ หอกลิ้น หน่วยแยกองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ และหน่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ในเทคโนโลยีหนึ่ง ๆ อาจมีไม่ครบทุกองค์ประกอบที่กล่าวในข้างต้นก็ได้ ขึ้นอยู่กับว่าหลักการของกระบวนการ วัตถุประสงค์ และผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ให้มีรูปทรงต่างกัน องค์ประกอบต่างกันก็มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ กระบวนการผลิตเดียวกันแต่ใช้ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ต่างกัน ก็สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เปลี่ยนไปได้ เนื่องจากการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นั้น มีผลต่ออัตราเร็วในการให้ความเร็ว ทิศทางการไหลของสารที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ และเวลาที่วัตถุดิบและผลผลิตใช้อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ) สำหรับกระบวนการไพโรไลซิสอย่างง่าย สามารถเขียน

Process flow diagram (PFD) ได้ดังภาพที่ 2-7



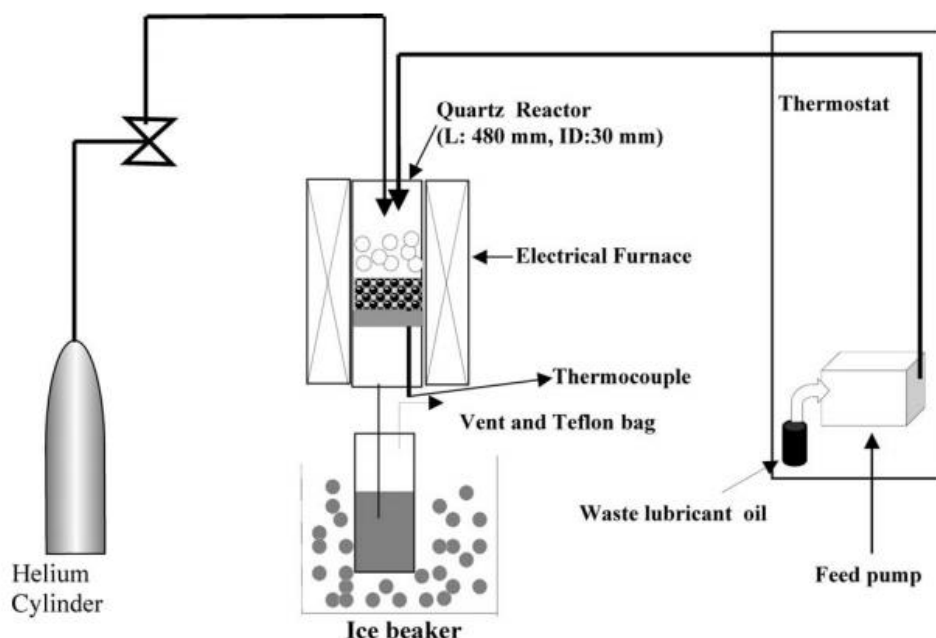
ภาพที่ 2-7 กระบวนการไพโรไลซิสอย่างง่าย (ภัทรอนงค์ คงช่วย, 2561)

เตาไพโรไลซิส หรือไพโรไลเซอร์ (Pyrolyzer) หมายถึง เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้สำหรับไพโรไลซิสวัตถุดิบ ในอดีตเตาไพโรไลซิสถูกสร้างขึ้นเป็นเตาแบบกะ มีการให้ความร้อนอย่างช้า ๆ ให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นถ่าน ปัจจุบันมีการพัฒนาเตาลักษณะอื่น ๆ ให้มีอัตราการให้ความร้อน

ที่แตกต่างกันไป มีการควบคุมอุณหภูมิ และเวลาของปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับเพิ่มผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว (น้ำมัน) หรือแก๊ส โดยในส่วนของงานวิจัยที่ผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมีการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟไพโรไลซิส และเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (CSTR) เป็นต้น

### 1. เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor)

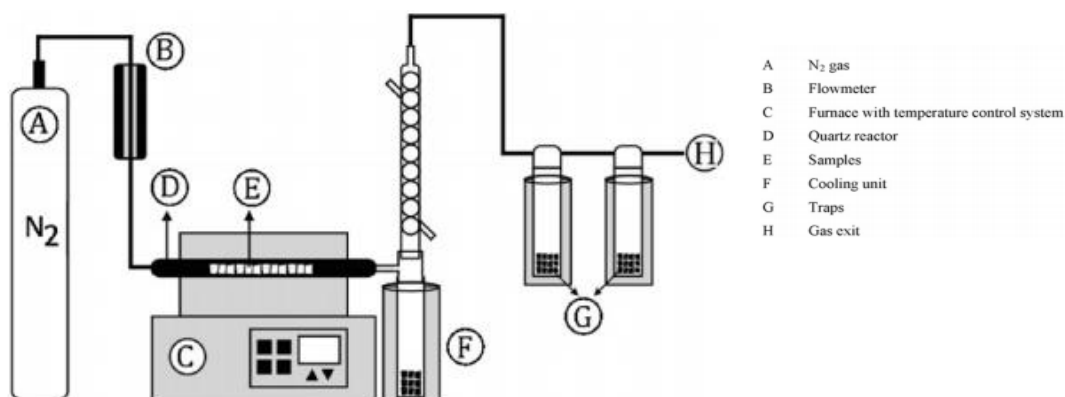
Bhaskar et al. (2004) ทำการทดลองการนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบทางเคมี (Chemical feedstock) หรือน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel oil) โดยใช้สารประกอบออกไซด์ของเหล็ก (Iron oxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งในการทำปฏิกิริยา ดังภาพที่ 2-8 โดยการทดลองนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งในแนวตั้ง มีการให้ความร้อนด้วยระบบไฟฟ้า ซึ่งภายในท่อแนวตั้งที่ทำจากควอตซ์จะมีตัวเร่งปฏิกิริยาบรรจุรวมกันอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อ จากนั้นจะทำการป้อนน้ำมันตัวอย่างเข้าด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยปั๊มและด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ถูกออกแบบให้มีถังน้ำแข็ง (Ice beaker) เพื่อเก็บผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลอง ส่วนแก๊สจะถูกเก็บไว้ใน Teflon bag



ภาพที่ 2-8 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Bhaskar et al., 2004)

## 2. เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor)

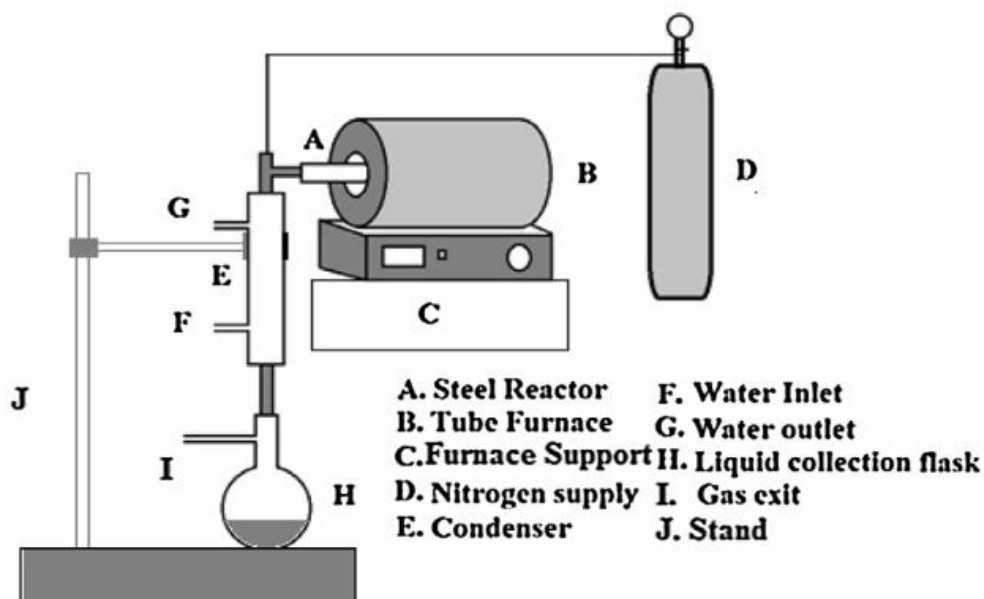
Sinag et al. (2010) ทำการทดลองกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นเครื่องจักรด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อในเตาเผาแนวอน (Tubular furnace) ดังภาพที่ 2-9 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์เช่น อุณหภูมิ (400 600 และ 800°C) และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (Ni/SiO<sub>2</sub>, Ni/HZSM-5) โดยทำการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่บรรจุน้ำมันตัวอย่างและตัวเร่งปฏิกิริยาไว้รวมกันในท่อแนวอน จากนั้นให้ความร้อนเพื่อให้ไขมันตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) และมีระบบหล่อเย็นที่ตำแหน่ง F (Cooling unit) เพื่อเก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง และที่ตำแหน่ง G (Trap) จะมีการดักจับแก๊สพิษที่ออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 2-9 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (1) (Sinag et al., 2010)

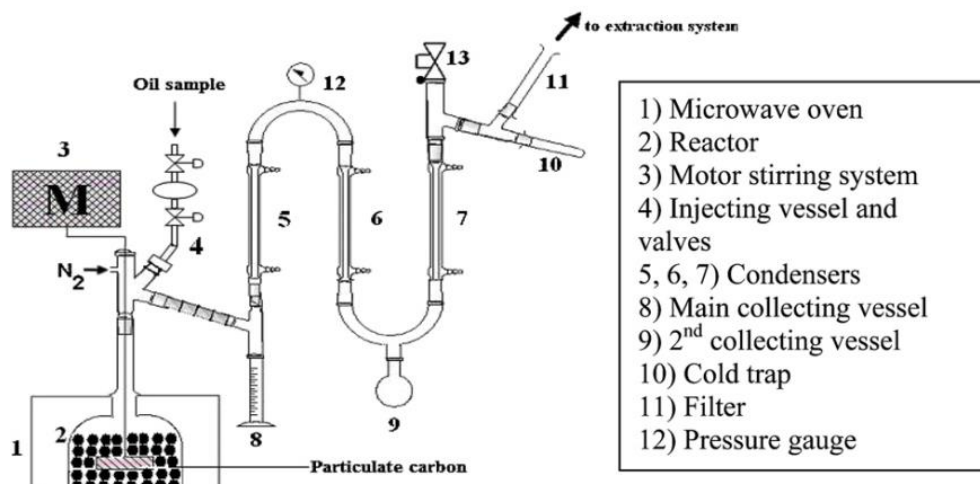
Khan et al. (2016) ทำการทดลองผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงเทียบเคียงน้ำมันดีเซล (Diesel-like fuel) จากน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วด้วยกระบวนการไพโรไลซิสบนตัวเร่งปฏิกิริยา Natural magnetite ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อในเตาเผาแนวอน (Tubular furnace) ดังภาพที่ 2-10 ในการทดลองนี้ใช้ท่อเหล็กบรรจุไขมันตัวอย่างและตัวเร่งปฏิกิริยาในเตาเผาแนวอน ให้ความร้อนด้วยระบบไฟฟ้า โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สตัวพาซึ่งถูกติดตั้งไว้ในตำแหน่งด้านบนของอุปกรณ์ควบแน่น (Condenser) เพื่อพาน้ำมันในสถานะแก๊สที่ออกจากเตาเผาเข้าสู่หน่วยเก็บผลิตภัณฑ์ด้านล่าง โดยมีติดตั้งทางออกของแก๊สไว้ในขวดเก็บผลิตภัณฑ์





ภาพที่ 2-10 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (2) (Khan et al., 2016)

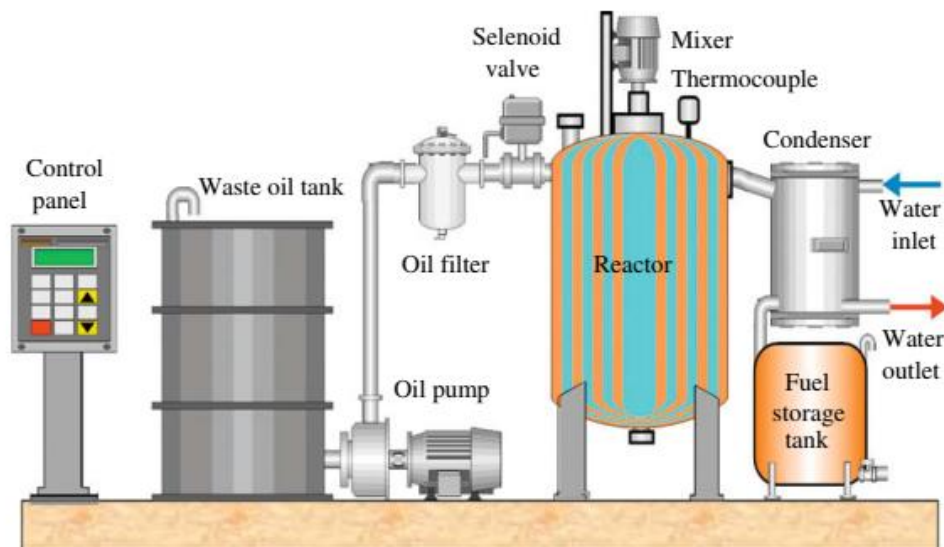
Lam et al. (2010) นำเสนอเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสโดยแหล่งพลังงานที่ให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์นั้นเป็นความร้อนจากเตาไมโครเวฟเรียกว่า “Microwave pyrolysis” ดังภาพที่ 2-11 สำหรับวัตถุดิบที่นำมาใช้ในกระบวนการนี้คือน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสถานะที่มีผลกับผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่ถูกติดตั้งอยู่ในเตาไมโครเวฟ โดยภายในเครื่องปฏิกรณ์นั้นมีอนุภาคคาร์บอนถูกบรรจุอยู่และถูกปั่นกวาดด้วยใบพัด จากนั้นน้ำมันตัวอย่างจะถูกป้อนเข้าด้านบน (ตำแหน่งที่ 4) และน้ำมันในสถานะแก๊ส (Vapor phase) จะถูกแก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สตัวพา (Carrier gas) พาเข้าไปสู่อุปกรณ์ควบแน่นตำแหน่งที่ 5 (Condenser) โดยผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จะถูกเก็บไว้ในอุปกรณ์ที่ตำแหน่งที่ 8 (Main collecting vessel) และแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เหลือจะเข้าสู่อุปกรณ์ควบแน่นตำแหน่งที่ 6 และ 7 โดยในระหว่างนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นซึ่งจะถูกเก็บไว้ในอุปกรณ์ที่ตำแหน่งที่ 9 (2<sup>nd</sup> Collecting vessel) ส่วนแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้จะผ่านเข้าสู่ Filter และระบบแยกต่อไป



ภาพที่ 2-11 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้ไมโครเวฟ (Lam et al., 2010)

### 3. เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred tank reactor, CSTR)

Arpa et al. (2010) นำเสนอเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสที่ใช้ในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงเทียบเคียงน้ำมันดีเซล (Diesel-like fuel) ในระดับกึ่งการค้า (Semi-commercial) โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm และมีความยาว 40 cm ปริมาตรความจุ 25 L ดังภาพที่ 2-12 อีกทั้งกระบวนการนี้ถูกออกแบบให้มีระบบควบคุมอัตโนมัติและระบบป้องกันความปลอดภัย (Safety) โดยติดตั้ง Solenoid valve เพื่อจำกัดการป้อนน้ำมันตัวอย่างด้วยระบบไฟฟ้า ในส่วนของเครื่องปฏิกรณ์มีการควบคุมอุณหภูมิด้วย Thermocouple และมีการปั่นกวนด้วยใบพัด น้ำมันในสถานะแก๊สจะเข้าสู่ระบบควบแน่น (Condenser) โดยใช้น้ำเป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน จากนั้นผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จะถูกเก็บไว้ในถัง (Fuel storage tank)



ภาพที่ 2-12 เครื่องปฏิกรณ์แบบลั่งกวนต่อเนื่อง (Arpa et al., 2010)

### ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

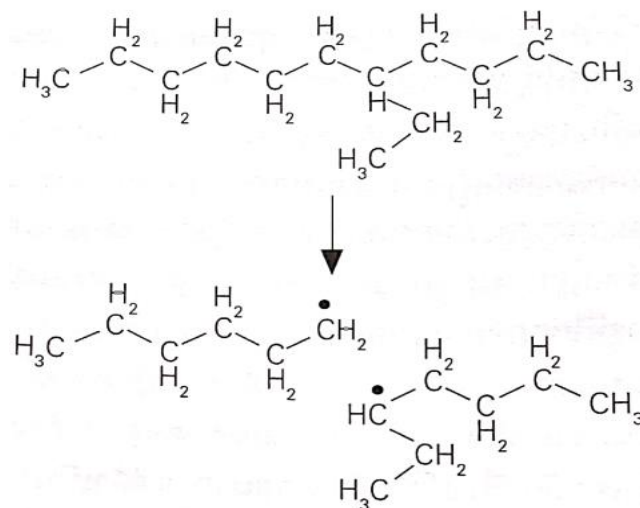
การใช้วัตถุดิบที่มาจากของเสียคั่งเช่นน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว เมื่อนำมาแปรรูปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้ผลผลิตที่มีมูลค่ามากขึ้น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมในกระบวนการไพโรไลซิสจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิสได้ โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารประกอบทางเคมีที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น โดยหลังจากการช่วยทำปฏิกิริยาแล้วตัวมันเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร และไม่เข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นเบส โดยอาจจะมีการเติมธาตุชนิดต่าง ๆ ลงไปบนตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะและความสามารถในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการใช้ตัวเร่งที่ต่างกันจะมีองค์ประกอบและคุณลักษณะที่ต่างกัน การเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างถูกต้องและเหมาะสม จึงเป็นเรื่องที่สำคัญในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันและแก๊สที่ได้จากกระบวนการให้มีคุณลักษณะตามต้องการได้ โดยทั่วไปพบว่า มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ทำหน้าที่แตกต่างกันซึ่งสามารถจำแนกได้ ดังต่อไปนี้ (ศิริรัตน์ จิตการคำ, 2551)

## 1. ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการแตกตัวของวัตถุดิบ

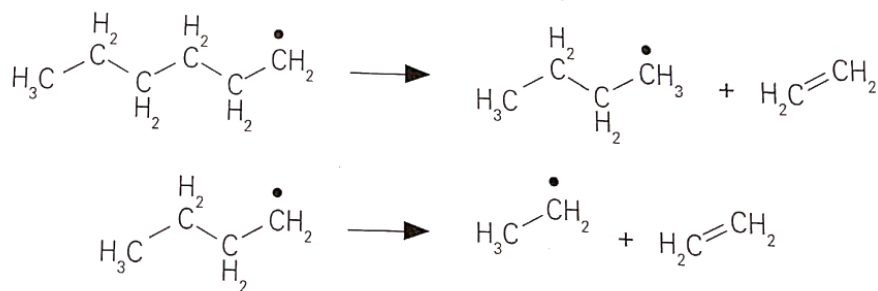
จากตัวอย่างงานวิจัยพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดอุณหภูมิในการแตกตัวของยางรถยนต์ได้เล็กน้อยประมาณ 3-5°C แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยลดอุณหภูมิในการแตกตัวของวัตถุดิบที่เป็นพลาสติกได้มากกว่า และมากถึง 70-80°C เนื่องจากยางรถยนต์นั้นมีความนุ่ม และง่ายต่อการแตกตัวอยู่แล้ว เมื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปจึงไม่เห็นความแตกต่างมากนัก โดยกลไกการแตกตัวด้วยความร้อนของวัตถุดิบจะมีปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยา Thermal cracking และปฏิกิริยา Catalytic cracking ที่เป็นการแตกตัวด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย ดังต่อไปนี้

1.1 กลไกการแตกตัวของปฏิกิริยาแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) คือ กระบวนการที่โมเลกุลของสารแตกตัวออกเป็น โมเลกุลขนาดเล็กลง เนื่องจากได้รับความร้อนหรือพลังงานเกินพลังงานที่ใช้ในการเกาะกันของโมเลกุล การแตกตัวของโมเลกุลด้วยความความร้อนนั้น แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ดังนี้

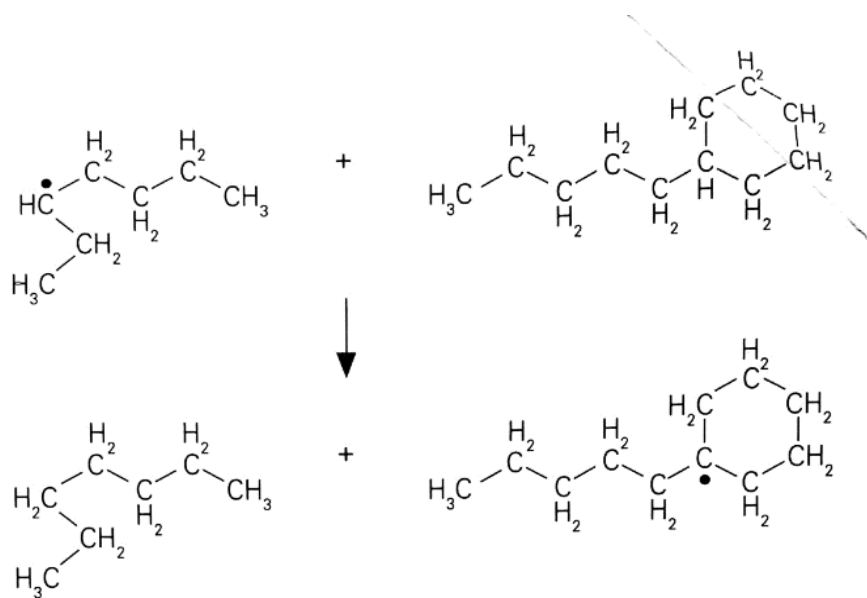
ขั้นตอนเริ่มต้น (Initiation step) ซึ่งเป็นการแตกตัวของพันธะที่เชื่อมระหว่างคาร์บอน 2 ตัว ที่อุณหภูมิสูง การแตกตัวของพันธะนี้เรียกว่า โฮมอไลซิส (Homolysis) ทำให้โมเลกุลหนึ่ง ๆ แตกออกเป็น 2 ส่วน เป็นส่วนที่มีอิเล็กตรอนที่ยังไม่จับคู่ (Unpaired Electron) อยู่ส่วนละ 1 ตัว โมเลกุลทั้งสองส่วนนี้ถูกเรียกว่า อนุมูลอิสระ (Free Radicals)



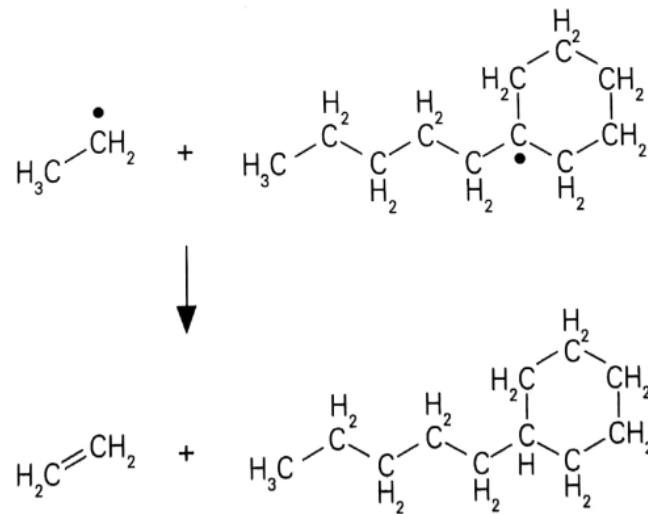
ขั้นตอนการแตกตัวอย่างต่อเนื่อง (Depropagation Steps) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดการแตกตัวของพันธะที่เชื่อมระหว่างคาร์บอน 2 ตัว ณ ตำแหน่งที่สอง นับจากตรงคาร์บอนที่มีอิเล็กตรอนที่ยังไม่จับคู่อยู่ (ตำแหน่งบีตา) การแตกตัวตรงตำแหน่งบีตานี้จะเกิดขึ้นไปเรื่อย ๆ แบบสุ่ม จนกระทั่งโมเลกุลมีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ จนไม่สามารถจะแตกได้อีก



ในขณะเดียวกัน โมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงนี้อาจจะกลับเข้ามารวมกันได้ เป็นโมเลกุลใหม่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ การเข้ามารวมของโมเลกุลในลักษณะนี้ เรียกว่า ปฏิกิริยาการถ่ายโอนสายโซ่ (Chain transfer reactions) ซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนไฮโดรเจน (Hydride transfer) จากสายโซ่หนึ่งไปยังอีกสายโซ่หนึ่ง



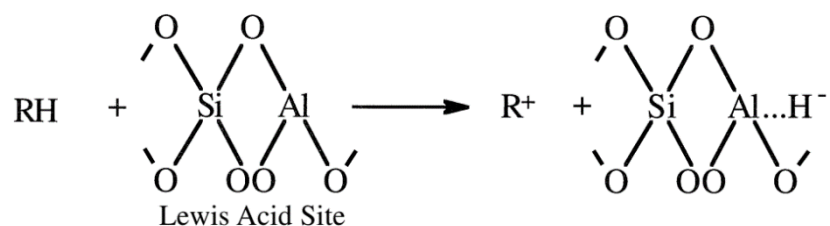
ขั้นตอนการสิ้นสุด (Termination step) เกิดขึ้นเมื่อมีการถ่ายโอนโปรตอนระหว่างอนุมูลอิสระ 2 ตัว แล้วทำให้อนุมูลทั้งสองตัวนั้นกลายเป็นโมเลกุลที่สมบูรณ์ และมีพันธะคู่เกิดขึ้นตรงจุดที่ให้โปรตอนของอนุมูลอิสระนั้น ดังนั้นในขั้นตอนนี้ จะมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดอัลคีนเกิดขึ้น



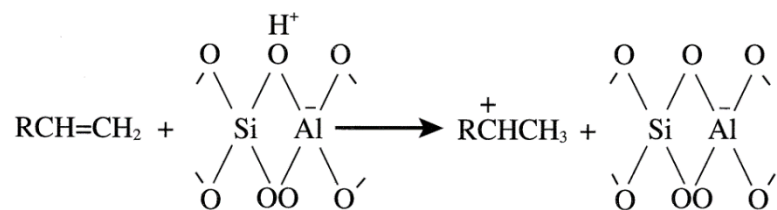
1.2 กลไกการแตกตัวของปฏิกิริยา Catalytic cracking ซึ่งเป็นกระบวนการแตกตัวของวัตถุดิบ โดยใช้ความร้อนร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิดที่ทำหน้าที่ช่วยในการแตกตัว โดยบริเวณเร่งของตัวเร่งปฏิกิริยาจะจับกับโมเลกุลของวัตถุดิบและเกิดเป็นคาร์โบแคทไอออน (Carbocation) ที่จะทำให้เกิดกลไกในการแตกตัวของวัตถุดิบ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา Catalytic cracking ส่วนใหญ่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ เช่น ZSM-5, HZSM-5 และสารประกอบจากธรรมชาติ เช่น Bentonite รวมถึงสารประกอบโลหะออกไซด์ (Metal oxide) ที่มีความเป็นกรด เช่น Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นต้น

ในที่นี้จะยกตัวอย่างกลไกการเกิดปฏิกิริยาจากตัวเร่งปฏิกิริยา Zeolite ที่มีบริเวณเร่ง Lewis acid และ Bronsted acid จะมีกลไกหลักที่ทำให้เกิดสารประกอบคาร์โบแคทไอออน และคาร์โบแคทไอออนนี้จะทำหน้าที่ในการแตกตัวให้กับโมเลกุลอื่น ๆ ซึ่งสามารถแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาได้ดังต่อไปนี้ (Marta & Hatch, 2000)

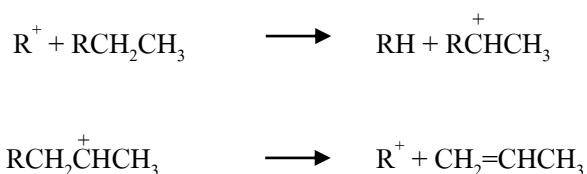
บริเวณเร่ง Lewis acid ของตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ดึงโปรตอนออกจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดเป็นคาร์โบแคทไอออน



บริเวณเร่ง Bronsted acid ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโปรตอนอยู่ จะทำหน้าที่ให้โปรตอนกับสารประกอบอัลคีนและเกิดเป็นคาร์โบแคทไอออน



เมื่อเกิดคาร์โบแคทไอออนเกิดขึ้นจากตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว คาร์โบแคทไอออนจะทำหน้าที่ดึงโปรตอนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่น ๆ ทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลและให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดเล็กลง



## 2. ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้เลือกผลิตผลิตภัณฑ์ได้อย่างเฉพาะเจาะจง

ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้สามารถเลือกผลิตผลิตภัณฑ์ได้อย่างเฉพาะเจาะจง ยกตัวอย่างเช่น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเซอโคเนีย ที่ใส่หมู่ซัลเฟตและโพแทสเซียมไนเตรดลงไป จากการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาเซอโคเนียที่ใส่หมู่ซัลเฟตลงไปนั้น มีความเฉพาะเจาะจงในการเลือกผลิตแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 4 ตัวเป็นองค์ประกอบมากกว่าแก๊สที่มีคาร์บอน 5 ตัว และเลือกผลิตน้ำมันเบนซินมากขึ้น ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่สารโพแทสเซียมไนเตรดลงไป มีความเฉพาะเจาะจงในการเลือกผลิตแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 5 ตัวเป็นองค์ประกอบมากกว่าแก๊สที่มีคาร์บอน 4 ตัว และเลือกผลิตน้ำมันก๊าดมากขึ้น นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยายังมีความเจาะจงในการผลิตสารประกอบทางเคมีในน้ำมันที่ต่างกัน ในงานวิจัยชิ้นหนึ่งพบว่า เมื่อใช้ Zeolite-Y ร่วมในการไพโรไลซิส ทำให้สารประกอบไซลีนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นถึง 27% (สารประกอบพาราไซลีนเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตขวดน้ำใสชนิด PET) และงานวิจัยอีกชิ้นหนึ่งพบว่า การใช้ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สามารถผลิตไซลีนเพิ่มมากขึ้นได้ถึง 22.5% เป็นต้น

### 3. ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้

จากงานวิจัยของ Sinag et al. (2010) พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร่วมในกระบวนการไพโรไลซิสส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอะโรมาติกเท่ากับ 95% ซึ่งมากกว่าการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเดียวกัน อีกทั้งมีปริมาณของสารประกอบอะโรมาติกน้อยกว่าการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ไม่มีความจำเพาะเจาะจงต่อการเกิดปฏิกิริยา Cyclization และ Aromatization จึงส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จะมีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น

### 4. ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดมลพิษบางตัวที่เกิดจากสารปนเปื้อนมากับวัตถุดิบได้

มลพิษที่เกิดขึ้นจากสารปนเปื้อนมากับวัตถุดิบส่วนใหญ่ ได้แก่ โลหะหนัก สารประกอบซัลเฟอร์ เป็นต้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสารปนเปื้อนและไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ เนื่องจากไม่ผ่านมาตรฐานด้านคุณภาพ ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้จะช่วยจับกับโลหะหนักและสารประกอบซัลเฟอร์ไม่ให้ติดออกมากับผลิตภัณฑ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ เป็นสารประกอบประเภทโลหะออกไซด์ (Metal oxide) ได้แก่  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  เป็นต้น

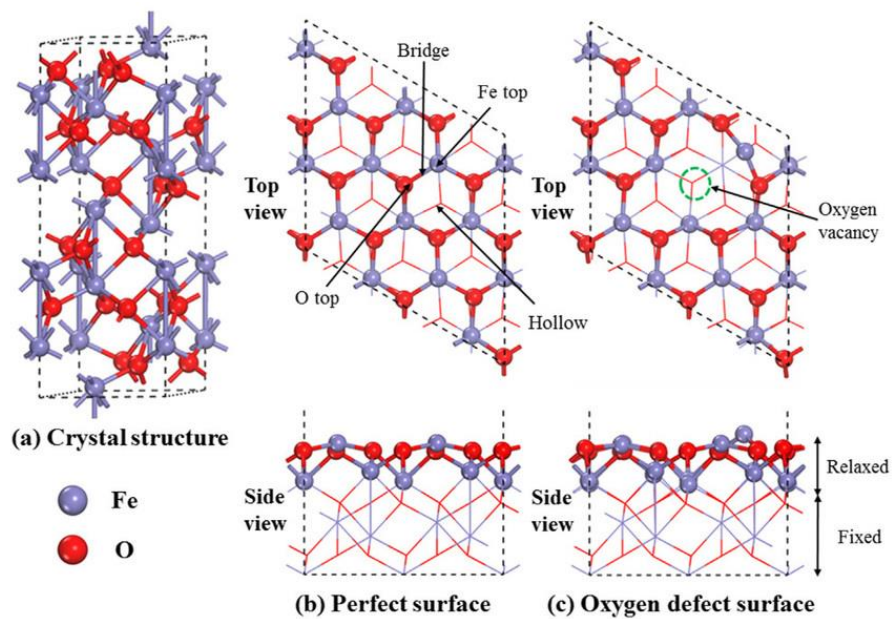
### 5. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส

5.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส Arpa et al. (2010) ทำการทดลองผลิตเชื้อเพลิงเทียบเคียงน้ำมันดีเซล (Diesel-like fuel) จากน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วด้วยวิธีการกลั่นแบบไพโรไลซิส โดยได้ทำการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิสด้วยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด ได้แก่  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaO}$  และ Zeolite ในปริมาณ 2 4 6 8 และ 10wt% ผลการทดลองพบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10wt%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ในการไพโรไลซิสจะได้ค่าจุดวาบไฟเพิ่มขึ้นสูงสุดที่  $43^\circ\text{C}$  และนอกจากนี้ยังพบว่า การเติมตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการกลั่น โดยมีปริมาณของน้ำมันไพโรไลซิสเพิ่มมากขึ้นที่อุณหภูมิในการกลั่นลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Demirbas, Baluabaid, Kabli, and Ahmad (2015) ที่รายงานว่า การเติมตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ช่วยเพิ่มจุดวาบไฟของน้ำมันไพโรไลซิส และลดอุณหภูมิในการกลั่นได้เช่นกัน

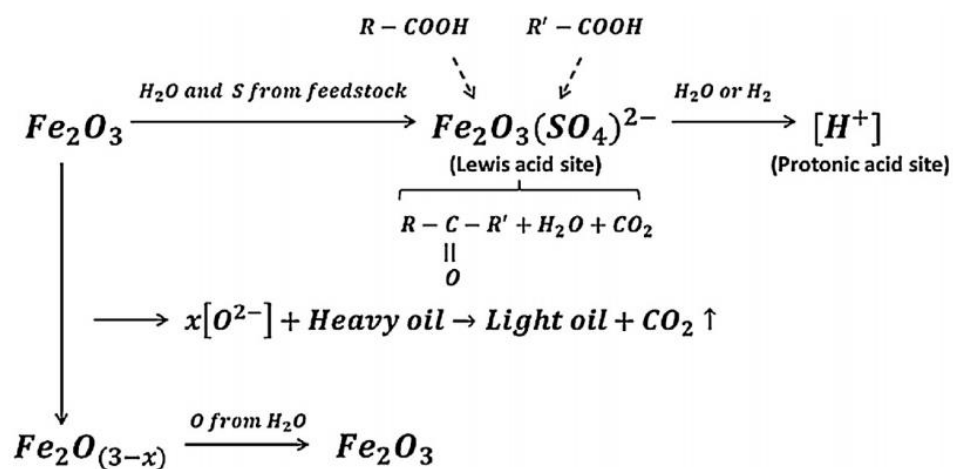
5.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด Cheng et al. (2016) ทำการศึกษาการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำมัน (Oil sludge) ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกวน (Stirred tank reactor) โดยใช้  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  และ  $\text{SiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่า  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านน้อยที่สุด (0.1wt%) และผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีปริมาณองค์ประกอบของซัลเฟอร์ไนโตรเจน และออกซิเจน น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ เนื่องจากสภาพความเป็นกรดของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ที่สูงและการมี Oxygen vacancy ในโครงสร้างของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ทำให้บริเวณนั้น



เป็นบริเวณเร่งกรดดังภาพที่ 2-13 และผลจากการมีบริเวณเร่งกรดที่แรงทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยา Catalytic cracking ได้ดี และในขณะเดียวกันก็ยังช่วยลดปริมาณซัลเฟอร์ในผลิตภัณฑ์ได้ ด้วยการจับตัวกับสารประกอบซัลเฟอร์เกิดเป็น  $Fe_2O_3(SO_4)^{2-}$  ซึ่งเป็นกรดที่แรงและสามารถเกิดเป็น Protonic acid site ที่สามารถทำปฏิกิริยา Catalytic cracking ต่อได้อีก กลไกการเกิดปฏิกิริยาดังภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-13 Oxygen vacancy ในโครงสร้างของ  $Fe_2O_3$  (Song et al., 2017)



ภาพที่ 2-14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ  $Fe_2O_3$  (Cheng et al., 2016)

5.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและเบส เช่น ซีโอไลต์ (Zeolite) และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินา Sinag et al. (2010) ได้ทำการทดลองการไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นเครื่องจักรและทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อศึกษาผลของผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้ 2 ชนิด ได้แก่ Ni/SiO<sub>2</sub> และ H-ZSM5 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติม Ni/SiO<sub>2</sub> ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิสที่มีองค์ประกอบของสารประกอบอะโรมาติกน้อยลงและสารประกอบอะลิฟาติกมากขึ้นเทียบกับการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจาก Ni/SiO<sub>2</sub> ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนได้ดี (Hydrogenation) ในขณะที่การเติม H-ZSM5 ให้น้ำมันไพโรไลซิสที่มีองค์ประกอบของสารประกอบอะลิฟาติกมากกว่า Ni/SiO<sub>2</sub> เนื่องจากการมีรูปร่างจำเพาะกับปฏิกิริยาของซีโอไลต์ (Shape selectivity)

Kar (2018) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยา Catalytic cracking ของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากเปลือกอัลมอนต์โดยใช้ Bentonite เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อผลิตเชื้อเพลิงสะอาด ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed reactor) ภายใต้ความดันบรรยากาศและมีแก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สตัวพา โดยทำการทดลองในขั้นตอนแรก คือ การผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากเปลือกอัลมอนต์ที่อุณหภูมิ 500°C ในอัตราการให้ความร้อน 10°C/min จากนั้นนำน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้ในขั้นตอนแรกมาปรับปรุงคุณภาพด้วยการเติม Bentonite ปริมาณ 30wt% และทำปฏิกิริยา Catalytic cracking ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ 400°C ในอัตราการให้ความร้อน 10°C/min จากผลการทดลองพบว่า น้ำมันที่ปรับปรุงคุณภาพนั้นมีความหนืดและความหนาแน่นลดลง เนื่องมาจากการมีหมู่ SiO<sub>2</sub> ที่เป็นองค์ประกอบใน Bentonite สามารถช่วยกำจัดสาร Oxygenate และยับยั้งการเกิดถ่านโค้กได้ แต่จากการวิเคราะห์ด้วย GC-MS พบว่า ยังมีสาร Oxygenate ในหมู่ฟังก์ชันคีโตน ฟีนอล และอะโรมาติก ปนอยู่มาก ดังนั้นในการปรับปรุงคุณภาพเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงที่ดีต้องทำการแยกสาร Oxygenate ออก ด้วยวิธี Deoxygenate ต่อไป

#### สมบัติของน้ำมันดีเซล (ศิริรัตน์ จิตการคำ, 2551)

สมบัติพื้นฐานของน้ำมันดีเซล คือ ต้องจุดระเบิดได้เองโดยเร็วและเผาไหม้ได้หมด ภายใต้สภาวะภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ต้องสามารถถูกส่งถ่ายด้วยหัวฉีด และจะต้องเหมาะสมกับการส่งถ่ายจากโรกลั่นถึงถึงน้ำมันเครื่องยนต์ โดยไม่เกิดการเสื่อมสภาพและไม่เกิดอันตรายต่อภาชนะที่ขนถ่ายนั้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดมาตรฐานดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 สมบัติของน้ำมันดีเซลตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน พ.ศ. 2556

รายการ	ข้อกำหนด	มาตรฐาน ASTM	ดีเซล หมุนเร็ว	ดีเซล หมุนช้า
1	ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6°C (Specific Gravity at 15.6/15.6°C)	D 1298	0.81-0.87	0.920
2	จำนวนซีเทน (Cetane Number)	D 976	>50	>45
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40°C (Viscosity at 40°C, cSt)	D 445	1.8-4.1	<8.0
4	จุดไหลเท (Pour point, °C)	D 97	<10	<16
5	กำมะถัน (Sulphur, %wt.)	D 2622	<0.005	<1.5
6	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	D 130	1	-
7	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Stability, g/m3)	D 2274	<25	-
8	กากถ่าน (Carbon Residue, %wt.)	D 189	<0.04	-
9	น้ำและตะกอน (Water and Sediment, %vol.)	D 2709	<0.05	<0.3
10	เถ้า (Ash, %wt.)	D 482	<0.01	<0.02
11	สี (Color)			
	11.1 ชนิดของสี (Hue)		เหลือง	น้ำตาล
	11.2 ความเข้มของสี (Intensity)	D 1500	>4.0	4.5-7.5
12	จุดวาบไฟ (Flash Point, °C)	D 93	>52	>52
13	การกลั่น (Distillation, °C) อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตรใน อัตราร้อยละเก้าสิบ (90% recovered)	D 86	357	-
14	โพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, %wt.)	D 2425	>11	-

1. ความถ่วงจำเพาะและค่าความหนืด ค่าทั้งสองมีผลต่อการทำงานของปั๊มและหัวฉีด ถ้าน้ำมันเหลวเกินไปหรือข้นเกินไป ก็จะทำให้ฉีดเป็นฝอยได้ไม่ดี ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ไม่ดี กำลังของเครื่องตก และเกิดควันดำ เครื่องยนต์รอบต่ำสามารถใช้ได้กับน้ำมันที่มีความหนืดสูงกว่า เครื่องยนต์รอบสูง
2. จุดไหลเทและจุดหมอก เป็นจุดที่บ่งบอกถึงอุณหภูมิการใช้งานได้ของน้ำมันดีเซล เพื่อให้เกิดการไหลของน้ำมันได้ แต่เนื่องจากประเทศไทยมีสภาพภูมิอากาศร้อนจึงไม่มีข้อกำหนดของจุดไหลเท
3. ปริมาณกากถ่าน ปริมาณกากถ่านจะทำให้เครื่องยนต์และหัวฉีดสกปรก จึงถูกกำหนดเป็นค่าต่ำสุดที่รับได้ มาตรฐานที่ใช้วัดปริมาณกากถ่าน คือ ASTM D 189
4. ค่าซีเทนและดัชนีซีเทน ค่าซีเทนมีผลต่อความเร็วในการจุดระเบิดได้เอง ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเชิงโมเลกุลของน้ำมัน โดยโมเลกุลประเภทไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรงนั้นจะติดไฟได้เร็วที่สุดหรือมีค่าความหน่วงในการจุดระเบิด (Ignition delay) ต่ำมาก ตรงข้ามกับสารประกอบจำพวกอะโรมาติกจะติดไฟได้ช้า โดยเฉพาะพวกที่มีวงแหวนเป็นองค์ประกอบหลายวง ค่าซีเทนเป็นตัวที่ใช้ประเมินค่า Ignition delay ซึ่งเป็นตัวที่บ่งบอกความเร็วในการจุดระเบิด
5. จุดวาบไฟ ข้อกำหนดของจุดวาบไฟมีไว้เพื่อความปลอดภัยในการเก็บและส่งถ่าย ซึ่งกำหนดเป็นค่าต่ำสุดไว้ มาตรฐานที่ใช้ คือ ASTM D93
6. อุณหภูมิการกลั่น น้ำมันควรมีช่วงการกลั่นที่พอเหมาะ จึงกำหนดที่จุด 50% เป็นจุดบ่งชี้ แต่อาจใช้ที่จุดในอัตราร้อยละ 90 ก็ได้ สำหรับดีเซลหมุนเร็ว ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมันมีจุดเดือดสูงเกินไป ซึ่งจะทำให้เกิดควัน มีกลิ่นเหม็น และเครื่องยนต์สกปรกได้
7. สารกำมะถันและการกัดกร่อน กำมะถันในน้ำมันจะให้แก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ออกจากไอเสียเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศ เป็นอันตรายต่อมนุษย์ อีกทั้งยังเป็นสารที่ทำให้เกิดฝนกรด นอกจากนี้ เมื่อละลายในน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้จะทำให้เกิดกรดกัดกร่อนเครื่องยนต์ได้
8. เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปริมาณยางเหนียว เมื่อน้ำมันที่มีส่วนผสมของโอเลฟินส์ ไทโอฟินอล หรือสารประกอบของไนโตรเจนที่เกิดจากกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดเป็นยางเหนียว ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาลูกโซ่ขึ้น ในตอนแรกอาจจะละลายอยู่ในน้ำมัน แต่แล้วเมื่อโมเลกุลใหญ่ขึ้นก็จะตกตะกอนลงมา ซึ่งมักจะเกิดที่คาร์บูเรเตอร์ และตามวาล์วไอดี การปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันเบนซิน ทำได้โดยการเติมสารต้านการเกิดออกซิเดชัน เช่น สารประเภทฟีนิลินไดเอมีน และอะมิโนฟินอล เป็นต้น

## บทที่ 3

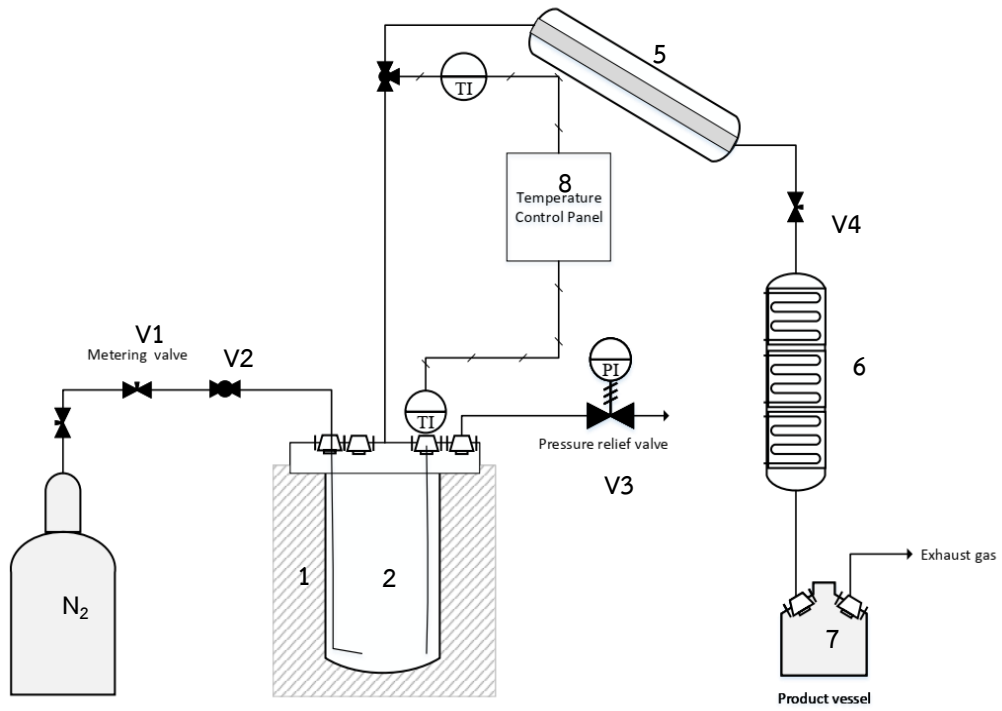
### วิธีดำเนินการวิจัย

#### การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบสำหรับกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิสและกระบวนการทำงาน

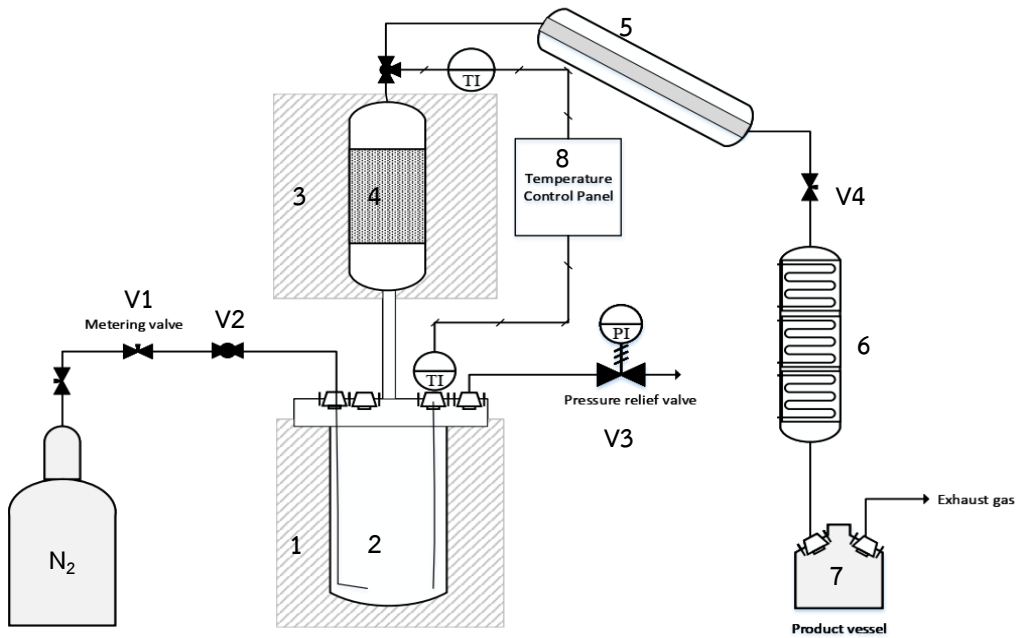
เครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบถูกออกแบบมาให้มีลักษณะเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว (Single stage) และแบบคู่ (Two-stage) ดังภาพที่ 3-1 และ 3-2 ตามลำดับ เพื่อศึกษาสภาวะการกลั่นแบบไพโรไลซิสขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนโดยเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองแบบติดตั้งร่วมกับหน่วยควบแน่น (Cooling unit) ประกอบด้วยชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่ (Double pipe) และแบบเกลียว (Coil and shell) ผลึกภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจะถูกเก็บไว้ในขวดเก็บผลิตภัณฑ์ปริมาตร 250 mL ในขั้นตอนสุดท้าย คุณลักษณะจำเพาะของเครื่องปฏิกรณ์มีรายละเอียด ดังตารางที่ 3-1 และภาพถ่ายเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบคู่แสดงในภาคผนวก ก

สำหรับกระบวนการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว กระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิสเริ่มต้นจากการบรรจุน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วปริมาตร 100-200 mL ในเครื่องปฏิกรณ์ (Pyrolysis reactor, หมายเลข 2) มีเตาให้ความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า (หมายเลข 1) เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส น้ำมันในสถานะไอระเหย (Vapor phase) จะถูกขับออกจากเครื่องปฏิกรณ์ด้วยความดันไอของสารระเหยร่วมกับแก๊สไนโตรเจนที่ถูกใช้เป็นแก๊สตัวพา (Carrier gas) เข้าสู่หน่วยควบแน่นเพื่อควบแน่นไอระเหยให้เป็นน้ำมันในสถานะของเหลวในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่ (หมายเลข 5) และถูกลดอุณหภูมิให้เท่ากับอุณหภูมิห้องในชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเกลียว (หมายเลข 6) ก่อนจะถูกเก็บไว้ในขวดเก็บผลิตภัณฑ์ (Product vessel, หมายเลข 7)

สำหรับกระบวนการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ ไอระเหยของน้ำมันจากเครื่องปฏิกรณ์หมายเลข 2 จะเข้าสู่คอลัมน์กลั่นน้ำมัน (Distillation column, หมายเลข 4) ที่ถูกกำหนดอุณหภูมิคงที่ไว้เพียงค่าเดียว ก่อนเข้าสู่หน่วยควบแน่นและเก็บผลิตภัณฑ์ของเหลวไว้ในขวดเก็บผลิตภัณฑ์ต่อไป



ภาพที่ 3-1 แผนภาพของกระบวนการไพโรไลซิสแบบขั้นตอนเดียวด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว



ภาพที่ 3-2 แผนภาพของกระบวนการไพโรไลซิสแบบสองขั้นตอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่

ตารางที่ 3-1 คุณลักษณะจำเพาะของเครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบ

หมายเลข	ส่วนประกอบ	คุณลักษณะจำเพาะ
1	เตาให้ความร้อนเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เตาเผาไฟฟ้า Inside diameter: 285 mm และ Outside diameter: 110 mm</li> <li>- ผนังภายนอกเป็นสแตนเลส ฉนวนทำด้วยอิฐทนไฟ รองรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุด 1,500°C และมีระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ PID control</li> <li>- ใช้ไฟฟ้า 220V, 50Hz</li> </ul>
2	เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสขนาด 60 mm x 150 mm ผนังหนา 6 mm ผลิตจากสแตนเลส SUS316 มีปริมาตรสูงสุด 300 mL</li> <li>- รองรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุด 800°C และความดัน 6 barg</li> <li>- มีช่องต่อกับภายนอก 4 ช่อง ได้แก่ ช่องป้อนแก๊สดำพา ช่องวัดอุณหภูมิ ช่องวัดความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ และช่องรองรับการใช้งานพิเศษ</li> </ul>
3	เตาให้ความร้อนของคอลัมน์กลั่นน้ำมัน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เตาเผาไฟฟ้า Inside diameter: 153 mm และ Outside diameter: 22 mm</li> <li>- ผนังภายนอกเป็นสแตนเลส ฉนวนทำจากอิฐทนไฟ รองรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุด 1,500°C และมีระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ PID control</li> <li>- ใช้ไฟฟ้า 220V, 50Hz</li> </ul>
4	คอลัมน์กลั่นน้ำมัน	ท่อสแตนเลสขนาด 3/8 inch รองรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุด 800°C

ตารางที่ 3-1 (ต่อ)

หมายเลข	ส่วนประกอบ	คุณลักษณะจำเพาะ
5	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่ (Double pipe heat exchanger)	ผลิตจากวัสดุแก้ว Borosilicate ด้านในเป็นท่อสแตนเลสขนาด 3/8 inch ต่อร่วมกับชุดทดลองด้วยระบบชั้นเกลียว
6	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเกลียว (Coil and shell heat exchanger)	ผลิตจากวัสดุแก้ว Borosilicate ต่อร่วมกับชุดทดลองด้วยระบบชั้นเกลียว
7	ขวดเก็บผลิตภัณฑ์ (Product vessel)	ขวดคูเรนที่มีช่องต่อกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเกลียว และช่องต่อสำหรับระบายแก๊สไปยังตู้ดูดควัน ผลิตจากวัสดุแก้ว Borosilicate สามารถเก็บผลิตภัณฑ์ได้ในปริมาตร 200 mL
8	อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)	PID controller จาก shimax รุ่น MAC3 Series ควบคุมอุณหภูมิแบบ Step control และ Fixed control ใช้งานร่วมกับ Temperature probe type K
V1	Control valve	Swagelok Metering Valve 1/4 inch 316 Stainless steel Model: B-4MQ-MH
V2	Ball valve	Swagelok Ball Valve 1/4 inch 316 Stainless steel Model: SS-42GS4
V3	Pressure relief valve	Hy-lok relief valve 1/4 inch 316 Stainless steel Model: RV1H-4T
V4	Needle valve	Hy-lok needle valve 1/4 inch 316 Stainless steel Model: NV2H-4T



### การศึกษาเบื้องต้น (Preliminary study) เพื่อหาช่วงอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส

การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการไพโรไลซิส เริ่มต้นจากการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว (Used engine oil) ด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) เพื่อวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วจำนวน 10 mg ในช่วงอุณหภูมิ 25-600°C ที่อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 5°C/min เพื่อนำไปสร้างกราฟ TG และ DTG วิเคราะห์หาช่วงอุณหภูมิในการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการศึกษาเบื้องต้น (Preliminary study) ของกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคูล์ที่อุณหภูมิห้องถึง 500°C โดยในการทดลอง Preliminary study ใช้ น้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว ปริมาตร 100 mL และ กำหนดอัตราการไหลของแก๊สตัวพาอยู่ที่เท่ากับ 100 mL/min ทำการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคูล์ที่ตั้งค่าอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ทั้งสองชุดด้วยการเพิ่มอุณหภูมิไว้เท่ากัน โดยเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 500°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/min โดยทุก ๆ ช่วง 50°C จะตั้งค่าให้อุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (200 250 300 350 400 450 และ 500°C) และเก็บผลิตภัณฑ์ซึ่งจะเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วในอุณหภูมิดังกล่าว ซึ่งน้ำหนักของน้ำมันไพโรไลซิส และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatography mass spectrometry (GC-MS) เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมี

### การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการไพโรไลซิส

อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา (Residence time) มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณและคุณภาพที่แตกต่างกัน ในการออกแบบการทดลองจึงมุ่งศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและ Residence time ในเครื่องปฏิกรณ์แบบคูล์และแบบคูล์ ดังนั้น การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการจึงถูกออกแบบ ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 แผนการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการไพโรไลซิส

ปัจจัยที่มีอิทธิพล	อุณหภูมิ (°C)		อัตราการไหล ของแก๊สตัวพา (mL/min)	เวลาที่ใช้ใน กระบวนการ (h)
	เครื่องปฏิกรณ์	คอลัมน์		
	ไพโรไลซิส	กลั่นน้ำมัน		
1. การศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ แบบเดี่ยว	350 400 500	- - -	15 15 15	4 4 4
2. การศึกษาอิทธิพลของ เครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ (เปรียบเทียบกับการใช้ เครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว ที่สภาวะเดียวกัน)	400	250	15	4
3. การศึกษาอิทธิพลของ อัตราการไหลของแก๊สตัวพา	400 400 400	250 250 250	15 30 50 100	2 2 2 2
4. การศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิคอลัมน์กลั่นน้ำมัน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่	400 400 400	250 300 350	30 30 30	2 2 2

### 1. การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว

น้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วจำนวน 100 mL บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสและประกอบอุปกรณ์ในส่วนต่าง ๆ ดังภาพที่ 3-1 เพื่อใช้งานในรูปแบบของเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว ปรับอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 15 mL/min และเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิสจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้ได้แก่ 350 400 และ 500°C โดยให้ความร้อนที่อัตรา 5°C/min คงอุณหภูมิที่กำหนดไว้เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นเก็บผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิสที่อยู่ในขวดเก็บผลิตภัณฑ์ วัดปริมาตรของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้และนำไปคำนวณกับความหนาแน่นของ

น้ำมันไพโรไลซิสเพื่อหามวลของผลิตภัณฑ์ หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการแล้วถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกทำการเก็บกากตะกอน (Residue) ที่เหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสไปวัดปริมาตร (ในกรณีของเหลว) หรือชั่งน้ำหนัก (ในกรณีของแข็ง) และคำนวณสมมูลมวลเพื่อหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (%Yield)

## 2. การศึกษาอิทธิพลของเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่

การศึกษานี้เปรียบเทียบการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยวที่สภาวะการทดลองเดียวกัน ซึ่งวิธีการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่นี้ใช้น้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วจำนวน 100 mL บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสและประกอบอุปกรณ์ในส่วนต่าง ๆ ดังภาพที่ 3-2 และบรรจุ glass beads ลงในคอลัมน์กลั่นน้ำมัน จากนั้นทำการปรับอัตราการไหลของแก๊สตัวพาเท่ากับ 15 mL/min ตั้งค่าอุณหภูมิของคอลัมน์กลั่นน้ำมันให้มีอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 250°C แล้วจึงเปิดเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 5°C/min จากอุณหภูมิห้องจนถึง 400°C และควบคุมอุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นเก็บผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิสที่อยู่ในขวดเก็บผลิตภัณฑ์ วัดปริมาตรของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้และนำไปคำนวณกับความหนาแน่นของน้ำมันไพโรไลซิสเพื่อหามวลของผลิตภัณฑ์ หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการแล้วถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกทำการเก็บกากตะกอน (Residue) ที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสไปวัดปริมาตรหรือชั่งน้ำหนัก และคำนวณสมมูลมวลเพื่อหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (%Yield)

## 3. การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพา

น้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วจำนวน 200 mL บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสและประกอบอุปกรณ์ในส่วนต่าง ๆ ดังภาพที่ 3-2 เพื่อใช้งานแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ และบรรจุ glass beads ลงในคอลัมน์กลั่นน้ำมัน จากนั้นทำการปรับอัตราการไหลของแก๊สตัวพาตามสภาวะที่ศึกษาในช่วง 15-100 mL/min เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพา และตั้งค่าอุณหภูมิของคอลัมน์กลั่นน้ำมันให้อุณหภูมิได้ 250°C แล้วจึงเปิดเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 5°C/min จากอุณหภูมิห้องจนถึง 400°C และควบคุมอุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเก็บผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิสที่อยู่ในขวดเก็บผลิตภัณฑ์ วัดปริมาตรของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้และนำไปคำนวณกับความหนาแน่นของน้ำมันไพโรไลซิสเพื่อหามวลของผลิตภัณฑ์ หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการแล้วถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกทำการเก็บกากตะกอน (Residue) ที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสไปวัดปริมาตรหรือชั่งน้ำหนัก และคำนวณสมมูลมวลเพื่อหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (%Yield)

**4. การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของคอลัมน์กลั่นน้ำมันในเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่**  
น้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วจำนวน 200 mL บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสและประกอบอุปกรณ์ในส่วนต่าง ๆ ดังภาพที่ 3-2 เพื่อใช้งานแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ จากนั้นทำการปรับอัตราการไหลของแก๊สตัวพาเท่ากับ 30 mL/min ตั้งค่าอุณหภูมิของคอลัมน์กลั่นน้ำมันให้มีอุณหภูมิเท่ากับ 250-300°C เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในคอลัมน์กลั่นน้ำมัน แล้วจึงเปิดเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 5°C/min จากอุณหภูมิห้องจนถึง 400°C และควบคุมอุณหภูมิกที่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเก็บผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิสที่อยู่ในขวดเก็บผลิตภัณฑ์ วัดปริมาตรของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้และนำไปคำนวณกับความหนาแน่นของน้ำมันไพโรไลซิสเพื่อหามวลของผลิตภัณฑ์ หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการแล้วถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ทำการเก็บกากตะกอน (Residue) ที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสไปวัดปริมาตรหรือชั่งน้ำหนัก และคำนวณสมมูลมวลเพื่อหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (%Yield)

### การศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส

#### 1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิดคือ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (98%, ALFA AESAR),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (98%, ALFA AESAR) และ Bentonite (Na-Bentonite, Commercial grade) ถูกเผาในเตาเผาแบบท่อที่อุณหภูมิ 700°C ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนเพื่อกำจัดสารปนเปื้อน ก่อนนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส

#### 2. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส

การทดลองนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ Bentonite ด้วยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 3wt% ลงในน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วปริมาตร 200 mL และทำการปั่นกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนเริ่มกระบวนการ จากนั้นประกอบอุปกรณ์เพื่อใช้งานเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 400°C น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้ จะทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง GC-MS เปรียบเทียบกับน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะในการไพโรไลซิสด้วยอุณหภูมิ 400°C อุณหภูมิการกลั่นเท่ากับ 250°C และใช้อัตราการไหลของแก๊สตัวพาเท่ากับ 30 mL/min

### การคำนวณสมมูลมวลสารและร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

การคำนวณสมมูลมวลสารสามารถหาได้หลังจากที่นำน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วที่เป็น วัตถุประสงค์และน้ำมันไพโรไลซิสไปหาความหนาแน่นและคำนวณในสมการ 3-1 เพื่อหามวลของ น้ำมัน และคำนวณสมมูลมวลจากสมการ 3-2 โดยมวลสารตั้งต้นจะเท่ากับมวลสารผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สถานะ จำนวนร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของแก๊ส ของเหลว และ Residue ดังสมการที่ 3-3 และคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น (%Conversion) ดังสมการที่ 3-4

$$\text{ความหนาแน่น (D, g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{มวลของสาร (m)}}{\text{ปริมาตรของสาร (V)}} \quad (3-1)$$

$$\text{มวลสารตั้งต้น (กรัม)} = \text{มวลแก๊ส} + \text{มวลน้ำมันไพโรไลซิส} + \text{มวลกากตะกอน} \quad (3-2)$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของสารผลิตภัณฑ์ (%Yield)} = \frac{\text{มวลสารผลิตภัณฑ์ (กรัม)}}{\text{มวลสารตั้งต้น (กรัม)}} \times 100 \quad (3-3)$$

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น (%Conversion)} = \text{Gas yield} + \text{Oil yield} \quad (3-4)$$

### การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางพลังงาน

วิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากสถานะที่เหมาะสม เปรียบเทียบกับค่าพลังงานความร้อนของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วตั้งต้น โดยวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของน้ำมัน ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb calorimeter)

### การวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วและน้ำมันไพโรไลซิส

น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากทุกสถานะที่ศึกษาจะถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ จุดวาบไฟ ความหนืด ค่าพลังงานความร้อน ปริมาณซัลเฟอร์ และองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันไพโรไลซิสเปรียบเทียบกับน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว โดยสมบัติดังกล่าวจะมีผลต่อการเลือกสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการ เครื่องมือและรายละเอียดการวิเคราะห์ดังตารางที่

ตารางที่ 3-3 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติของน้ำมัน

เครื่องมือวิเคราะห์	ผู้ผลิต	รุ่น	รายละเอียดการใช้งาน
เครื่องวัดความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของน้ำมัน (Density and Specific gravity)	Mettler Toledo	DM45	วัดความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 15.6°C อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 1298
เครื่องวัดความหนืด (Viscosity)	PMT	TV2000	วัดความหนืดของน้ำมันที่อุณหภูมิ 40C ด้วยวิธีการ ตามมาตรฐาน ASTM D 445
เครื่องวิเคราะห์จุดวาบไฟ (Flash point)	Normalab	NMP221	เครื่องวิเคราะห์จุดวาบไฟแบบ HALF AUTOMATED Pensky-Martens flash tester วัดอุณหภูมิที่เกิดการวาบไฟ ของน้ำมันแบบ closed cup โดยเริ่มต้นจากอุณหภูมิ 18°C ซึ่งเป็นวิธีการตามมาตรฐาน ASTM D 93
แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS)	Agilent	6890	Column: DB-5MS, Length: 30m, Int. Diameter: 250, Film Thickness: 0.25, Carrier gas: Helium, Column Flow: 1 mL/min, Inlet Type: Split/Splitless, Split Ratio: 20, Inlet Temperature: 250°C, Oven temperature ramp: Initial at 40°C with ramp rate 5°C/min to 300°C, and 5 min holding time

ตารางที่ 3-3 (ต่อ)

เครื่องมือวิเคราะห์	ผู้ผลิต	รุ่น	รายละเอียดการใช้งาน
เครื่องวิเคราะห์การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA)	Perkin Elmer	Pyris 1	วิเคราะห์อุณหภูมิในการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันในช่วงระหว่าง 25-600°C และมีอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5°C/min ภายใต้ความดันบรรยากาศ
แก๊สโครมาโทกราฟี-แบบกลั่นลำดับส่วน (Distillation Gas Chromatography, DGC)	Agilent	6890 N	วิเคราะห์ช่วงจุดเดือดในการกลั่นของน้ำมันไพโรไลซิสตามมาตรฐาน ASTM D 2887
เครื่องวิเคราะห์ค่าพลังงาน (Bomb Calorimeter)	Leco	AC-500	วิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนของน้ำมันในหน่วย cal/g
เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์ X-ray fluorescence (XRF)	Oxford instruments	X-Supreme	วิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของซัลเฟอร์ในหน่วย wt% อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 4294

## บทที่ 4

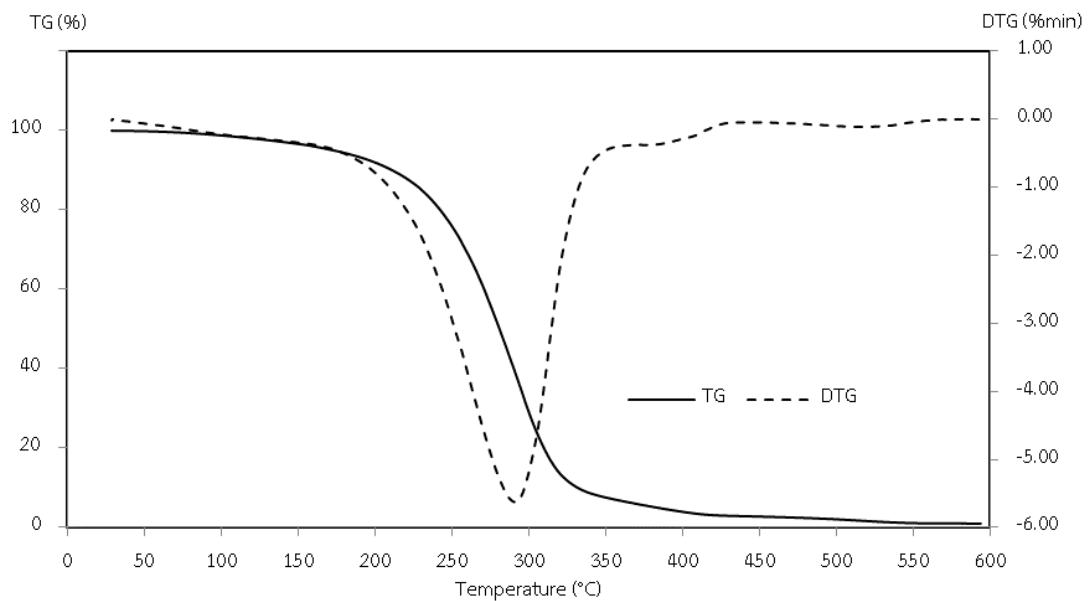
### ผลการทดลอง

#### การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาช่วงของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส

##### 1. ผลของการศึกษาการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วด้วยวิธี

##### Thermogravimetric analysis (TGA)

การศึกษาการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วด้วยเทคนิค TGA จะวิเคราะห์หาการสูญเสียน้ำหนักของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 25°C จนถึง 600°C ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 กราฟ TG และ DTG ของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว

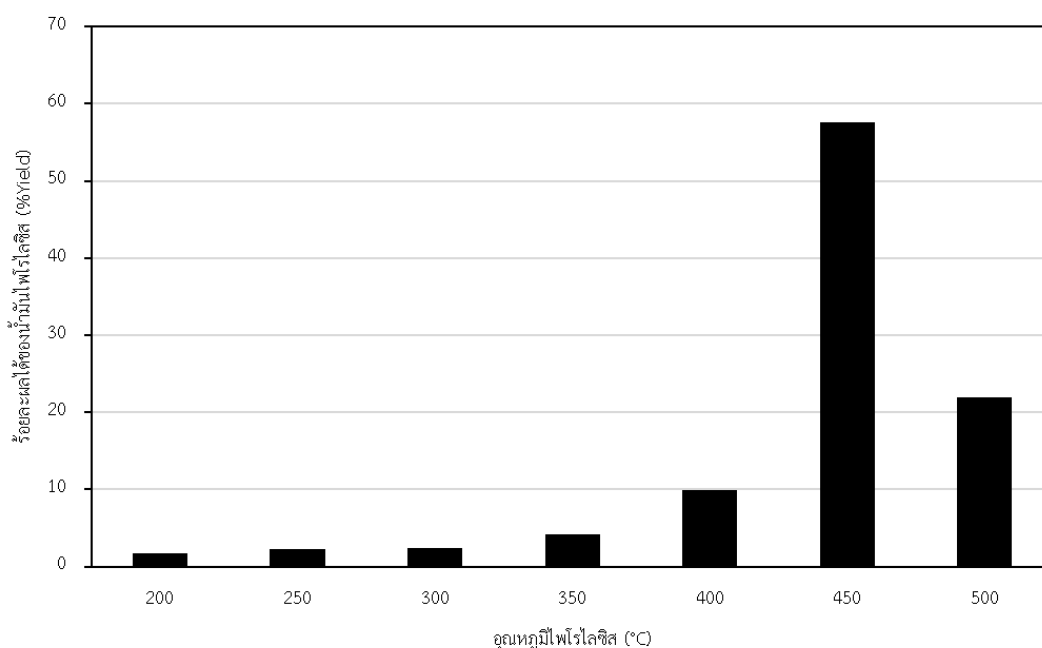
จากกราฟพบว่า มีการสูญเสียน้ำหนักของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งที่ 1 ช่วงอุณหภูมิ 150-350°C เกิดการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็ก และน้ำมันพื้นฐาน (Base oil) ส่วนตำแหน่งที่ 2 ช่วงอุณหภูมิ 350-425°C เกิดการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว (Tripathi & Vinu, 2015) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนหรือปฏิกิริยา Thermal cracking จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง และยังพบว่า



น้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วเกิดการแตกตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิมากกว่า 425°C จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยา Thermal cracking ในกระบวนการไพโรไลซิสอยู่ที่ระหว่าง 350-500°C ช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจึงเป็นสถานะเริ่มต้นที่ถูกกำหนดในการทดลองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการไพโรไลซิสของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว

## 2. ผลของการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ (Two-stage reactor)

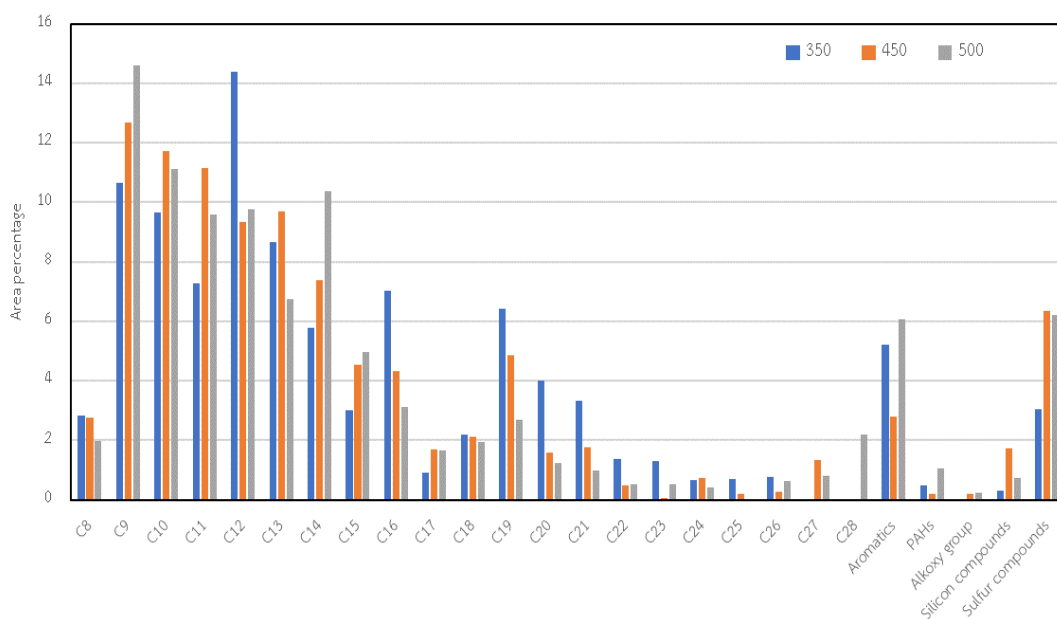
การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบคู่ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิส (%Yield) ในแต่ละอุณหภูมิเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ TGA และมีจุดประสงค์เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบการทดลองหาสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิส เป็นการทดลองที่ให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 500°C มีอัตราการให้ความร้อนที่ 5°C/min และรักษาอุณหภูมิของเตาเผาไพโรไลซิส และคอลัมน์กลั่นน้ำมันให้ใกล้เคียงกันตามอุณหภูมิที่กำหนด (200 250 300 350 400 450 และ 500°C) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สตัวพา (Carrier gas) คงที่เท่ากับ 100 mL/min ผลการทดลองดังภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-2 ร้อยละผลได้น้ำมันไพโรไลซิสที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

จากผลการทดลอง พบว่า อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น และสูงสุดที่อุณหภูมิ 450°C ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ที่พบว่า มีการสูญเสียน้ำหนักของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วมากกว่า 90% แสดงถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา Thermal cracking ที่มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 500°C พบว่า มีปริมาณร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสน้อยลงแม้ว่าจะเกิดปฏิกิริยา Thermal cracking ได้อย่างสมบูรณ์ตามผลการวิเคราะห์ TGA เนื่องจากทำการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะทำให้สารตั้งต้น (น้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว) เหลือปริมาณน้อยจนไม่สามารถเกิดปฏิกิริยา Thermal cracking ให้ผลิตภัณฑ์ออกมาได้อีก การวิเคราะห์เชิงปริมาณจึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมของกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะนี้ ได้แก่ อุณหภูมิ 450°C

นอกจากการศึกษาผลของอุณหภูมิในเชิงปริมาณแล้ว การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันไพโรไลซิสในแต่ละอุณหภูมิด้วยเครื่อง GC-MS ก็ส่งผลต่อการเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการไพโรไลซิส ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 450 และ 500°C ดังภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400°C 450°C และ 500°C

จากภาพที่ 4-3 พบว่า อุณหภูมิมีผลทำให้ปริมาณของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน  $C_8-C_{28}$  แตกต่างกัน โดยน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากอุณหภูมิ 400°C มีปริมาณของ  $C_{12}$  มากที่สุด คิดเป็น 14.3% และไม่มีองค์ประกอบของ  $C_{27}$  และ  $C_{28}$  แต่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 450°C และ 500°C พบว่า มีปริมาณองค์ประกอบของ  $C_9$  มากที่สุดที่ 12.6% และ 14.5% ตามลำดับ และจากกราฟพบว่า สารประกอบไฮโดรคาร์บอนช่วง  $C_9-C_{11}$  เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถสรุปโดยแบ่งตามช่วงการกลั่นในบรรยากาศของน้ำมันดิบ (Atmospheric distillation) ได้ดังตารางที่ 4-1 โดยอ้างอิงจำนวนคาร์บอนตามช่วงการกลั่นจาก Coker (2018)

ตารางที่ 4-1 ผลผลิตกัณฑ์ปิโตรเลียมแบ่งตามช่วงการกลั่น

ช่วงการกลั่น	จำนวนคาร์บอน	Area percentage		
		400°C	450°C	500°C
แก๊สโซลีน (Gasoline)	$C_5-C_{11}$	30.2	38.3	37.2
เคโรซีนและแก๊สออยล์ (Kerosene and gas oil)	$C_{12}-C_{19}$	48.1	44.0	41.2
น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating oil)	$C_{20}-C_{27}$	12.1	6.4	5.1
น้ำมันเตา (Heavy oil)	$>C_{28}$	0.0	0.0	2.2

ตารางที่ 4-1 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 450°C และ 500°C มีปริมาณองค์ประกอบของแก๊สโซลีนที่ 38.3% และ 37.2% ตามลำดับซึ่งมากกว่าที่อุณหภูมิ 400°C ที่มีปริมาณ 30.2% แต่มีปริมาณองค์ประกอบของเคโรซีนและแก๊สออยล์ที่ 44.0% และ 41.2% ตามลำดับซึ่งน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 400°C ที่มีปริมาณ 48.1% และเมื่อพิจารณาปริมาณองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นพบว่า อุณหภูมิ 400°C ให้ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่น ( $C_{20}-C_{27}$ ) ที่ 12.1% ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิอื่น ซึ่งเกิดจากที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยา Thermal cracking ได้ดี ทำให้เกิดการแตกตัวของน้ำมันได้มากขึ้นและมีโมเลกุลเล็กลง ส่งผลให้ปริมาณของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่สั้นเพิ่มมากขึ้นและสายโซ่ยาวลดลง นอกจากนี้พบว่า ที่อุณหภูมิ 500°C มีองค์ประกอบของน้ำมันเตาในปริมาณ 2.2% ซึ่งเป็นผลจากการที่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวหรือ Heavy hydrocarbons เกิดการแตกตัวออกมาได้มากขึ้น

แต่เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีในส่วนอื่น ได้แก่ สารประกอบอะโรมาติก (Aromatic) สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติก (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) ไบไซคลิก (Bicyclic compounds) และเฮเทอโรไซคลิก (Heterocyclic compounds) สารประกอบกลุ่ม Alkoxy สารประกอบซิลิคอน (Silicon compounds) และสารประกอบซัลเฟอร์ (Sulfur compounds) ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นสารที่มาจากสารเพิ่มคุณภาพ (Additives) ในน้ำมันเครื่องยนต์และจัดเป็นสารพิษที่มีอันตรายกับมนุษย์และสิ่งแวดล้อม และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง GC-MS สามารถแบ่งกลุ่มประเภทของสารประกอบได้ดังตารางที่ 4-2 โดยรายละเอียดชนิดของสารประกอบแต่ละกลุ่มและปริมาณที่ตรวจพบแสดงไว้ในภาคผนวก

ตารางที่ 4-2 ประเภทและปริมาณสารประกอบเจือปนในน้ำมันไฟโรไลซิส

สารประกอบ	Area percentage		
	400°C	450°C	500°C
อะโรมาติก (Aromatic)	5.21	2.81	6.06
โพลีไซคลิกอะโรมาติก (Polycyclic aromatic compounds, PAHs) และไบไซคลิก (Bicyclic compounds)	0.49	0.21	1.06
สารประกอบในกลุ่มแอลคอกซี (Alkoxy compounds)	0.04	0.19	0.22
สารประกอบซิลิคอน (Silicon compounds)	0.30	1.72	0.72
สารประกอบซัลเฟอร์ (Sulfur compounds)	3.03	6.36	6.22

จากตารางที่ 4-2 แสดงองค์ประกอบของสารประกอบอะโรมาติกที่ถูกจัดเป็นสารก่อมะเร็งหรือสาร Carcinogen ซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ (อาทิตยา จิตจำนง, 2559) ในปริมาณ 5.21% 2.81% และ 6.06% ที่อุณหภูมิ 400 450 และ 500°C ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบอะโรมาติกมีจุดเดือดต่ำและสามารถระเหยออกมาได้ง่ายทำให้ตรวจพบว่ามีปริมาณมากในช่วงอุณหภูมิต่ำ (400°C) แต่ยังพบว่า มีสารประกอบอะโรมาติกปริมาณสูงถึง 6.06% ที่อุณหภูมิ 500°C ที่เป็นอุณหภูมิสูงที่สุดในกระบวนการ ซึ่งอาจเกิดจากการแตกตัวของสารประกอบมวลโมเลกุลสูงเป็นสารประกอบอะโรมาติกมวลเบามากขึ้น สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติก (PAHs) ได้แก่ Phenanthrene และ Phenanthrene, 9,10-dihydro-1-methyl ที่มีจุดเดือดอยู่ที่ 340°C และ 345.04°C ตามลำดับ ถูกตรวจพบในปริมาณ 0.30% และ 0.19% ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 400°C แต่เมื่อพิจารณาที่

อุณหภูมิ 500°C พบว่า มีปริมาณสารประกอบไบไซคลิก มากกว่าอุณหภูมิ 450°C แต่ไม่ตรวจพบที่อุณหภูมิ 400°C เนื่องจากผลของปฏิกิริยา Thermal cracking ซึ่งเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการแตกตัวของสารประกอบโมเลกุลใหญ่ได้มากขึ้น

สารประกอบในกลุ่มแอลคอกซี ได้แก่ 2-[2-(2-butoxyethoxy) ethoxy]ethanol และสารประกอบซิลิคอน ได้แก่ Silane, trichlorodocosyl เป็นสารไฮดรอลิก (hydraulic fluids) และเป็นสารเพิ่มคุณภาพในน้ำมันหล่อลื่น เพื่อช่วยในการเพิ่มความหนืดให้กับน้ำมันและลดการเสียดสีของเครื่องยนต์ ซึ่งจัดเป็นสารอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม (Sasol Chemicals Ltd, 2018) จากผลการวิเคราะห์ด้วย GC-MS พบว่า สารประกอบทั้ง 2 กลุ่มนี้มีปริมาณมากขึ้นที่อุณหภูมิสูง แสดงให้เห็นว่าในน้ำมันหล่อลื่นหรือน้ำมันเครื่องยนต์อาจมีการเติมสารนี้ไปในปริมาณมาก และอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลทำให้เกิดการระเหยออกมาได้มากขึ้น

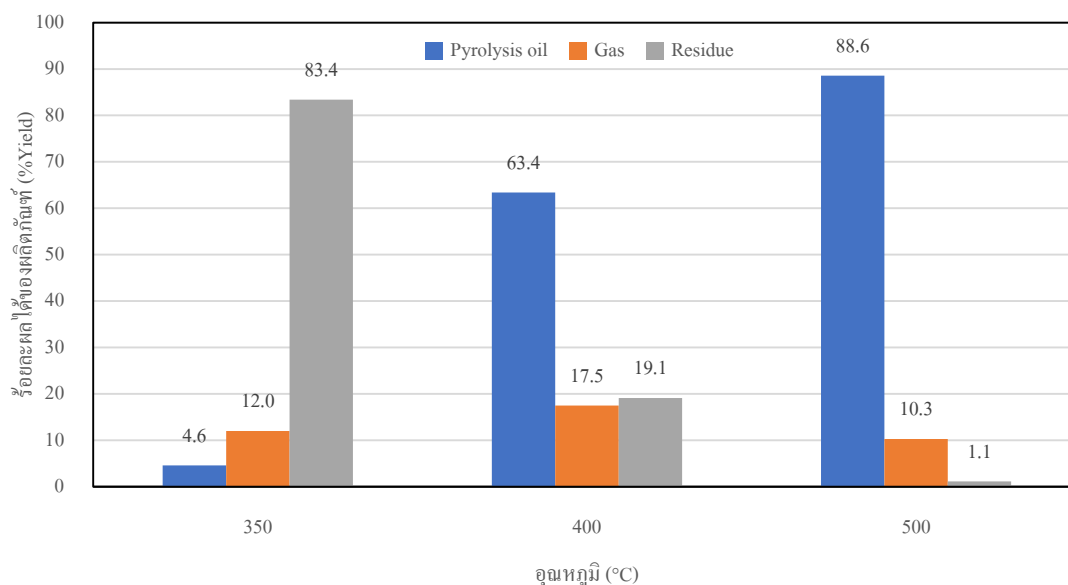
สารประกอบซัลเฟอร์ที่ถูกตรวจพบในน้ำมันไพโรไลซิสทุกชนิดอยู่ในรูปของเอสเทอร์ โดยมีปริมาณทั้งหมด 3.03% 6.36% และ 6.22% ที่อุณหภูมิ 400 450 และ 500°C ตามลำดับ พบว่า มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงจะสามารถเกิดการระเหยของสารประกอบซัลเฟอร์ได้มากขึ้นเพราะสารเหล่านี้มีน้ำหนักโมเลกุลและจุดเดือดสูง และเนื่องจากการปนเปื้อนของสารประกอบซัลเฟอร์ถูกควบคุมในการค้ำน้ำมันทุกชนิด โดยน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถใช้งานได้ ในอุตสาหกรรมหรือเครื่องยนต์ทุกประเภท จำเป็นต้องมีปริมาณซัลเฟอร์ที่อยู่ในช่วงของมาตรฐานน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละชนิด จึงทำให้ปริมาณซัลเฟอร์มีผลต่อการเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการไพโรไลซิสอย่างมาก และแม้ว่าในการศึกษาที่ผ่านมาอุณหภูมิ 450°C จะให้ %Yield ของน้ำมันไพโรไลซิสมากที่สุด แต่ก็ยังมีปริมาณของสารประกอบซัลเฟอร์ปนเปื้อนมาในปริมาณที่มากขึ้นถึง 2 เท่าด้วยเช่นกัน ดังนั้นในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม อุณหภูมิ 400°C จึงถูกกำหนดให้เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นในการหาปัจจัยที่มีอิทธิพลอื่น ๆ ซึ่งจะอภิปรายในหัวข้อถัดไป

### การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการไพโรไลซิส

การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ การศึกษาอิทธิพลของเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยวและแบบคู่ อิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพา และอิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการกลั่น ผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

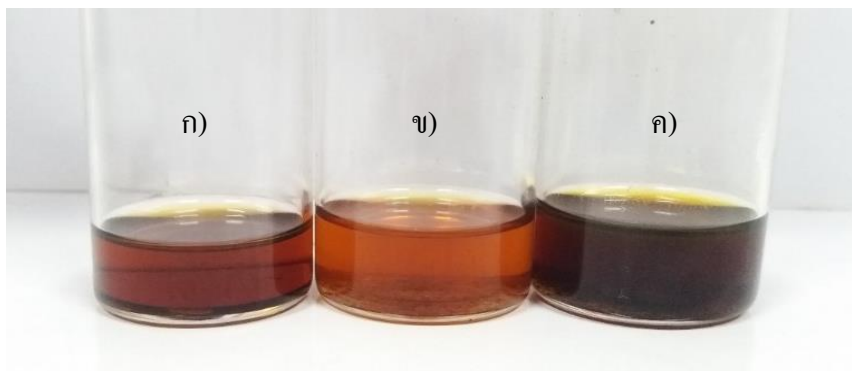
## 1. ผลของการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว

ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยวที่อุณหภูมิ 350 400 และ 500°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/min และอัตราการไหลของแก๊สตัวพา 15 mL/min ผลการทดลองดังภาพที่ 4-4



ภาพที่ 4-4 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว

ภาพที่ 4-4 แสดงให้เห็นว่าร้อยละผลได้ (%Yield) ของน้ำมันไพโรไลซิส มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 4.6% 63.4% และ 88.6% อีกทั้งพบว่า ปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวที่เหลือจากการไพโรไลซิส (Residue) ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 83.4%, 19.1% และ 1.1% ที่อุณหภูมิ 350°C 400°C และ 500°C ตามลำดับ สอดคล้องกับการเกิดปฏิกิริยา Thermal cracking ที่เกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง โดยจะพบว่า ที่อุณหภูมิ 500°C มี Residue ในปริมาณน้อยมาก เพราะเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในสถานะของแข็งหรือถ่านชาร์ (Char) เท่ากับ 1.1% เนื่องจาก Residue เกิดการแตกตัวกลายเป็นน้ำมันไพโรไลซิสได้มากขึ้น ทำให้น้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500°C มีปริมาณของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวมาก จากสาเหตุดังกล่าวส่งผลให้สีของน้ำมันไพโรไลซิสมีสีเข้มมากที่สุด เมื่อเทียบกับน้ำมันไพโรไลซิสจากสภาวะอุณหภูมิอื่น ๆ ดังภาพที่ 4-5 และมีองค์ประกอบของสารประกอบมวลโมเลกุลและจุดเดือดสูง เช่น สารประกอบซัลเฟอร์ ที่เป็นพิษและทำให้น้ำมันไม่บริสุทธิ์ โดยอ้างอิงจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง GC-MS



ภาพที่ 4-5 ลักษณะทางกายภาพของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยวที่อุณหภูมิ ก) 350°C ข) 400°C และ ค) 500°C

ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิสได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ความหนืด (Viscosity) และจุดวาบไฟ (Flash point) ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4-3 พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากอุณหภูมิ 400°C และ 500°C เท่ากับ 0.82 และ 0.83 ตามลำดับ และความหนืดของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400°C มีค่าเท่ากับ 3.5 cSt ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว แต่พบว่า น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากอุณหภูมิ 500°C จะมีความหนืดสูงขึ้นอยู่ที่ 7.6 cSt และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำมันดีเซลหมุนช้า เนื่องจากมีปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวมากขึ้น และนอกจากนี้ยังพบว่า จุดวาบไฟของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากทุกสภาวะอุณหภูมิต่ำกว่ามาตรฐานน้ำมันดีเซลที่กำหนดไว้ต้องไม่น้อยกว่า 52°C เนื่องจากมีองค์ประกอบของน้ำมันเบา เช่น แนฟทา และเคโรซีนปะปนอยู่ในปริมาณมาก อีกทั้งมีองค์ประกอบของสารระเหยง่าย เช่น สารประกอบอะโรมาติก (Miandad et al., 2018) จึงส่งผลให้จุดวาบไฟยังต่ำกว่ามาตรฐานและต้องได้รับการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปใช้งานเมื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบของน้ำมันที่มีช่วงจุดเดือดต่างกัน ด้วยเครื่อง DGC โดยอ้างอิงจุดตัดของช่วงอุณหภูมิในการกลั่นน้ำมันดิบจากตารางที่ 4-4 และผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4-6

ตารางที่ 4-3 สมบัติของน้ำมันไฟโรไลซิสที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิด้วย  
เครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว (พระราชบัญญัติการค้าน้ำมันเชื้อเพลิงพุทธศักราช 2543,  
2556)

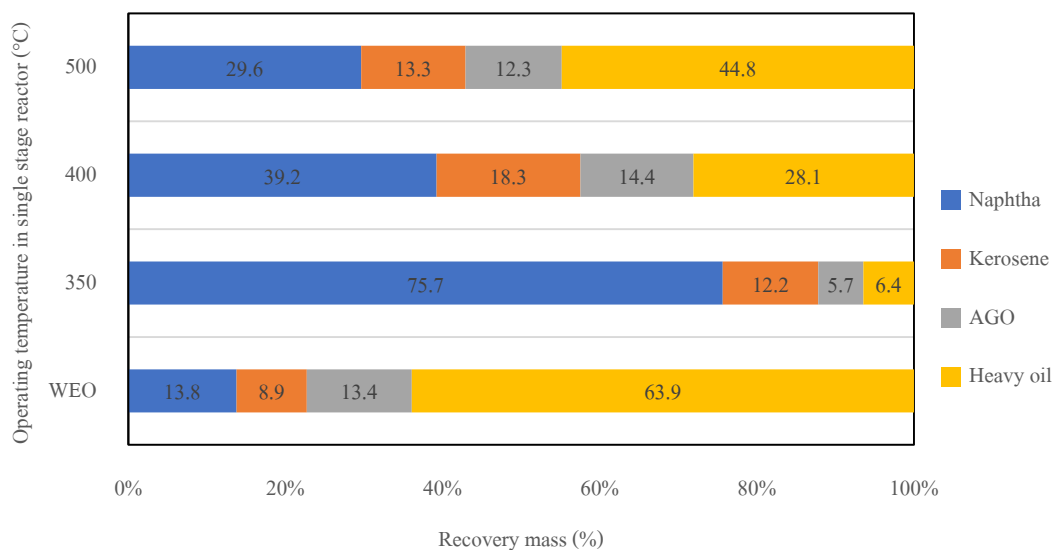
สมบัติ	อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ (°C)			มาตรฐาน น้ำมันดีเซล	มาตรฐาน น้ำมันดีเซล
	350	400	500	หมุนเร็ว	หมุนช้า
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	N/D	0.82	0.83	0.81-0.87	<0.92
ความหนืด (Viscosity, cSt)	N/D	3.5	7.6	1.8-4.1	<8.0
จุดวาบไฟ (Flash point, °C)	N/D	20	18	>52	>52

หมายเหตุ : N/D: ผลลัพธ์ที่มีปริมาณน้อยมากไม่สามารถวิเคราะห์ได้

ตารางที่ 4-4 ช่วงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ (Coker, 2018)

ผลิตภัณฑ์	ช่วงอุณหภูมิ (°C)
แนฟทา (Naphtha)	88-193
เคโรซีน (Kerosene)	193-271
แก๊สออยล์ (Atmospheric gas oil, AGO)	271-343
น้ำมันเตา (Heavy oil)	>343

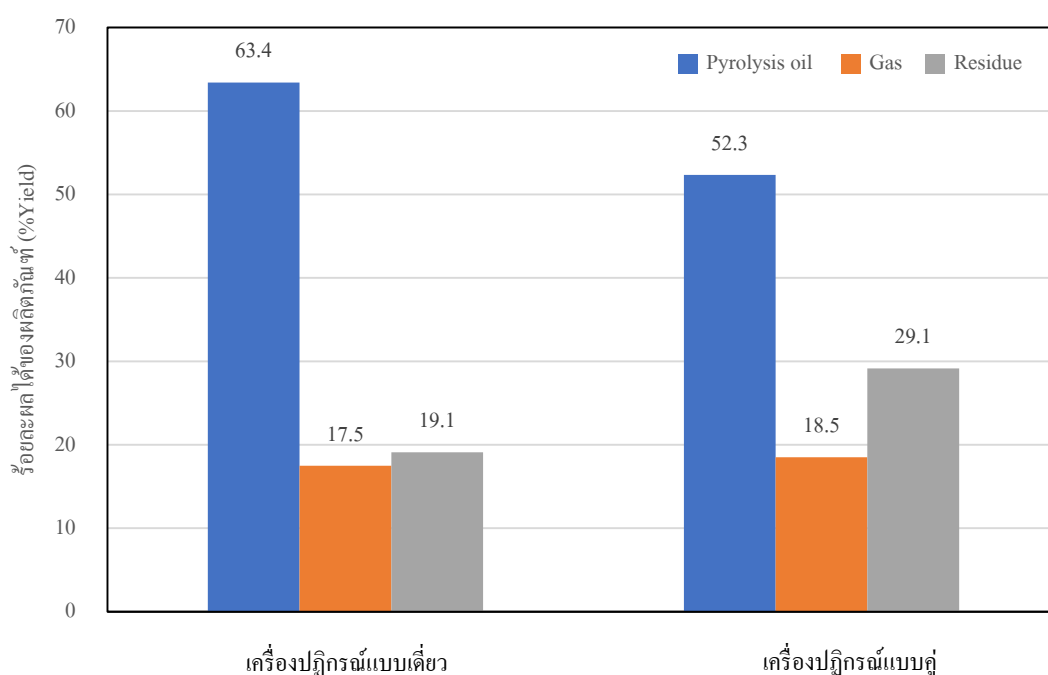




ภาพที่ 4-6 ปริมาณองค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว

การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสจากภาพที่ 4-6 พบว่า องค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสที่สภาวะอุณหภูมิต่าง ๆ มีปริมาณของเนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์มากขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วที่เป็นสารตั้งต้น (Feed) โดยน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากอุณหภูมิ 350°C มีองค์ประกอบของเนฟทาสูงที่สุดที่ 75.7% และมีปริมาณ Heavy oil น้อยที่สุดเท่ากับ 6.4% ส่วนน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500°C มี Heavy oil มากที่สุดเท่ากับ 44.8% ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของน้ำมันและร้อยละผลได้ของน้ำมันที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีองค์ประกอบของสารที่มีจุดเดือดสูงและมีมวลโมเลกุลสูง แต่เมื่อพิจารณาน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400°C พบว่า มีปริมาณของเนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์ และ Heavy oil ในปริมาณ 39.0% 18.2% 14.3% และ 27.9% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400°C จะพบว่ามีความเหมาะสมในเชิงปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS พบว่า มีการปนเปื้อนของสารประกอบซัลเฟอร์น้อยกว่า น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากอุณหภูมิ 500°C จึงกำหนดอุณหภูมิที่ 400°C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว เพื่อใช้ในการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ในขั้นต่อไป

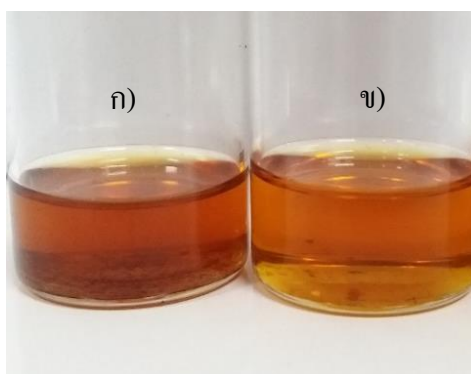
**2. ผลของการศึกษากระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่**  
 การทดลองการศึกษากระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ กำหนดอุณหภูมิไพโรไลซิสเท่ากับ 400°C และอัตราการให้ความร้อน 5°C/min โดยกำหนด อุณหภูมิในคอลัมน์กลั่นน้ำมันให้คงที่เท่ากับอุณหภูมิ 250°C ใช้อัตราการไหลของแก๊สตัวพาคงที่ เท่ากับ 15 mL/min โดยเปรียบเทียบร้อยละผลได้ (%Yield) ของผลิตภัณฑ์เทียบกับการใช้ เครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว ผลการทดลองดังภาพที่ 4-7



ภาพที่ 4-7 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว และแบบคู่

จากภาพที่ 4-7 แสดงปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ เปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว พบว่า ปริมาณน้ำมันไพโรไลซิสจากการไพโรไลซิสด้วย เครื่องปฏิกรณ์แบบคู่เท่ากับ 52.3% ซึ่งน้อยกว่าปริมาณน้ำมันไพโรไลซิสจากการไพโรไลซิสด้วย เครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว และเกิดแก๊สเพิ่มขึ้นจาก 17.5% ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยวเป็น 18.5% ในเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบคู่สามารถเพิ่มระยะเวลาของ การเกิดปฏิกิริยา (Residence time) ในเครื่องปฏิกรณ์มากกว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว ส่งผลให้ปฏิกิริยา Thermal cracking เกิดได้มากขึ้น อีกทั้งอาจเกิดปฏิกิริยาแตกตัวซ้ำภายใน

คอลัมน์กลั่นน้ำมัน และมีผลทำให้ปริมาณของน้ำมันไพโรไลซิสลดลงและเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้น และนอกจากนี้ยังพบว่า น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบคูมีสีที่อ่อนกว่าและมีสิ่งสกปรกเจือปนน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด ดังภาพที่ 4-8 เนื่องจาก glass beads ในคอลัมน์กลั่นน้ำมันมีความสามารถในการช่วยดักจับเขม่าและสิ่งเจือปนอนุภาคใหญ่ในน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วได้



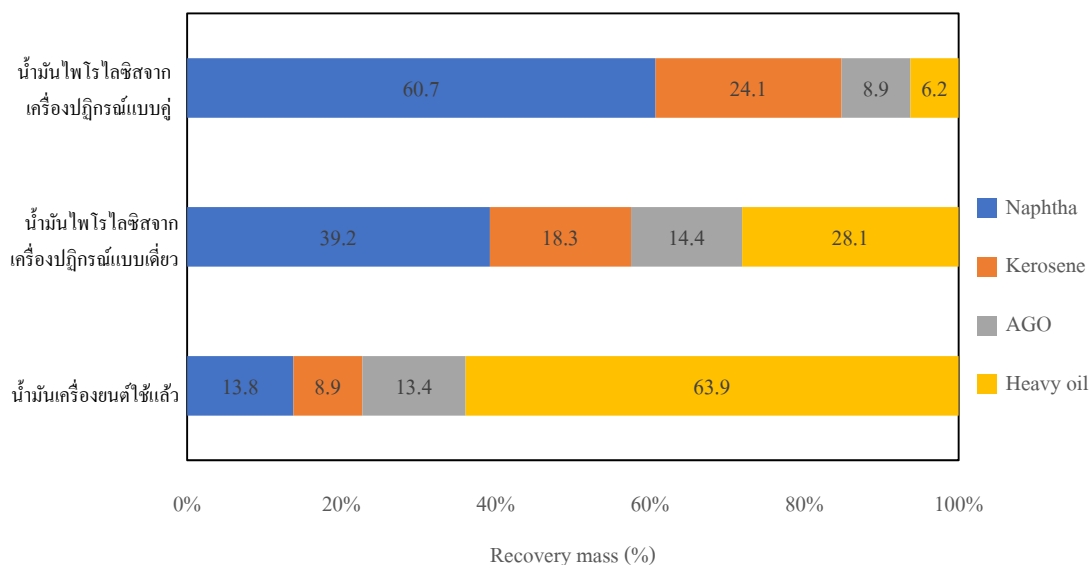
ภาพที่ 4-8 ลักษณะทางกายภาพของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วย  
ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว และ ข) เครื่องปฏิกรณ์แบบคู่

สำหรับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพน้ำมันไพโรไลซิส ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ความหนืด (Viscosity) และจุดวาบไฟ (Flash point) ดังตารางที่ 4-5 พบว่า ความถ่วงจำเพาะและความหนืดของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการกลั่นแบบไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคูเท่ากับ 0.81 และ 1.7 cSt ตามลำดับ ซึ่งความหนืดมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำมันดีเซลหมุนเร็วเพียงเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว จะพบว่า ความถ่วงจำเพาะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ความหนืดมีค่าที่ต่างกัน อย่างเห็นได้ชัด โดยเพิ่มขึ้นเป็น 3.5 cSt สำหรับน้ำมันที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว ในขณะที่จุดวาบไฟยังมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำมันดีเซลอยู่มาก และมีค่าที่ไม่แตกต่างกันสำหรับการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยวและแบบคู่ เนื่องจากการมีปริมาณของเนฟทาและสารประกอบอะโรมาติกที่ระเหยง่ายปะปนอยู่ในน้ำมันไพโรไลซิส

ตารางที่ 4-5 สมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว และแบบคู่ (พระราชบัญญัติการค้าน้ำมันเชื้อเพลิงพุทธศักราช 2543, 2556)

สมบัติ	สถานะที่ศึกษา		มาตรฐาน น้ำมันดีเซล หมุนเร็ว	มาตรฐาน น้ำมันดีเซล หมุนช้า
	เครื่องปฏิกรณ์ แบบเดี่ยว	เครื่องปฏิกรณ์ แบบคู่		
	ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	0.82	0.81	0.81-0.87
ความหนืด (Viscosity, cSt)	3.5	1.7	1.8-4.1	<8.0
จุดวาบไฟ (Flash point, °C)	20	18	>52	>52

ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสด้วยเครื่อง DGC โดยอ้างอิงจุดตัดของช่วงอุณหภูมิของน้ำมันจากตารางที่ 4-4 และผลการวิเคราะห์ดังกล่าวที่ 4-9 แสดงให้เห็นว่าการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยวและแบบคู่ให้ปริมาณองค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยพบว่า มีปริมาณของเนฟทาที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่มากที่สุดเท่ากับ 60.7% ซึ่งมากกว่าปริมาณเนฟทาที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยวที่มีอยู่เพียง 39.2% อีกทั้งเมื่อพิจารณาในส่วนของน้ำมันเบา กล่าวคือ มีปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่สั้นและมีจุดเดือดในช่วงจุดเดือดของเนฟทาและเคโรซีนมากกว่า 80% ขององค์ประกอบทั้งหมดในน้ำมันไพโรไลซิส แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของปฏิกิริยา Thermal cracking ในเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ที่มีประสิทธิภาพในการผลิตน้ำมันชนิดเบามากกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยว

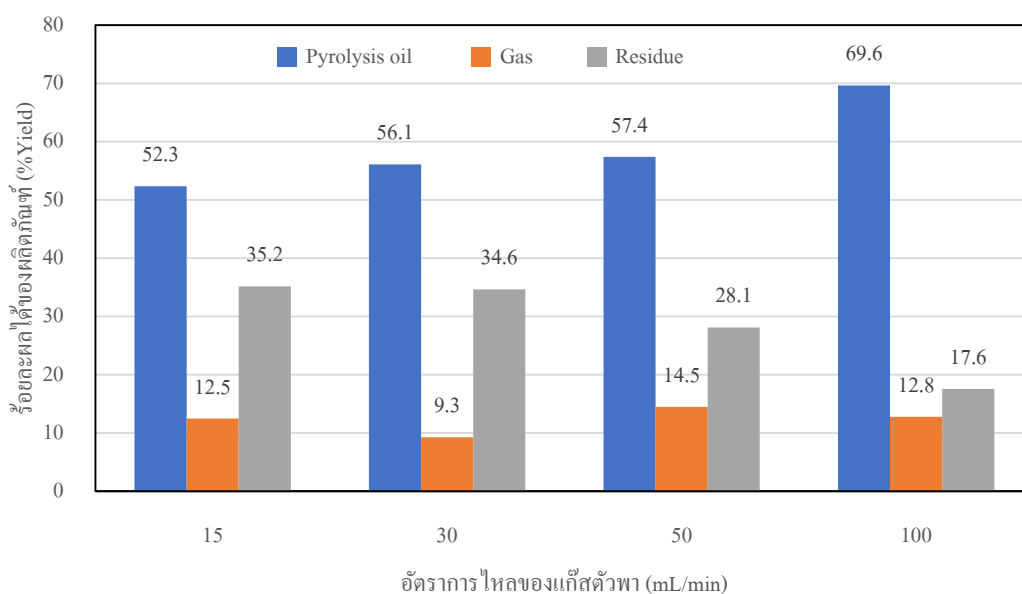


ภาพที่ 4-9 ปริมาณองค์ประกอบของน้ำมันปิโตรไลซิสที่ได้จากการปิโตรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยวและแบบคู่

จากผลการวิเคราะห์ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของน้ำมันปิโตรไลซิสในการศึกษากระบวนการกลั่นแบบปิโตรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ แสดงให้เห็นว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา Thermal cracking ได้ดีกว่าและให้องค์ประกอบของน้ำมันชนิดเบา (แนฟทา เคโรซีนและแก๊สออยล์) รวมกันมากกว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเดี่ยวที่สภาวะอุณหภูมิและอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่เท่ากัน แต่เมื่อพิจารณาสมบัติของน้ำมัน ได้แก่ ความหนืดและความถ่วงจำเพาะที่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำมันดีเซลหมุนเร็วเล็กน้อย จึงต้องทำการปรับสภาวะให้เหมาะสมเพื่อผลิตน้ำมันปิโตรไลซิสที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับมาตรฐานน้ำมันดีเซลมากขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์แนวโน้มของผลการทดลอง พบว่า การปรับ Residence time ให้มากขึ้นเพื่อลดการเกิดปฏิกิริยา Thermal cracking ในเครื่องปฏิกรณ์เพียงเล็กน้อย ด้วยการปรับอัตราการไหลของแก๊สตัวพา จะให้น้ำมันปิโตรไลซิสที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็วมากขึ้นในการศึกษาหัวข้อถัดไป จึงได้ทำการปรับอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนที่ใช้เป็นแก๊สตัวพาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อไป

### 3. ผลของการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพา

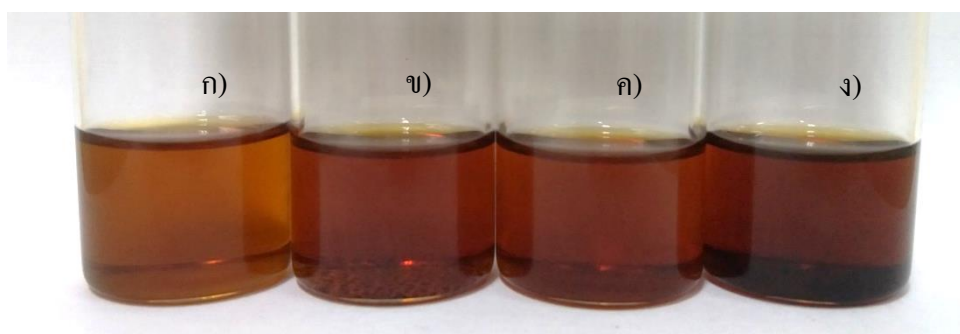
การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ โดยกำหนดอุณหภูมิไพโรไลซิสคงที่เท่ากับ 400°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/min จากอุณหภูมิห้อง และกำหนดอุณหภูมิในคอลัมน์กลั่นน้ำมันคงที่เท่ากับ 250°C โดยปรับอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในช่วง 15-100 mL/min ผลการทดลองเพื่อหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (%Yield) ดังภาพที่ 4-10



ภาพที่ 4-10 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสที่มีอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 4-10 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาจะส่งผลให้ร้อยละผลได้น้ำมันไพโรไลซิสเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจาก 52.3% ที่อัตราการไหล 15 mL/min เป็น 69.6% ที่อัตราการไหล 100 mL/min เนื่องจาก Residence time ที่ลดลง ส่งผลให้การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในปฏิกิริยา Thermal cracking ลดลง จึงได้น้ำมันไพโรไลซิสออกมามากขึ้น และทำให้ Residue มีปริมาณลดลง แต่ส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ในสถานะแก๊สน้อยมาก และเมื่อพิจารณาควบคู่กับลักษณะทางกายภาพดังภาพที่ 4-11 พบว่า สีของน้ำมันไพโรไลซิสมีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จาก

การใช้อัตราการไหล 100 mL/min มีสีที่เข้มมากกว่าสถานะอื่น อีกทั้งยังพบคราบเขม่าและสิ่งเจือปนมากกว่าสถานะอื่น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่มีการลดลงของร้อยละผลได้ของ Residue กล่าวคือ Residue เกิดการแตกตัวได้มากขึ้นจากผลของการถ่ายโอนความร้อนระหว่างโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อัตราการไหล 100 mL/min อาจเกิดการกวนผสมของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสได้ดีขึ้น ในขณะที่น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการใช้อัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 15 mL/min (ภาพที่ 4-11 ก) มีสีที่อ่อนที่สุดจากการมีปริมาณของน้ำมันเบาปนอยู่มากกว่าที่สถานะอื่น ๆ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ Residence time ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยา Thermal cracking ได้ดีขึ้น สำหรับการใช้อัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 30 และ 50 mL/min ทำให้ได้น้ำมันไพโรไลซิสที่มีสีค่อนข้างใกล้เคียงกันมากและมีสีรวมถึงเขม่าสิ่งเจือปนในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการใช้อัตราการไหล 15 และ 100 mL/min



ภาพที่ 4-11 ลักษณะทางกายภาพของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สตัวพา ก) 15 ข) 30 ค) 50 และ ง) 100 mL/min

เมื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันไพโรไลซิส ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ความหนืด (Viscosity) ปริมาณซัลเฟอร์ (Sulfur content) และจุดวาบไฟ (Flash point) ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4-6

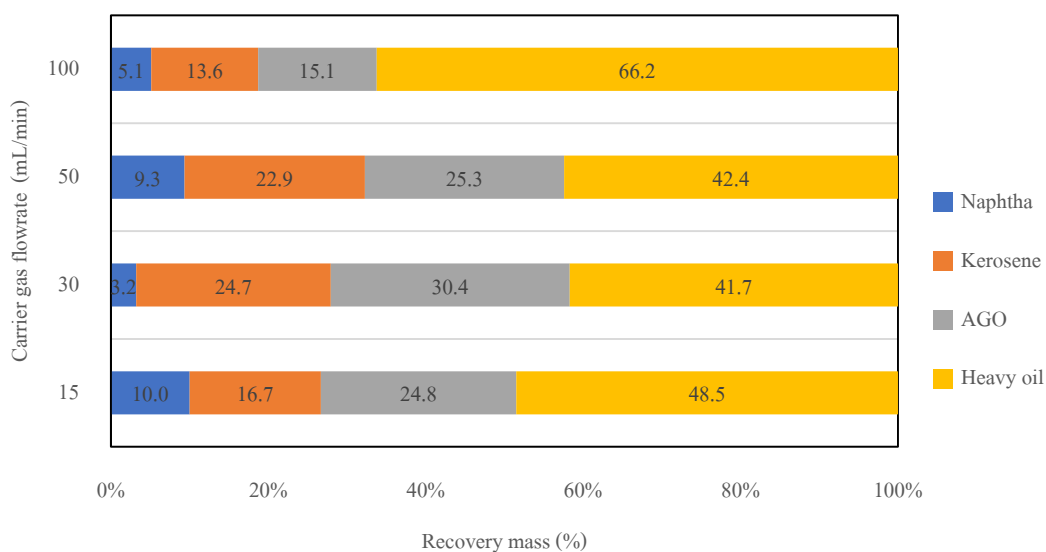
ตารางที่ 4-6 สมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพา (พระราชบัญญัติการค้าน้ำมันเชื้อเพลิงพุทธศักราช 2543, 2556)

สมบัติ	อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (mL/min)				มาตรฐาน น้ำมันดีเซล หมุนเร็ว	มาตรฐาน น้ำมันดีเซล หมุนช้า
	15	30	50	100		
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	0.81	0.82	0.81	0.82	0.81-0.87	<0.92
ความหนืด (Viscosity, cSt)	1.7	2.6	2.6	5.0	1.8-4.1	<8.0
ปริมาณซัลเฟอร์ (Sulfur content, wt%)	0.29	0.28	0.28	0.27	<0.005	<1.5
จุดวาบไฟ (Flash point, °C)	16	15	18	20	>52	>52

ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสจากตารางที่ 4-6 พบว่า ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันไพโรไลซิสทุกสภาวะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว เมื่อพิจารณาความหนืดจะพบว่า ที่อัตราการไหลของแก๊สตัวพา 30 และ 50 mL/min เพียง 2 สภาวะเท่านั้นที่ให้คุณภาพความหนืดของน้ำมันอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานดีเซลหมุนเร็วและมีค่าเท่ากับ 2.6 cSt ส่วนความหนืดของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากสภาวะอัตราการไหลของแก๊สตัวพา 100 mL/min มีค่าเท่ากับ 5.0 cSt ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำมันดีเซลหมุนช้า และความหนืดของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากสภาวะอัตราการไหลของแก๊สตัวพา 15 mL/min ที่มีค่าเท่ากับ 1.7 cSt ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของน้ำมันดีเซลหมุนเร็วและหมุนช้า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณซัลเฟอร์ในน้ำมันพบว่า มีค่าเท่ากับ 0.29 0.28 0.28 และ 0.27wt% ที่อัตราการไหลของแก๊สตัวพา 15 30 50 และ 100 mL/min ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของน้ำมันดีเซลหมุนเร็วและหมุนช้า แต่ลดลงจากปริมาณซัลเฟอร์ในน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วที่มีค่าเท่ากับ 0.45wt% แสดงให้เห็นว่ากระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิสสามารถลดปริมาณซัลเฟอร์ในน้ำมันไพโรไลซิสได้ในปริมาณหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากสารประกอบซัลเฟอร์มีมวลโมเลกุลและจุดเดือดสูง



ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย GC-MS ในขั้นตอน Preliminary study ที่พบว่า น้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสในช่วงอุณหภูมิ 450-500°C มีการปนเปื้อนของสารประกอบซัลเฟอร์เพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากการแตกตัวของ Residue อีกทั้งยังพบว่า อัตราการไหลของแก๊สตัวพาไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณซัลเฟอร์อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้จุดควบไฟของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากทุกสภาวะยังมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานดีเซลอยู่มาก เนื่องจากการมีองค์ประกอบของน้ำมันเบา เช่น แนฟทา และเคโรซีน รวมถึงสารอะโรมาติกที่ระเหยง่ายต่าง ๆ เจือปนอยู่ในปริมาณมาก ซึ่งจากผลการวิเคราะห์คุณภาพแสดงให้เห็นว่าน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากสภาวะอัตราการไหลเท่ากับ 30 และ 50 mL/min เป็นสภาวะที่ให้น้ำมันที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับมาตรฐานน้ำมันดีเซลหมุนเร็วมากที่สุด และเพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองถัดไป จึงต้องศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสด้วยเครื่อง DGC โดยอ้างอิงจุดตัดของช่วงอุณหภูมิของน้ำมันจากตารางที่ 4-4 และผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4-12



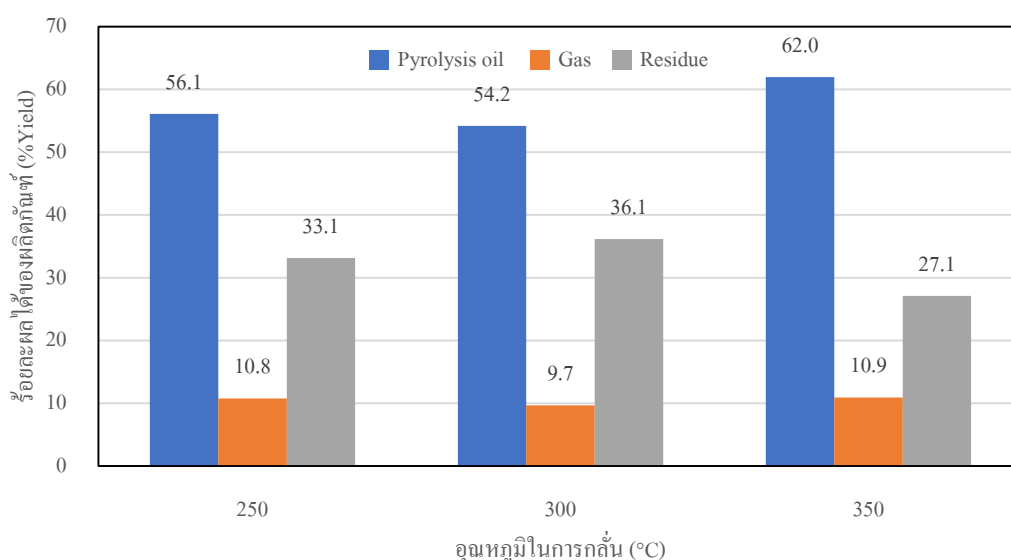
ภาพที่ 4-12 ปริมาณองค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สตัวพา

จากผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4-12 พบว่า ที่อัตราการไหลของแก๊สตัวพา 100 mL/min มีองค์ประกอบของ Heavy oil เท่ากับ 66.2% ซึ่งเป็นปริมาณที่มากที่สุดและสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพที่มีสีเข้มเนื่องจากการมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวปะปนอยู่มาก อีกทั้งยังสอดคล้องกับภาพที่ 4-10 ที่แสดงถึงร้อยละผลได้ของ Residue ที่ลดลงเมื่อใช้อัตราการไหล

ของแก๊สตัวพาเท่ากับ 100 mL/min แต่เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 15 mL/min พบว่า มีองค์ประกอบของเนฟทาสูงที่สุดเท่ากับ 10.0% เมื่อเปรียบเทียบปริมาณองค์ประกอบของเนฟทาจากสภาวะอัตราการไหล 30 50 และ 100 mL/min ที่มีปริมาณ 3.2% 9.3% และ 5.1% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของ Residence time โดยการปรับลดอัตราการไหลของแก๊สตัวพามีผลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่สั้นมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันพบว่า การลดลงของ Residence time โดยการปรับเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สตัวพามีผลทำให้ปริมาณของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อพิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิเคราะห์จากสัดส่วนองค์ประกอบของเนฟทา เคโรซีนและแก๊สออยล์ที่ได้จากการใช้อัตราการไหลเท่ากับ 30 mL/min พบว่า มีองค์ประกอบรวมกันสูงถึง 58.3% ซึ่งมากที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราการไหลอื่น ๆ แต่หากพิจารณาทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ จะพบว่า น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการใช้อัตราการไหลที่ 30 mL/min เป็นสภาวะที่เหมาะสมและถูกกำหนดเพื่อใช้ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นในหัวข้อถัดไป

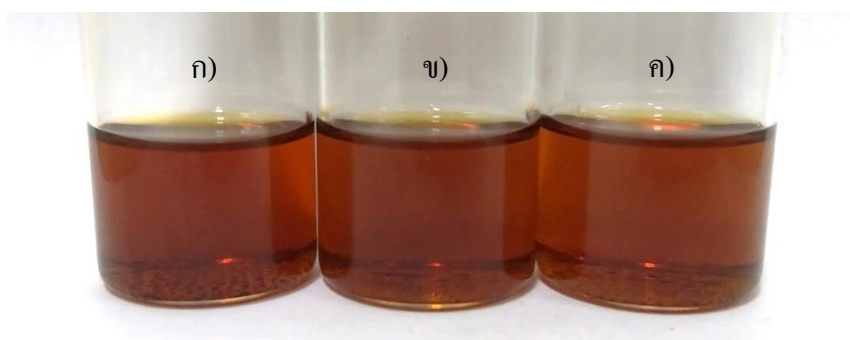
#### 4. ผลของการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการกลั่น

การศึกษาอิทธิพลของกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิส ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในคอลัมน์กลั่นน้ำมันที่ 250-350°C และกำหนดอุณหภูมิไพโรไลซิสคงที่เท่ากับ 400°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/min ผลการทดลองดังภาพที่ 4-13



ภาพที่ 4-13 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการกลั่น

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิในการกลั่นที่ 350°C จะให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสสูงที่สุดเท่ากับ 62.0% เมื่อเทียบกับการใช้อุณหภูมิในการกลั่นที่ 250°C และ 300°C ซึ่งให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสเท่ากับ 56.1% และ 54.2% ตามลำดับ แต่ไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ในสถานะแก๊ส และเมื่อพิจารณาปริมาณของ Residue ที่เหลือในเครื่องปฏิกรณ์ พบว่า ที่อุณหภูมิในการกลั่นเท่ากับ 350°C มีปริมาณ Residue เหลือเพียง 27.1% เมื่อเทียบกับปริมาณ Residue ที่เหลือเมื่อใช้อุณหภูมิ 250°C และ 300°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 31.1% และ 36.1% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำมันไพโรไลซิสที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดเนื่องมาจากการแตกตัวของ Residue ซึ่งอาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการกลั่นที่ส่งผลต่อความร้อนโดยรวมในระบบ ทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวแตกตัวได้มากขึ้น โดยเมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของน้ำมันไพโรไลซิสดังภาพที่ 4-14 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการกลั่นที่สูงขึ้นส่งผลต่อการแตกตัวของ Residue เพียงเล็กน้อย จึงไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางกายภาพของน้ำมันที่สังเกตได้



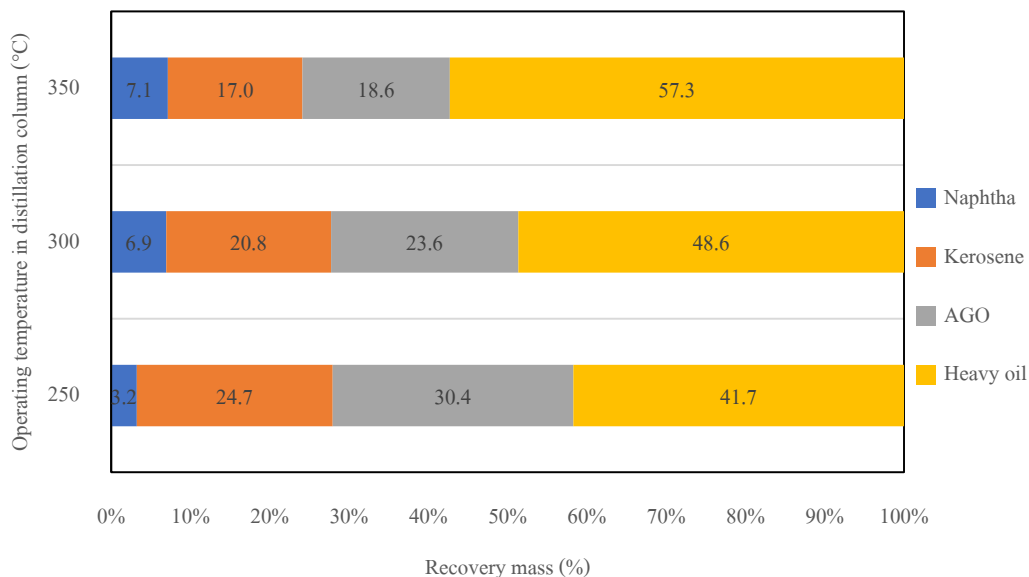
ภาพที่ 4-14 ลักษณะทางกายภาพของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการกลั่น ก) 250°C ข) 300°C และ ค) 350°C

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพน้ำมันไพโรไลซิส ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ความหนืด (Viscosity) ปริมาณซัลเฟอร์ (Sulfur content) และจุดวาบไฟ (Flash point) ดังตารางที่ 4-7 พบว่า ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันไพโรไลซิสทุกสภาวะอุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 0.81 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว ส่วนค่าความหนืดของน้ำมันไพโรไลซิสจะอยู่ในช่วง 2.6-3.5 cSt ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำมันดีเซล เมื่อพิจารณาปริมาณซัลเฟอร์ในน้ำมัน พบว่า มีค่าเท่ากับ 0.28 0.29 และ 0.29wt% ที่อุณหภูมิในการกลั่น 250 300 และ 350°C ตามลำดับ

ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของน้ำมันดีเซลหมุนเร็วและหมุนช้า แต่ลดลงจากน้ำมันเครื่องชนิด  
ใช้แล้วที่มีปริมาณซัลเฟอร์เท่ากับ 0.45wt% แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการกลั่นไม่มีผลต่อ  
การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซัลเฟอร์ อย่างไรก็ตามยังพบว่า จุดวาบไฟของน้ำมันไพโรไลซิส  
ในทุกสภาวะอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกันและต่ำกว่ามาตรฐานน้ำมันดีเซลที่กำหนดค่าจุดวาบไฟ  
ไม่ต่ำกว่า 52°C ซึ่งเกิดจากการมีสารระเหยง่าย เช่น สารประกอบอะโรมาติก และ  
น้ำมันเบาชนิดอื่น ๆ เจือปนอยู่ ดังที่ได้อภิปรายในการศึกษาก่อนหน้านี้ โดยในการทดลองนี้  
แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการกลั่นไม่มีผลกับการเปลี่ยนแปลงของจุดวาบไฟ เนื่องจากสารเจือปน  
ที่มีจุดวาบไฟต่ำยังไม่ถูกกำจัดออกไปจากน้ำมันไพโรไลซิส และเมื่อทำการวิเคราะห์ห้หา  
องค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสด้วยเครื่อง DGC โดยอ้างอิงจุดตัดของช่วงอุณหภูมิของน้ำมัน  
จากตารางที่ 4-4 และผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4-15

ตารางที่ 4-7 สมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการกลั่น  
(พระราชบัญญัติการค้าน้ำมันเชื้อเพลิงพุทธศักราช 2543, 2556)

สมบัติ	อุณหภูมิในการกลั่น (°C)			มาตรฐานน้ำมัน ดีเซลหมุนเร็ว	มาตรฐาน น้ำมันดีเซล หมุนช้า
	250	300	350		
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	0.81	0.81	0.81	0.81-0.87	<0.92
ความหนืด (Viscosity, cSt)	2.6	2.7	3.5	1.8-4.1	<8.0
ปริมาณซัลเฟอร์ (Sulfur content, wt%)	0.28	0.29	0.29	0.27	<0.005
จุดวาบไฟ (Flash point, °C)	15	18	21	>52	>52



ภาพที่ 4-15 ปริมาณองค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการกลั่น

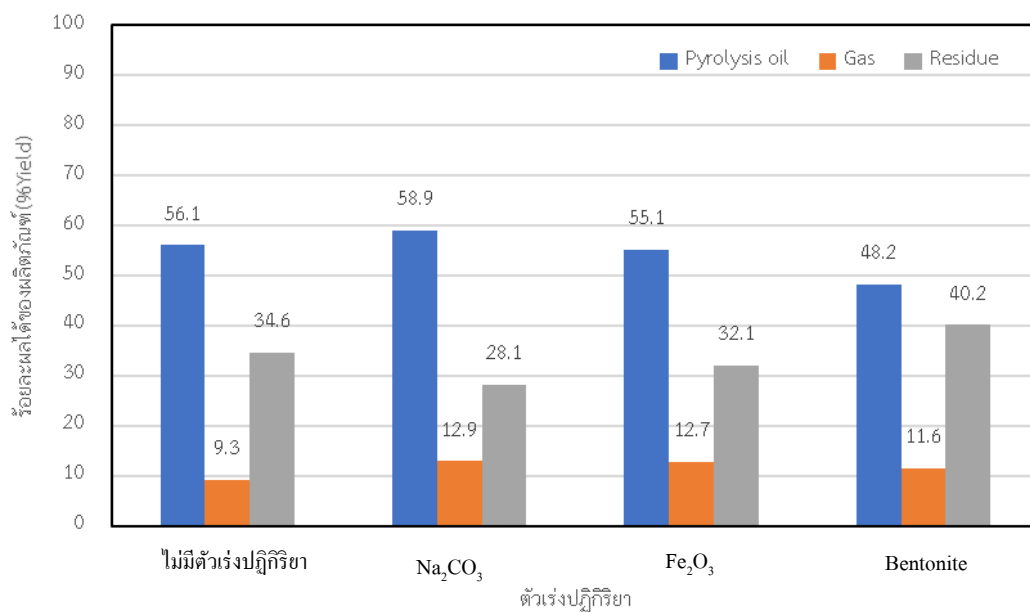
ผลการวิเคราะห์สัดส่วนองค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิส พบว่า ที่อุณหภูมิในการกลั่น 250°C มีปริมาณองค์ประกอบของ Heavy oil เท่ากับ 41.7% ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการใช้อุณหภูมิในการกลั่นเท่ากับ 300°C และ 350°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 48.6% และ 57.3% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบองค์ประกอบของเนฟทา เคโรซีนและแก๊สออยล์จะ พบว่า ที่อุณหภูมิในการกลั่น 250°C ให้ปริมาณองค์ประกอบของน้ำมันเบาทั้ง 3 ชนิดเท่ากับ 58.3% ซึ่งมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 300°C และ 350°C ที่มีปริมาณเท่ากับ 51.3% และ 42.7% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเกิดการควบแน่นของผลิตภัณฑ์ในสถานะไอ (Vapor phase) ในคอลัมน์กลั่นน้ำมัน และมีการเปลี่ยนแปลงของ Residence time ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยด้วยเหตุนี้จึงทำให้ปฏิกิริยา Thermal cracking ในคอลัมน์กลั่นน้ำมันเกิดได้มากขึ้นและเกิดการแตกตัวซ้ำของน้ำมันในคอลัมน์ ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่สั้นมากขึ้น

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่จะพิจารณาจากองค์ประกอบและสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิส ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิไพโรไลซิสที่เหมาะสมเท่ากับ 400°C และอุณหภูมิในการกลั่นเท่ากับ 250°C อัตราการไหลของแก๊สตัวพาเท่ากับ 30 mL/min โดยสภาวะนี้จะถูกกำหนดเพื่อใช้ศึกษากระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองขั้นต่อไป

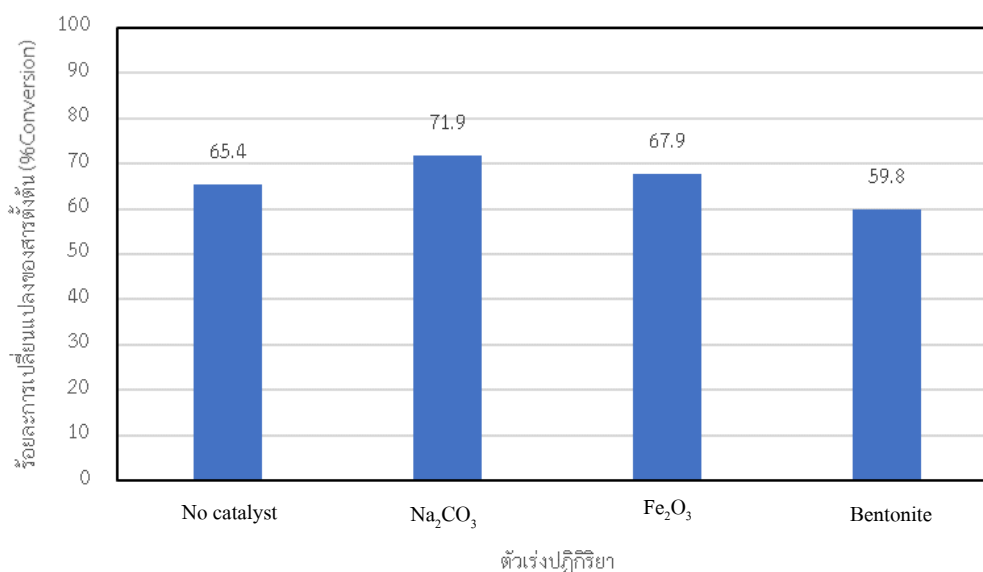
## ผลของการศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาคือเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบคูใน กระบวนการไพโรไลซิสโดยการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ Bentonite ในปริมาณ 3wt% เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในแตกตัวของโมเลกุลด้วยปฏิกิริยา Catalytic cracking ควบคู่กับ ปฏิกิริยา Thermal cracking และทำการศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ ไพโรไลซิสเท่ากับ  $400^\circ\text{C}$  อุณหภูมิในคอลัมน์กลั่นน้ำมันเท่ากับ  $250^\circ\text{C}$  และอัตราการไหลของ แก๊สตัวพาเท่ากับ 30 mL/min โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งในเชิงปริมาณและ คุณภาพ รวมถึงศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมัน ไพโรไลซิส ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากการไพโรไลซิสที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังภาพที่

4-16



ภาพที่ 4-16 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 4-17 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น (%Conversion) ที่ได้จากการไพโรไลซิสที่มี และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

จากภาพที่ 4-16 พบว่า สภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ให้ปริมาณน้ำมันไพโรไลซิสมากที่สุดเท่ากับ 58.9% และมีปริมาณ Residue เหลือน้อยที่สุดเท่ากับ 28.1% ในขณะที่ปริมาณแก๊สใกล้เคียงกับการไพโรไลซิสที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น และเมื่อพิจารณาปริมาณการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันตั้งต้น ไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> พบว่า มีค่าสูงที่สุดเช่นกันเท่ากับ 71.9% ดังภาพที่ 4-17 แสดงให้เห็นว่า Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> มีความสามารถในการเลือกเกิดปฏิกิริยา Catalytic cracking กับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ ๆ ทำให้เกิดการแตกตัวเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สได้มากขึ้น ผลดังกล่าวเป็นไปในทำนองเดียวกันกับผลวิจัยของ Xu, Dong, Chen, Li, and Wang (2015); Shie, Lin, Chang, Lee, and Wu (2003) ที่ได้รายงานไว้ว่า Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> มีประสิทธิภาพในการทำให้กากน้ำมัน (Oil sludge) ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่เป็นองค์ประกอบหลักสามารถแตกตัวได้ดี นอกจากนี้ Arpa et al. (2010); Demirbas et al. (2015) ได้รายงานว่าการเติม Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ในกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว ทำให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีองค์ประกอบของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวเป็นปริมาณมาก โดยพิจารณาจากอุณหภูมิจุดเดือดในการกลั่นผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีค่าสูง คาดว่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวดังกล่าว จะได้จากการแตกตัวของสารประกอบโมเลกุลใหญ่ ๆ ที่มีอยู่ในน้ำมันตั้งต้น ซึ่งสอดคล้องกับ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง GC-MS ดังตารางที่ 4-8 พบว่า มีปริมาณของ Heavy oil ( $>C_{28}$ ) เท่ากับ 0.53% ในขณะที่การไพโรไลซิสที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยานั้นไม่พบปริมาณของ Heavy oil และมีปริมาณ Residue ที่เหลือจากการไพโรไลซิสสูงกว่าด้วย

ตารางที่ 4-8 ผลผลิตภัณฑ์ที่แบ่งตามช่วงจำนวนคาร์บอนของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400°C

ตัวเร่งปฏิกิริยา	Area percentage			
	แนฟทา	เคโรซีนและแก๊สออยล์	น้ำมันหล่อลื่น	น้ำมันเตา
	(Naphtha) $C_5-C_{11}$	(Kerosene and gasoil) $C_{12}-C_{19}$	(Lubricating oil) $C_{20}-C_{27}$	(Heavy oil) $>C_{28}$
No catalyst	12.63	62.26	14.60	0.00
Bentonite	14.75	61.73	13.83	0.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.61	60.46	19.03	0.00
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10.97	60.90	18.74	0.53

สำหรับการไพโรไลซิสที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> นั้น ให้สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันตั้งต้นเท่ากับ 67.9% ซึ่งน้อยกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> และมี Residue เหลือจากการไพโรไลซิสมากกว่า แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยา Catalytic cracking น้อยกว่าการไพโรไลซิสที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง GC-MS ดังตารางที่ 4-8 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ให้องค์ประกอบของแนฟทา เคโรซีนและแก๊สออยล์ และน้ำมันหล่อลื่นที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับ Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> โดย Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มักถูกเลือกใช้ในการเกิดปฏิกิริยา Catalytic cracking เพื่อผลิต Light oil จากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว และมีมวลโมเลกุลสูง เช่น Bitumen (Sviridenko & Golovkob, 2018), Oil sludge (Cheng et al., 2016) และ Heavy oil (Fumoto, Sugimoto, Sato, & Takanohashi, 2015) และงานวิจัยของ Bhaskar et al. (2004) ได้ใช้ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจาก Waste lubricant oil ซึ่งได้รายงานเพิ่มเติมว่าปริมาณซัลเฟอร์ในน้ำมันลดลงอย่างเห็นได้ชัด สอดคล้องกับการลดลงของปริมาณซัลเฟอร์ในงานวิจัยของ Cheng et al. (2016) ที่ศึกษาอิทธิพลของ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ร่วมในการไพโรไลซิส Oil sludge จึงอาจกล่าวได้ว่า Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี



ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา Catalytic cracking และมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณซัลเฟอร์ ซึ่งจะถูกลบไปบางส่วนถัดไป

ในขณะที่การไพโรไลซิสที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา Bentonite จะให้สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันตั้งต้นต่ำที่สุด กล่าวคือ ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิสและแก๊สต่ำที่สุดและเหลือ Residue ในปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นรวมถึงสถานะที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคือ และไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิสและแก๊ส ทำให้ %Conversion ต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก Bentonite อาจขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา Catalytic cracking ของน้ำมันตั้งต้น จากความสามารถในการดูดซับน้ำมันของ Bentonite ที่สามารถดูดซับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวไว้บางส่วน (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2559) และจากงานวิจัยของ Emam (2018) ได้รวบรวมงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่า Bentonite ถูกใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสำหรับการดูดซับสี สิ่งเจือปน และโลหะหนักในน้ำมัน โดยงานวิจัยของ Abdel-Jabbar, Zubaidy, and Mehrvar (2010) รายงานว่า Bentonite สามารถลดปริมาณโลหะหนักในน้ำมันหล่อลื่นได้เป็นอย่างดีและมีประสิทธิภาพ และเนื่องจากปริมาณของน้ำมันตั้งต้นบางส่วนถูกดูดซับไว้ จึงส่งผลให้เกิดการแตกตัวของน้ำมันเบามากขึ้น จึงมีปริมาณแนฟทา ( $C_5-C_{11}$ ) เท่ากับ 14.75% และมากกว่าการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น รวมถึงสถานะที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามการมีองค์ประกอบของน้ำมันเบาสูง ส่งผลให้ความหนืดลดลงและมีค่าต่ำกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kar (2018) ที่รายงานว่าน้ำมันไพโรไลซิสมีความหนืดลดลงจากการใช้ Bentonite เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยา Catalytic cracking

นอกจากการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์และน้ำมันไพโรไลซิสแล้ว การวิเคราะห์สมบัติเชิงคุณภาพมีความจำเป็นในการพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการนำน้ำมันไพโรไลซิสไปใช้งานในรูปแบบของน้ำมันดีเซล โดยผลการศึกษาเชิงคุณภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการไพโรไลซิสที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}\text{C}$  เปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำมันดีเซลที่กำหนดโดยกรมธุรกิจการค้าแห่งประเทศไทย ดังตารางที่ 4-9 พบว่า ความถ่วงจำเพาะและความหนืดของน้ำมันไพโรไลซิสทุกสถานะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.81-0.82 และ 2.2-3.1 cSt ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าน้ำมันเครื่องยนต์ที่ใช้แล้วและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว

ตารางที่ 4-9 สมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการไพโรไลซิสที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา  
(พระราชบัญญัติการค้าน้ำมันเชื้อเพลิงพุทธศักราช 2543, 2556)

สมบัติ	น้ำมัน เครื่องยนต์ ใช้แล้ว	น้ำมันไพโรไลซิส				มาตรฐาน น้ำมันดีเซล หมุนเร็ว
		No catalyst	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Bentonite	
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	0.86	0.82	0.82	0.82	0.81	0.81-0.87
ความหนืด (Viscosity, cSt)	63.7	2.6	3.1	3.0	2.2	1.8-4.1
ปริมาณซัลเฟอร์ (Sulfur content, wt%)	0.45	0.28	0.26	0.22	0.27	<0.005
จุดวาบไฟ (Flash point, °C)	110	15	18	15	15	>52°C

ในส่วนของการวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟอร์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันไพโรไลซิส พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิดในการไพโรไลซิสทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณซัลเฟอร์ลดน้อยลงกว่าการไพโรไลซิสที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยา Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> สามารถลดปริมาณซัลเฟอร์จากน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วได้สูงที่สุด กล่าวคือ มีปริมาณซัลเฟอร์เจือปนในผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิสเท่ากับ 0.22 wt% ในขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นและการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิสที่มีซัลเฟอร์เจือปนอยู่ในปริมาณ 0.26-0.28wt% เป็นเพราะว่า Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> สามารถเกิดปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ในน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วระหว่างการไพโรไลซิสได้เป็น Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> ซึ่งเป็น Super acid ที่มีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยา Catalytic cracking (Cheng et al., 2016) จึงทำให้ปริมาณซัลเฟอร์ลดลงได้ อย่างไรก็ตาม ปริมาณซัลเฟอร์ในน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้ ยังไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำมันดีเซลที่กำหนดให้มีปริมาณซัลเฟอร์ในน้ำมันดีเซลหมุนเร็วไม่สูงกว่า 0.005wt% ดังนั้นการลดปริมาณซัลเฟอร์ลงจึงเป็นวิธีการที่ควรพัฒนาเพื่อให้น้ำมันไพโรไลซิสมีคุณภาพใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว

เมื่อพิจารณาจุดควบไฟของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการไพโรไลซิสที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 15-18°C ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของน้ำมันดีเซลหมุนเร็วที่กำหนดไว้ต้องไม่น้อยกว่า 52°C ค่อนข้างมาก แสดงให้เห็นว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสไม่สามารถช่วยเพิ่มค่าจุดควบไฟให้กับน้ำมันไพโรไลซิสได้ ซึ่ง Arpa et al. (2010); Phetyim and Pivsa-Art (2018) ได้รายงานว่าจุดควบไฟของน้ำมันไพโรไลซิสที่มีค่าต่ำนั้น เนื่องมาจากความไม่บริสุทธิ์ของน้ำมันไพโรไลซิสที่มีสารประกอบที่ระเหยและติดไฟง่ายเจือปนอยู่ และสารดังกล่าวอาจจะไม่ได้ถูกกำจัดออกด้วยปฏิกิริยา Catalytic cracking ที่เกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งการนำน้ำมันไพโรไลซิส มาผ่านกระบวนการกลั่นซ้ำอีกครั้งหนึ่งเพื่อกำจัดสารดังกล่าวออกไปจะช่วยเพิ่มค่าจุดควบไฟให้สูงขึ้นได้ และจากผลการวิเคราะห์จุดควบไฟของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการกลั่นซ้ำพบว่า จุดควบไฟมีค่าสูงขึ้นเป็น 92°C ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว

#### การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางพลังงาน

การคำนวณหาความคุ้มค่าทางพลังงานจะทำการคำนวณพลังงานความร้อนของผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิสในสภาวะที่เหมาะสม การเปลี่ยนหน่วยพลังงาน ดังตารางภาคผนวก ค-1 ผลการคำนวณความคุ้มค่าทางพลังงานดังตารางที่ 4-10 พบว่า พลังงานความร้อนจากน้ำมันไพโรไลซิสเท่ากับ 45,696.60 kJ/kg และมีค่ามากกว่าพลังงานความร้อนจากน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วที่มีค่าเท่ากับ 44,880.24 kJ/kg โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ให้ค่าพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 816.36 kJ/kg หรือคิดเป็น 1.81% กล่าวคือ น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้มีสมบัติทางด้านความร้อนที่ดีขึ้นหลังเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนในกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิสเนื่องจากมีปริมาณองค์ประกอบของน้ำมันเบาเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพลังงานความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4-10 ค่าพลังงานความร้อนจากน้ำมันไพโรไลซิสเปรียบเทียบกับน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว

แหล่งพลังงาน	ค่าพลังงาน (kJ/kg)
พลังงานความร้อนของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว	44,880.24
พลังงานความร้อนของน้ำมันไพโรไลซิส	45,696.60
ค่าพลังงานที่ได้เพิ่มขึ้นจากผลิตภัณฑ์	816.36 (1.81%)

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการศึกษาผลสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิสและอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสต้นแบบซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ สำหรับการเปลี่ยนน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วให้เป็นน้ำมันที่มีสมบัติเหมาะสมกับการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และจากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิส รวมถึงศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ Bentonite ที่ใช้ในการไพโรไลซิส สามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

เมื่ออุณหภูมิในการไพโรไลซิสสูงขึ้นส่งผลให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิในคอลัมน์กลั่นน้ำมัน และการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สดำพาให้ผลเนวโน้มเดียวกัน คือ ร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสมากขึ้น และเมื่อพิจารณาควบคู่กับองค์ประกอบในน้ำมันไพโรไลซิส พบว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิสของน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบคู่สำหรับงานวิจัยนี้ ได้แก่ การไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  และกำหนดอุณหภูมิในคอลัมน์กลั่นน้ำมันเท่ากับ  $250^\circ\text{C}$  โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สดำพาเท่ากับ  $30 \text{ mL/min}$  ซึ่งสภาวะดังกล่าว ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิสที่มีองค์ประกอบของแนฟทา เโครซีน และแก๊สออยล์รวมกันสูงที่สุด และส่งผลให้ความหนืด ความตึงจำเพาะของน้ำมันไพโรไลซิสมีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐานของน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว แต่จุดวาบไฟยังมีค่าที่ต่ำกว่ามาตรฐาน

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสสูงที่สุดเท่ากับ 58.9% และมีปริมาณ Residue เหลือน้อยที่สุดเท่ากับ 28.1% ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  มีความสามารถในการเลือกเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ ๆ ส่งผลให้น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้มีองค์ประกอบของ Heavy oil เจือปนอยู่ด้วย สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  แต่ให้ปริมาณซัลเฟอร์ในน้ำมันไพโรไลซิสหลงเหลืออยู่น้อยที่สุดเท่ากับ 0.22wt% ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา Bentonite ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสต่ำที่สุดและมีความสามารถในการเลือกเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแนฟทา ( $\text{C}_5\text{-C}_{11}$ ) ได้สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส ไม่มีผล

ในการเพิ่มค่าจุลควาไฟฟ้าของน้ำมันไพโรไลซิสให้สูงขึ้นได้ โดยในการวิจัยพบว่า การเพิ่มค่าจุลควาไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการนำน้ำมันไพโรไลซิสมากลับซ้ำอีกครั้ง ซึ่งทำให้จุลควาไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเป็น  $92^{\circ}\text{C}$  เป็นไปตามมาตรฐานของน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว

กระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคู่ (Two-stage reactor) สามารถเพิ่มค่าพลังงานความร้อนของน้ำมันที่ได้สูงขึ้นเท่ากับ 1.81% แสดงให้เห็นถึงสมบัติด้านพลังงานความร้อนที่ดีขึ้นของน้ำมันไพโรไลซิสจากการมีปริมาณองค์ประกอบของน้ำมันเบามากขึ้น

### ข้อเสนอแนะ

ข้อจำกัดสำหรับการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถใช้งานทดแทนน้ำมันดีเซลจากของเสีย เช่น น้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้วดั่งที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ น้ำมันเชื้อเพลิงหรือน้ำมันไพโรไลซิสมือองค์ประกอบของเนฟทา เคาโรซีน แก๊สฮอยล์ น้ำมันหล่อลื่น และน้ำมันเตา รวมอยู่ซึ่งจัดเป็นน้ำมันที่ไม่บริสุทธิ์ส่งผลให้สมบัติบางประการไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำมันดีเซล และไม่สามารถนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลได้อย่างปลอดภัยและถูกกฎหมาย จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สตัวพา และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งทั้งหมดนี้ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติ เช่น จุลควาไฟฟ้า และปริมาณซัลเฟอร์ ที่ไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ ซึ่งข้อเสนอแนะอาจมีด้วยกัน 2 ทางเลือกคือ

- 1) ปรับเปลี่ยนคอลัมน์กลั่นน้ำมันให้เป็นการกลั่นลำดับส่วน ซึ่งอาจใช้งบประมาณมากและไม่คุ้มค่ากับผลิตภัณฑ์ที่ได้ และ
- 2) นำน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากกระบวนการกลั่นแบบไพโรไลซิสในครั้งแรกไปทำการกลั่นแบบไพโรไลซิสซ้ำอีกครั้ง โดยใช้อุณหภูมิต่ำลงเหลือ  $350\text{-}380^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะสามารถช่วยเพิ่มค่าจุลควาไฟฟ้าของน้ำมันไพโรไลซิสได้มากกว่า  $60^{\circ}\text{C}$  แต่จะสิ้นเปลืองพลังงาน และได้ผลผลิตที่ไม่คุ้มค่า ซึ่งจะพบว่า ข้อเสนอแนะทั้ง 2 ข้อ เป็นการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการไพโรไลซิส ที่อาจเพิ่มคุณภาพให้กับน้ำมันไพโรไลซิสได้ แต่ไม่มีความคุ้มค่าทางพลังงานและต้องใช้งบประมาณมากซึ่งอาจไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม แต่หากพิจารณาในส่วนของการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ประโยชน์ แม้ว่าน้ำมันไพโรไลซิสจะไม่สามารถใช้งานทดแทนน้ำมันดีเซลได้ แต่สามารถใช้งานในทางเลือกอื่นได้ เช่น การนำน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้ไปผสมกับน้ำมันเตาเพื่อใช้ในการให้ความร้อนเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มค่าความร้อน และทำให้น้ำมันเตามีความหนืดที่ลดลงช่วยหล่อลื่นได้ดียิ่งขึ้น และการนำน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้ไปผสมกับน้ำมันดิบและกลั่นลำดับส่วนร่วมกันในโรงกลั่นน้ำมัน

ข้อเสนอแนะดังกล่าวเกิดจากปัญหาที่ได้จากการศึกษาในงานวิจัยนี้ ซึ่งทางเลือกในการแก้ไขปัญหาและการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับทรัพยากร ความเหมาะสม และประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของผู้ใช้เทคโนโลยีในการพัฒนาขึ้นไป

## บรรณานุกรม

- กลุ่มพัฒนามาตรฐานน้ำมันหล่อลื่น สำนักคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง กรมธุรกิจพลังงาน. (2554, 2 สิงหาคม). *เรื่อนำรู้เกี่ยวกับน้ำมันเครื่อง*.
- กลุ่มสถิติการขนส่ง กองแผนงาน กรมการขนส่งทางบก. (2561). จำนวนรถที่จดทะเบียนสะสมทั่วประเทศ ถึง วันที่ 31 ธันวาคม 2561.
- กุลนันท์ วีรณรงค์กร และอมรชัย อภรณ์วิชานพ. (2557). ไพโรไลซิส (Pyrolysis). *Energy & Environmental*, 42, 61-64.
- คเนศ เทพรัศย์. (2555). *กระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ประเสริฐ เทียนนิมิตร, ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์ และปานเพชร ชินินทร. (2554). *เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น*. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- ประพันธ์ คูชดชารา และศศิธร สรรพอคำ. (2558). *พลังงานจากชีวมวลและวัสดุเหลือใช้ Energy from biomass and waste* (1 ed.). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พระราชบัญญัติการค้าน้ำมันเชื้อเพลิงพุทธศักราช 2543. (2556, 29 มกราคม). ราชกิจจานุเบกษา. หน้า 70-72
- ภัทรอนงค์ คงช่วย. (2561). *พลังงานจากชีวมวลและวัสดุเหลือใช้ Energy from Biomass and Residue* (1 ed.). เชียงใหม่: สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ อาคารเทพศาสตร์สถิตย์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ศิริรัตน์ จิตการคำ. (2551). จากขยะสู่น้ำมัน เทคโนโลยีผลิตพลังงานทางเลือกที่ดูแลสิ่งแวดล้อม (1). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2559). *เบนทอไนต์ สำหรับงานวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม*. กรุงเทพฯ: สารานุกรม.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2561). *สถานการณ์การใช้ น้ำมันและไฟฟ้า*. รายงาน.
- อาทิตยา จิตจำนง. (2559). สารก่อมะเร็งในอุตสาหกรรม Industrial Carcinogens. *EAU HERITAGE JOURNAL Science and Technology*, 10, 6-16.

- Abdel-Jabbar, N. M., Zubaidy, E. A. H. A., & Mehrvar, M. (2010). Waste Lubricating Oil Treatment by Adsorption Process Using Different Adsorbents. *International Journal of Chemical and Biological Engineering*, 3, 70-73.
- Aho, A., Kumar, N., Eranen, K., Hupa, M., Salmi, T., & Murzin, D. Y. (2008). Zeolite-bentonite hybrid catalysts for the pyrolysis of woody biomass. *In the 4th International FEZA Conference* (pp. 1069-1074).
- Arpa, O., Yumrutas, R., & Demirbas, A. (2010). Production of diesel-like fuel from waste engine oil by pyrolytic distillation. *Applied Energy*, 87, 122-127.
- Bhaskar, T., Uddin, M. A., Muto, A., sakata, Y., Omura, Y., Kimura, K., & Kawakami, Y. (2004). Recycling of waste lubricant oil into chemical feedstock or fuel oil over supported iron oxide catalysts. *Fuel*, 83, 9-15.
- Cheng, S., Yuhua Wang, N. G., Takahashi, F., Li, A., & Yoshikawa, K. (2016). Pyrolysis of oil sludge with oil sludge ash additive employing a stirred tank reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 120, 511-520.
- Coker, A. K. (2018). *Petroleum Refining Design and Applications Handbook* (Vol. 1). United state: John Wiley & Sons, Inc.,.
- Demirbas, A., Baluabaid, M. A., Kabli, M., & Ahmad1, W. (2015). Diesel Fuel From Waste Lubricating Oil by Pyrolytic Distillation. *Petroleum Science and Technology*, 33, 129-138.
- Emam, E. A. (2018). Clay Adsorption Perspective on Petroleum Refining Industry. *Industrial Engineering*, 2, 19-25.
- Fumoto, E., Sugimoto, Y., Sato, S., & Takanohashi, T. (2015). Catalytic Cracking of Heavy Oil with Iron Oxide-based Catalysts Using Hydrogen and Oxygen Species from Steam. *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 58, 329-335.
- Hamawand, I., Yusaf, T., & Rafat, S. (2013). Recycling of Waste Engine Oils Using a New Washing Agent. *Energies*, 6, 1023-1049.
- Kar, Y. (2018). Catalytic cracking of pyrolytic oil by using bentonite clay for green liquid hydrocarbon fuels production. *Biomass and Bioenergy*, 119, 473-479.



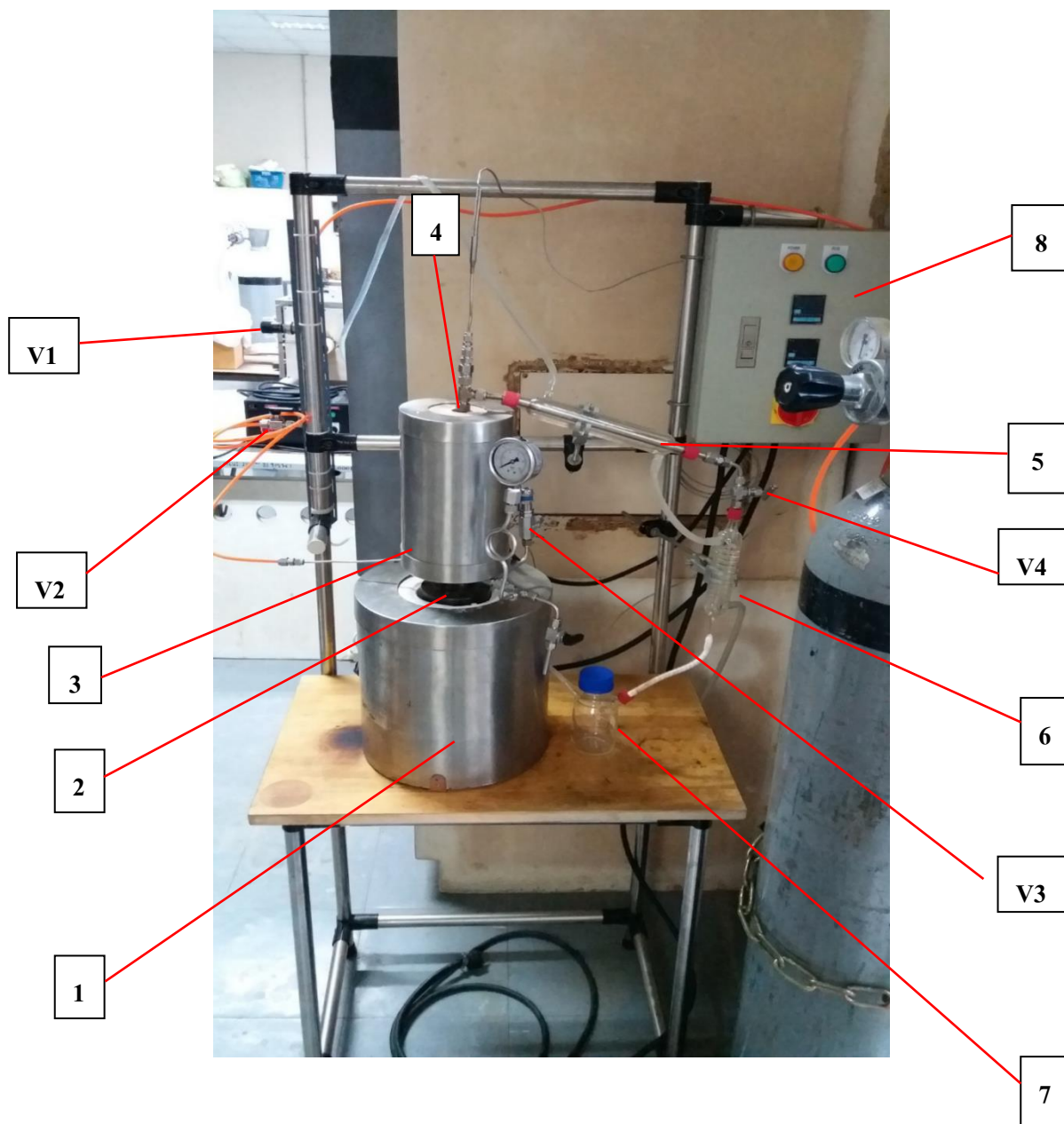
- Khan, R., Ahmad, I., Khan, H., Ismail, M., Gul, K., Yasin, A., & Ahmad, W. (2016). Production of diesel-like fuel from spent engine oil by catalytic pyrolysis over natural magnetite. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 120, 493-500.
- Lam, S. S., Russell, A. D., & Chase, H. A. (2010). Microwave pyrolysis, a novel process for recycling waste automotive engine oil. *Energy*, 35, 2985-2991.
- Marta, S., & Hatch, L. F. (2000). *Chemistry of Petrochemical Processes*. Texas, United state: Gulf Publishing Company.
- Miandad, R., Barakat, M. A., Rehan, M., Aburizaiza, A. S., Gardy, J., & Nizami, A. S. (2018). Effect of advanced catalysts on tire waste pyrolysis oil. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 542-552.
- Mohammed, R. R., Ibrahim, I. A. R., Taha, A. H., & McKay, G. (2013). Waste lubricating oil treatment by extraction and adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 220, 343-351.
- Phetyim, N., & Pivsa-Art, S. (2018). Prototype Co-Pyrolysis of Used Lubricant Oil and Mixed Plastic Waste to Produce a Diesel-Like Fuel. *Energies*, 11, 1-11.
- Randles, K., Mazur, L., & Milanes, C. (2007, April). *A review of the potential human and environmental health impacts of synthetic motor oils*. Report.
- Salem, S., Salem, A., & Babaei, A. A. (2015). Application of Iranian nano-porous Ca-bentonite for recovery of waste lubricant oil by distillation and adsorption techniques. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 23, 154-162.
- Sasol Chemicals Ltd. (2018). *Safety Data Sheet Butyl Triglycol Ether*. Report.
- Shie, J.-L., Lin, J.-P., Chang, C.-Y., Lee, D.-J., & Wu, C.-H. (2003). Pyrolysis of oil sludge with additives of sodium and potassium compounds. *Resources, Conservation and Recycling*, 39, 51-64.
- Sinag, A., Gulbay, S., Uskan, B., Ucar, S., & Ozgurler, S. B. (2010). Production and characterization of pyrolytic oils by pyrolysis of waste machinery oil. *Journal of Hazardous Materials*, 173, 420-426.
- Sviridenko, N. N., & Golovkob, A. K. (2018). Natural Bitumen Cracking in the Presence of Nanosized Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ni Powders. In *AIP Conference Proceedings* (pp. 020300-1-020300-4).

- Tripathi, A. K., & Vinu, R. (2015). Characterization of Thermal Stability of Synthetic and Semi-Synthetic Engine Oils. *Lubricants*, 3, 54-79.
- Xu, Y., Dong, G., Chen, F., Li, H., & Wang, J. (2015). Research Advance in the Use of Catalysts for Sludge Pyrolysis. In the International Symposium on Material, Energy and Environment Engineering (pp. 1-4).

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**

**เครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสต้นแบบ**



ภาพภาคผนวก ก-1 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสต้นแบบ (1: เตาให้ความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส, 2: เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส, 3: เตาให้ความร้อนของคอลัมน์กลั่นน้ำมัน, 4: คอลัมน์กลั่นน้ำมัน, 5: อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่, 6: อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเกลียว, 7: ขวดเก็บผลิตภัณฑ์, 8: อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ, V1: Control valve, V2: Ball valve, V3: Pressure relief valve, V4: Needle valve)

#### ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันไพโรไลซิสด้วยเครื่อง GC-MS

ตารางภาคผนวก ข-1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400-500°C

สารประกอบ	Area percentage		
	400°C	450°C	500°C
<b>อะโรมาติก (Aromatic)</b>	5.21	2.81	6.06
Ethylbenzene	0.61	0.14	0.54
p-Xylene	1.00	0.82	2.10
Benzene, propyl	0.32	0.29	0.32
Benzene, 1-ethyl-3-methyl	0.25	0.13	0.28
Benzene, 1,2,3-trimethyl	1.15	0.57	1.23
Benzene, 1,2,4-trimethyl	0.42	0.24	0.43
Benzene, 2-propenyl	0.13	0.00	0.00
Benzene, 1-ethynyl-2-methyl	0.27	0.00	0.00
Benzene, 1,3-diethyl	0.04	0.00	0.00
Benzeneacetaldehyde	0.19	0.08	0.29
Benzene, 2-ethyl-1,4-dimethyl	0.14	0.07	0.16
Benzene, 1-methyl-3-(1-methylethyl)	0.22	0.12	0.22
Benzene, 1-methyl-2-(1-methylethyl)	0.47	0.35	0.49
<b>โพลีไซคลิกอะโรมาติก</b> (Polycyclic aromatic compounds, PAHs)	0.49	0.21	1.06
<b>และไบไซคลิก (Bicyclic compounds)</b>			
Phenanthrene-	0.30	0.00	0.00
Phenanthrene, 9,10-dihydro-1-methyl- 2,4a,8,8-	0.19	0.00	0.00
Tetramethyldecahydrocyclopropa [d]naphthalene-	0.00	0.21	1.06
<b>สารประกอบในกลุ่มแอลคอกซี</b> (Alkoxy compounds)			
2-[2-(2-butoxyethoxy)ethoxy]ethanol	0.04	0.19	0.22

## ตารางภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

สารประกอบ	Area percentage		
	400°C	450°C	500°C
สารประกอบซิลิคอน (Silicon compounds)			
Silane, trichlorodocosyl	0.30	1.72	0.72
สารประกอบซัลเฟอร์ (Sulfur compounds)			
Sulfurous acid, hexyl tridecyl ester	0.32	0.38	0.19
Sulfurous acid, cyclohexylmethyl undecyl ester	0.32	0.93	1.00
Sulfurous acid, pentadecyl 2-pentyl ester	0.54	0.17	0.00
Sulfurous acid, 2-ethylhexyl heptadecyl ester	0.00	0.04	0.00
Sulfurous acid, cyclohexylmethyl tetradecyl ester	0.00	0.26	0.00
Sulfurous acid, cyclohexylmethyl hexadecyl ester	0.00	0.00	0.34
Sulfurous acid, cyclohexylmethyl heptadecyl ester	0.00	0.00	0.22
Sulfurous acid, pentadecyl 2-propyl ester	0.00	0.00	0.32
Sulfurous acid, butyl tridecyl ester	0.00	0.00	0.08
Sulfurous acid, butyl heptadecyl ester	0.00	0.35	0.14
Sulfurous acid, butyl hexadecyl ester	0.00	0.00	0.17
Sulfurous acid, butyl heptadecyl ester	0.20	0.31	0.59
Sulfurous acid, pentyl tridecyl ester	0.00	0.00	0.57
Sulfurous acid, pentyl tetradecyl ester	0.59	0.95	0.86
Sulfurous acid, pentadecyl pentyl ester	0.29	0.25	0.23
Sulfurous acid, octadecyl pentyl ester	0.00	0.00	0.22
Sulfurous acid, hexyl pentadecyl ester	0.77	2.72	1.27



ตารางภาคผนวก ข-2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันไพโรไลซิสจากการไพโรไลซิสที่มีและ  
ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400°C

Retention time (min)	Compound name	Area percentage			
		No catalyst	Bentonite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
4.078	Octane	0.55	0.68	0.48	0.45
6.047	1-Nonene	0.27	0.37	0.25	0.24
6.107	p-Xylene	0.08	0.12	0.09	0.08
6.258	Nonane	0.75	0.99	0.65	0.65
7.871	Nonane, 3-methyl	0.52	0.67	0.43	0.42
7.968	Nonane, 2-methyl	0.32	0.40	0.26	0.26
8.146	Nonane, 4-methyl	0.38	0.48	0.30	0.32
8.551	Nonane, 5-methylene	0.40	0.59	0.37	0.40
8.734	1-Decene	0.54	0.65	0.45	0.43
8.826	Benzene, 1,3,5-trimethyl	0.32	0.40	0.28	0.29
8.977	Decane	1.34	1.55	1.14	1.13
9.808	2-Pentene, 2,4,4-trimethyl	0.65	0.83	0.64	0.60
10.606	Decane, 5-methyl	0.77	0.98	0.69	0.56
10.714	Decane, 4-methyl	0.39	0.48	0.34	0.33
10.844	Decane, 2-methyl	0.62	0.74	0.51	0.48
11.022	Decane, 3-methyl	0.48	0.59	0.41	0.47
11.454	4-Decane, 2-methyl	0.00	0.00	0.64	0.59
11.653	1-Undecene	1.09	1.33	1.04	0.85
11.901	Undecane	2.54	2.66	2.13	2.08
13.606	Undecane, 4-methyl	0.76	0.88	0.73	0.64
13.763	Undecane, 2-methyl	1.04	1.22	1.00	0.94
13.936	Undecane, 3-methyl	0.78	0.92	0.73	0.73
14.356	2-Undecane, 10-methyl	0.66	0.75	0.66	0.68
14.561	1-Dodecene	3.01	3.11	2.02	2.53

## ตารางภาคผนวก ข-2 (ต่อ)

Retention time (min)	Compound name	Area percentage			
		No catalyst	Bentonite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
14.799	Dodecane	3.21	3.37	3.59	3.06
15.150	Undecane, 2,6-dimethyl	0.80	0.75	0.84	0.79
16.428	Dodecane, 4-methyl	0.66	0.65	0.68	0.63
16.585	Dodecane, 2-methyl	1.37	1.34	1.52	1.27
16.757	Dodecane, 3-methyl	1.40	1.31	1.38	1.32
17.162	2-Decene, 6-methyl, (Z)	0.68	0.75	0.87	0.73
17.367	1-Tridecene	2.32	2.35	2.52	2.39
17.583	Tridecane	3.48	3.54	4.51	3.96
18.802	4-Hepten-3-one, 2,6-dimethyl-	1.51	1.21	1.45	1.40
18.905	Tridecane, 6-methyl	1.14	1.07	1.27	1.15
19.121	Tridecane, 4-methyl	0.77	0.81	0.93	0.86
19.283	Tridecane, 2-methyl	1.24	1.35	1.50	1.45
19.569	Dodecane, 2,6,10-trimethyl	0.57	0.67	0.81	0.70
20.027	1-Tetradecane	2.42	3.13	1.93	2.70
20.227	Tetradecane	3.62	3.56	3.55	3.93
21.452	Cyclotetradecane	1.69	1.74	1.49	1.75
21.835	2-[2-(2-butoxyethoxy)ethoxy]ethanol	1.47	1.29	0.93	0.92
22.002	Tetradecane, 3-methyl	1.55	1.50	1.26	1.68
22.552	1-Pentadecene	2.51	2.43	1.71	2.05
22.741	Pentadecane	3.88	3.61	3.40	3.70
23.831	Pentadecane, 7-methyl	1.87	2.05	1.84	1.88
24.257	Pentadecane, 2-methyl	0.00	0.00	0.99	1.21
24.425	Pentadecane, 3-methyl	0.82	0.86	0.95	0.87
24.942	1-Hexadecene	2.50	2.27	1.93	2.17

## ตารางภาคผนวก ข-2 (ต่อ)

Retention time (min)	Compound name	Area percentage			
		No catalyst	Bentonite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
25.115	Hexadecane	3.04	2.77	3.04	2.87
26.135	1-Hexadecanol	2.61	0.00	0.00	0.00
26.712	Thiophene, 2-pentyl	1.56	1.32	1.48	1.50
27.209	1-Heptadecene	1.41	1.20	1.22	1.29
27.376	Heptadecane	2.81	2.74	2.57	2.76
27.478	9,9-Dimethyl-9-silafluorene	2.17	1.76	1.44	1.40
28.741	Heptadecane, 2-methyl	1.20	1.21	1.16	1.10
28.908	Anthracene, 1,2,3,4-tetrahydro,9-propyl	1.64	1.81	1.47	1.52
29.378	1-Octadecene	1.50	1.64	1.42	1.43
29.518	Octadecane	2.10	2.27	2.43	2.15
30.365	Heptadecane, 8-methyl	1.89	2.04	1.94	1.84
30.689	2-Butoxysulfonylhexadecane	0.74	0.76	0.74	0.83
31.568	Nonadecane	2.64	2.64	2.94	2.43
32.070	Hexadecanoic acid, methyl ester	0.75	1.02	1.02	0.92
32.345	Nonadecane, 2,3-dimethyl	1.72	2.11	1.89	1.82
33.527	Eicosane	1.70	2.42	1.97	1.80
34.239	Nonadecane, 9-methyl-	1.80	1.87	3.00	2.05
35.388	Heneicosane	1.67	1.82	2.33	2.15
36.057	1-Docosene	0.00	0.00	1.88	2.20
37.180	Docosane	1.35	1.38	1.49	1.80
38.901	Tricosane	1.15	0.96	0.97	1.37
39.467	9-Tricosane	1.52	1.07	0.00	0.00
41.08	Tetracosane	1.63	1.12	1.54	1.87
42.62	Pentacosane	0.94	0.66	1.57	1.68

ตารางภาคผนวก ข-2 (ต่อ)

Retention time (min)	Compound name	Area percentage			
		No catalyst	Bentonite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
44.129	Hexacosane	0.76	0.44	0.95	1.11
45.564	Heptacosane	0.00	0.00	1.44	0.90
46.983	Octacosane	0.00	0.00	0.00	0.53

**ภาคผนวก ค**

การคำนวณความคุ้มค่าทางพลังงาน

ตารางภาคผนวก ค-1 ค่าที่ใช้ในการเปลี่ยนหน่วยทางด้านพลังงาน (ศิริรัตน์ จิตการคำ, 2551)

เปลี่ยนจากหน่วย	เป็นหน่วย	คูณด้วย
แคลอรี (Calories)	จูล (Joules)	4.18
จูล (Joules)	แคลอรี (Calories)	0.239

### 1. การคำนวณเปลี่ยนค่าความร้อนในหน่วย cal/g เป็นค่าพลังงานในหน่วย kJ/kg

ค่าความร้อนสุทธิของน้ำมันไฟโรไลซิส = 10,932.2 cal/g

ดังนั้น ค่าความร้อนในหน่วยพลังงาน J = 10,932.2 x 4.18 J/g = 45,696.596 J/g

หรือเท่ากับ 46,596.596 kJ/kg

### 2. การคำนวณความคุ้มค่าทางพลังงาน

พลังงานความร้อนจากน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว (WEO) = 44,880.24 kJ/kg

พลังงานความร้อนจากน้ำมันไฟโรไลซิส = 46,596.59 kJ/kg

การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน = พลังงานความร้อนจากน้ำมันไฟโรไลซิส – พลังงาน  
ความร้อนจากน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว

การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน = 46,596.59 – 44,880.24 = 816.36 kJ/kg

ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าพลังงานความร้อน (%)

$$= \frac{\text{การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน}}{\text{พลังงานความร้อนจากน้ำมันเครื่องยนต์ใช้แล้ว}} \times 100$$

$$= \frac{816.36}{44,880.24} \times 100$$

$$= 1.81\%$$