

เชื้อเพลิงสะอาดจากยางรถยนต์ใช้แล้วโดยวิธีดำเนินการสองขั้น: ไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันและไพโรไลซิส



ว่าที่ร้อยตรี กัมปนาท ปราศราคี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CLEAN FUEL FROM USED TYRE IN TWO-STAGE PROCEDURE:
HYDRODESULFURIZATION AND PYROLYSIS

Acting Second Lieutenant Kumpanard Par Drakee

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

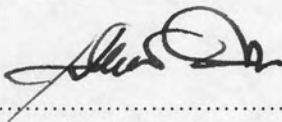
Copyright of Chulalongkorn University

490813

98/10/851

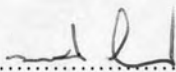
หัวข้อวิทยานิพนธ์ เชื้อเพลิงสะอาดจากยางรถยนต์ใช้แล้วโดยวิธีดำเนินการสองชั้น:
 ไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันและไพโรไลซิส
โดย ว่าที่ร้อยตรี กัมปนาท ปราศราคี
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมณะเศวต)

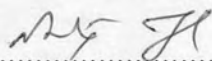
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



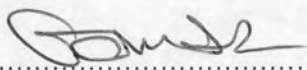
.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)



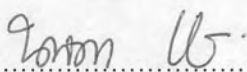
.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)



.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)



.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย)



.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. นพิตา หนีชูระนันท์)



กัมปนาท ปราศราที : เชื้อเพลิงสะอาดจากยางรถยนต์ใช้แล้วโดยวิธีดำเนินการสองขั้น:
ไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชันและไพโรไลซิส (CLEAN FUEL FROM USED TYRE IN TWO-STAGE
PROCEDURE: HYDRODESULFURIZATION AND PYROLYSIS) อ.ที่ปรึกษา:
ศ.ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ อ.ที่ปรึกษาร่วม: รศ.ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์, 130
หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้ว โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ
เบดนิ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.4 เซนติเมตร ยาว 81 เซนติเมตร การทดลองเบื้องต้นโดยการ
ออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^4 เป็นการศึกษาผลของตัวแปรต่อไพโรไลซิสของยางรถยนต์
ได้แก่ เวลา (10 - 30 นาที) อุณหภูมิ (400 - 500 องศาเซลเซียส) อัตราการไหลของแก๊ส (1 - 2 ลิตรต่อ
นาที) และชนิดแก๊ส (แก๊สไนโตรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์) มีเพียงอุณหภูมิเท่านั้นที่มีผลต่อร้อยละ
ผลได้ของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเหลว
ลดลง และการเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้ร้อยละผลได้ของแนฟทาและเคโรซีนเพิ่มขึ้น แต่ร้อยละผลได้ของ
กากน้ำมันหนักลดลง ผลิตภัณฑ์น้ำมันเบามีการแจกแจงจุดเดือดอยู่ระหว่าง น้ำมันแก๊สโซลีน และน้ำมัน
ดีเซล โดยผลการทดลองมีร้อยละผลได้ของแข็ง 30.1 - 33.3 ร้อยละผลได้ของเหลว 43.9 - 65.0 ร้อยละ
ผลได้แก๊ส 1.3 - 25.0 ภาวะที่เหมาะสมคือ ร้อยละผลได้ของเหลว 65 มีปริมาณแนฟทาร้อยละ 27.8
เคโรซีนร้อยละ 6.2 แก๊สออกซิลเบาร้อยละ 26.0 แก๊สออกซิลร้อยละ 4.5 และกากน้ำมันร้อยละ 35.6
องค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์ แก๊สได้แก่ แก๊สไฮโดรเจนและ แก๊สไฮโดรคาร์บอน $C_1 - C_5$

กระบวนการดำเนินการแบบสองขั้นเป็นวิธีปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เหลว(น้ำมัน) โดยเป็น
ไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชัน จากนั้นต่อเนื่องด้วยไพโรไลซิสภายใต้บรรยากาศของแก๊สผสมระหว่างไนโตรเจน
คาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด คือ ไอร์ออน (III) ซัลไฟด์
นิกเกิลโมลิบดีนัมและโคบอลต์ บนถ่านกัมมันต์ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้องค์ประกอบส่วนที่เบา ได้แก่
แนฟทาและเคโรซีนเพิ่มขึ้นและกากน้ำมันลดลง ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสำหรับไฮโดรไพโรไลซิส
และไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชัน สามารถลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันเบาได้

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....
ปีการศึกษา.....2549.....

ลายมือชื่อนิสิต..... กัมปนาท ปราศราที.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4872219923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: PYROLYSIS / USED TYRE / LIQUID FUEL / HYDRODESULFURIZATION

KUMPANARD PARDRAKEE : CLEAN FUEL FROM USED TYRE IN TWO-STAGE
PROCEDURE: HYDRODESULFURIZATION AND PYROLYSIS. THESIS ADVISOR :
PROF. PATTARAPAN PRASASSARAKICH, PhD. THESIS CO-ADVISOR ASSOC.PROF.
SOMKIAT NGAMPRASERTSITH, Dr. de l' INPT.,: 130 PP.

The pyrolysis of used tyres was conducted in a fixed bed reactor (81 cm length and 4.4 cm i.d.) under various conditions. The two-level factorial experimental design was applied to study the effects of the process variables such as temperature (400 – 500 °C), time (10 – 30 min), gas flow rate (1 – 2 L/min), gas type (N₂ and CO₂). The analysis of the results from the design showed that only the temperature had a significant effect. The liquid yield decreased with increasing temperature. The content of naphtha and kerosene increased while long residue decreased with increasing temperature. Pyrolytic light oils were found lighter than diesel but heavier than gasoline. Global yields were determined as follows: solid yield 30.1 – 33.3%, liquid yield 43.9 – 65.0% and gas yield 1.3 – 25.0%. At optimum condition, the liquid yield reached 65.0% which included naphtha 27.8%, kerosene 6.2%, light gas oil 26.0%, gas oil 4.5% and long residue 35.6%. The main gases produced from the pyrolysis were H₂ and hydrocarbon C₁ – C₅.

Two – stage process of used tyre pyrolysis was undertaken to upgrade the derived oil. The used tyre was hydrodesulfurized and subsequently pyrolyzed under H₂, N₂ and CO₂. Activated carbon supported Fe₂S₃, Ni-Mo and Dolomite has been employed as catalysts in the experiment. The presence of catalysts would benefit the formation of lighter components, naphtha, kerosene and reduction of long residue. The effect of catalysts on the sulfur reduction was also investigated. Ni-Mo catalyst used in hydrolysis and hydrodesulfurization had high activities for sulfur removal of light liquid product.

Department.....Chemical Technology.....	Student's signature	<i>Kumparond Pardrakee.</i>
Field of study.....Chemical Technology.....	Advisor's signature	<i>Prof. Pattarapan Prasassarakich</i>
Academic year...2006.....	Co-Advisor's signature	<i>Somkiat Ngamprasertsith</i>

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ และรองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำการทำวิจัย ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์ด้วยดียิ่ง รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำ

งานวิจัยเรื่อง "เชื้อเพลิงสะอาดจากยางรถยนต์เหลือทิ้งโดยวิธีดำเนินการสองขั้น: ไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันและไพโรไลซิส" สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุน จากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิงภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี รวมถึงทุนบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ บริษัท BASF(Thai) จำกัด และ บริษัท Tosoh Coporation ประเทศญี่ปุ่น ที่สนับสนุนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ชวลิต งามจรุสศรีวิชัย และอาจารย์ ดร.นพิตา หนีงูชีระนันท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ คำแนะนำ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและให้คำแนะนำต่างๆ ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจจนกระทั่งทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และ ให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 ยางรถยนต์.....	3
2.2 การใช้ประโยชน์จากยางรถยนต์ใช้แล้ว.....	12
2.3 ไพโรไลซิส.....	14
2.4 สารประกอบกำมะถัน.....	25
2.5 การขจัดกำมะถัน.....	28
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	40
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	40
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	42
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	43
3.4 การดำเนินการวิจัย.....	48
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	52
4.1 การวิเคราะห์สมบัติยางรถยนต์.....	52
4.2 กระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้ว.....	53
4.3 การผลิตเชื้อเพลิงสะอาดจากยางรถยนต์ใช้แล้วโดยวิธีดำเนินการสองขั้น ได้แก่อีโตรีดิซัลเฟอโรเซชันและไพโรไลซิส.....	67

	หน้า
4.4 การผลิตเชื้อเพลิงสะอาดจากยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไฮโดรไพโรไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	74
4.5 สมบัติอื่นๆของผลิตภัณฑ์.....	77
4.6 การกระจายของกำมะถัน.....	91
4.7 การขจัดกำมะถันออกจากผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	96
4.8 ศักยภาพของผลิตภัณฑ์.....	100
4.9 การเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของเหลวและเนฟทากับงานวิจัยอื่น.....	102
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	104
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	104
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	107
รายการอ้างอิง.....	108
ภาคผนวก.....	113
ภาคผนวก ก การคำนวณและข้อมูลการทดลอง.....	114
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สมบัติของแข็ง.....	116
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ยางรถยนต์ด้วย TG/DTA.....	124
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว.....	125
ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สโดยแก๊สโครมาโทกราฟี.....	128
ภาคผนวก ฉ สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า.....	129
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	130

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1	เปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ 13
2.2	กระบวนการปลดปล่อยสารผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสถ่านหิน 19
2.3	การจำแนกลักษณะของไพโรไลซิสตามอัตราการให้ความร้อน และอุณหภูมิ..... 19
2.4	ผลของอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และเวลาต่อการเกิดผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสหิน..... 20
2.5	องค์ประกอบพื้นฐานในน้ำมันดิบ 26
2.6	ตัวอย่างสารประกอบกำมะถันที่พบในมิดเดิลดีสทิลเลต..... 28
2.7	ซีโอไลต์ ที่ดูดซับด้วยโลหะหมู่ I และหมู่ II..... 36
2.8	อัตราส่วน Si/Al ซีโอไลต์ชนิด X และ Y ที่ดูดซับด้วยโลหะหมู่ I และหมู่ II.. 36
3.1	การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล 2^4 ของไพโรไลซิสยางรถยนต์..... 49
3.2	การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล 2^3 ของไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันยางรถยนต์..... 50
4.1	การวิเคราะห์แบบประมาณ แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของยางรถยนต์..... 53
4.2	ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลไพโรไลซิสยางรถยนต์..... 54
4.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของเหลว..... 58
4.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้แก๊ส..... 58
4.5	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้เนฟทา..... 59
4.6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้เนฟทากากน้ำมัน..... 59
4.7	ผลของอุณหภูมิและชนิดของบรรยากาศแก๊ส ต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์อัตราการไหลแก๊ส 1.0 ลิตรต่อนาที..... 62
4.8	ผลของอัตราการไหลและอุณหภูมิต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์ ภายใต้บรรยากาศแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจน..... 65
4.9	ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันยางรถยนต์..... 68
4.10	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการขจัดกำมะถัน..... 68
4.11	ผลไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันและตามด้วยไพโรไลซิสยางรถยนต์ ต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์..... 71

สารบัญญัตินี้

ตาราง	หน้า	
4.12	ผลของอุณหภูมิ บรรยากาศแก๊ส และ เวลา การแจกแจงผลิตภัณฑ์ใน กระบวนการ ไฮโดรไฟโรไลซิสยางรถยนต์ ที่อัตราการไหลแก๊สรวม เป็น 1.1 ลิตรต่อนาที.....	73
4.13	ผลของอุณหภูมิ บรรยากาศของแก๊ส และ ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแจกแจง ผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไฮโดรไฟโรไลซิสยางรถยนต์ ที่อัตราการไหลแก๊สรวม เป็น 1.1 ลิตรต่อนาที.....	75
4.14ก	องค์ประกอบหลักในน้ำมันเบาที่ได้จากไฟโรไลซิสยางรถยนต์โดยไม่ใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	82
4.14ข	องค์ประกอบหลักในน้ำมันเบาที่ได้จากไฟโรไลซิสยางรถยนต์โดยไม่ใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	82
4.15ก	องค์ประกอบหลักในน้ำมันเบาที่ได้จากไฟโรไลซิสยางรถยนต์ โดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา นิกเกิลโมลิบดีนัมที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	83
4.15ข	องค์ประกอบหลักในน้ำมันเบาที่ได้จากไฟโรไลซิสยางรถยนต์ โดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา นิกเกิลโมลิบดีนัมที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	83
4.16	องค์ประกอบหลักในส่วนกลั่นน้ำมันเบา < 200 °C	85
4.17	ผลของภาวะไฟโรไลซิสต่อค่าความร้อนของน้ำมัน.....	87
4.18	ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบแบบประมาณของผลิตภัณฑ์ แข็งที่ได้จาก ไฟโรไลซิสยางรถยนต์ ที่อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ 1.0 ลิตรต่อนาที เปรียบเทียบกับยางรถยนต์ และ คาร์บอนแบล็ก.....	89
4.19	องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์สำหรับไฟโรไลซิสยางรถยนต์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียสอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน และ คาร์บอนไดออกไซด์ 1.0 ลิตรต่อนาที.....	90
4.20ก	ร้อยละโดยน้ำหนักของกำมะถันในผลิตภัณฑ์จากไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน และตามด้วยไฟโรไลซิส.....	92
4.20ข	ร้อยละโดยน้ำหนักของกำมะถันในผลิตภัณฑ์จากไฮโดรไฟโรไลซิส.....	92
4.21	ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดต่อร้อยละการขจัดกำมะถันในกระบวนการ ไฮโดรไฟโรไลซิสยางรถยนต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง.....	97

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
4.22	ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการขจัดกำมะถันในน้ำมันแต่ละชนิดต่อ ร้อยละการขจัดกำมะถัน.....	97
4.23	ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบแบบประมาณและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แข็ง.....	101
4.24	ค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์เปรียบเทียบกับค่าความร้อนของแก๊สธรรมชาติ (NG) และแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG).....	102
4.25	การเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของเหลวและร้อยละผลได้แนฟทากับงานวิจัยอื่น..	103
ข1	การจำแนกถ่านหินตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา ASTM D388.....	123
จ1	ข้อมูลและภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	128
ฉ1	สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลโมลิบดีนัมทางการค้า.....	129

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 ปริมาณการใช้ยางรถยนต์ชนิดต่างๆในประเทศไทย.....	2
2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ.....	3
2.2 โครงสร้างโมเลกุลของยางสไตรีน-บิวตะไดอีน.....	4
2.3 โครงสร้างโมเลกุลของยางบิวตะไดอีน.....	5
2.4 การเชื่อมขวางโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน.....	6
2.5 อิทธิพลของปริมาณกำมะถันต่อความแข็งแรงดึง และการดึงยืด ณ จุดขาด	7
2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นในการเชื่อมขวางของยางกับ สมบัติเชิงกลบางประการของยาง.....	7
2.7 Tosco II process.....	14
2.8 ขั้นตอนในกระบวนการไฮโดรไพโรไลซิส.....	17
2.9 ผลของอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และเวลาต่อการกระจายตัวของ ผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสถ่านหิน.....	20
2.10 ชนิดสารประกอบกำมะถันที่แตกต่างกันตามจำนวนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นตาม น้ำมันดิบ ชนิด Middle East.....	26
2.11 โคโรมาโทแกรมของ Poly Aromatic Sulfur Compound (PASC) ใน มิดเดิลอีสท์ลีต ชนิดกลั่นตรง (SR – MD) ของน้ำมันดิบ Arabian Light Crude โดยใช้เครื่องมือวัด GC – AED (Gas Chromatograph – Atomic Emission Detector).....	27
2.12 ชนิดของสารประกอบกำมะถันในเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ.....	27
2.13ก ไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันของ Thiophene.....	30
2.13ข ไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันของ Benzothiophene.....	30
2.13ค ไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันของ Dibenzothiophene.....	30
2.14 แผนภาพของหน่วยไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน.....	34
3.1 แผนภาพกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงสะอาดจากยางรถยนต์ใช้แล้วโดย วิธีดำเนินการสองขั้นได้แก่ ไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันและไพโรไลซิส.....	41
3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed Bed Reactor).....	42
3.3 เครื่องปฏิกรณ์ Parr Reactor Model 4843.....	42

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
4.1 Half Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้ของเหลว.....	57
4.2 Half Normal Probability Plot ร้อยละผลได้ของแก๊ส.....	57
4.3 Half Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้เนฟทา.....	58
4.4 Half Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้กากน้ำมัน.....	58
4.5 ผลของอุณหภูมิและชนิดบรรยากาศแก๊สต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์น้ำมันจากไพโรไลซิส และ อัตราการไหลแก๊ส 1.0 ลิตรต่อนาที (ในวงเล็บ:ร้อยละผลได้ของเหลว).....	59
4.6 ผลของอุณหภูมิและชนิดบรรยากาศแก๊สต่อปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อัตราการไหลของแก๊ส 1.0 ลิตรต่อนาที.....	61
4.7 ผลของอุณหภูมิและชนิดบรรยากาศของแก๊สต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อัตราการไหลแก๊ส 1.0 ลิตรต่อนาที (ในวงเล็บ:ร้อยละผลได้ของเหลว).....	62
4.8 ผลของอุณหภูมิต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อัตราการไหลแก๊ส 1.0 ลิตรต่อนาที ภายใต้แก๊สผสมอัตราส่วนของCO ₂ :N ₂ เป็น 1:1 (ในวงเล็บ:ร้อยละผลได้ของเหลว).....	62
4.9ก ผลของอัตราการไหลแก๊สและอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สภายใต้บรรยากาศของคาร์บอนไดออกไซด์.....	64
4.9ข ผลของอัตราการไหลแก๊สและอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน.....	64
4.10 ผลของอัตราการไหลแก๊สและอุณหภูมิต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์น้ำมันที่บรรยากาศของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์(ในวงเล็บ:ร้อยละผลได้ของเหลว).....	65
4.11 ผลของอัตราการไหลแก๊สและอุณหภูมิต่อการแจกแจงจุดเดือดของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน(ในวงเล็บ:ร้อยละผลได้ของเหลว).....	65
4.12 Half Normal Probability Plot ของร้อยละการขจัดกำมะถัน.....	68
4.13 ผลของอุณหภูมิและชนิดบรรยากาศของแก๊สต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์ น้ำมันในกระบวนการไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส ไฮโดรเจน 0.1 ลิตรต่อนาที เวลา 60 นาทีและตามด้วยไพโรไลซิสยางรถยนต์ที่เวลา 10 นาที อัตราการไหลแก๊ส 1.0 ลิตร.....	70

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
4.14 ผลของอุณหภูมิและชนิดบรรยากาศแก๊ส และไฮโดรดีซัลเฟอโรเซนต่อการ แจกแจงผลิตภัณฑ์น้ำมันในกระบวนการไฮโดร ไพโรไลซิส ยางรถยนต์ใน บรรยากาศแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน อัตราการไหลแก๊สรวม 1.1 ลิตรต่อนาที.....	72
4.15 ผลของอุณหภูมิ และ ตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์น้ำมันใน กระบวนการไฮโดรไพโรไลซิสยางรถยนต์ อัตราการไหลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 1.0 ลิตรต่อนาที.....	75
4.16 Simulated Distillation Gas Chromatograph Curve ของน้ำมันเบา จาก ไพโรไลซิสยางรถยนต์ ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้ บรรยากาศแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลแก๊สเป็น 1 ลิตรต่อนาทีและเปรียบเทียบกับน้ำมันแก๊สโซลีน และ น้ำมันดีเซล.....	76
4.17ก GC/MSโครมาโทแกรมของน้ำมันเบาจากไพโรไลซิสยางรถยนต์อัตราการไหลแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์เป็น 1 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	78
4.17ข GC/MSโครมาโทแกรมของน้ำมันเบาจากไพโรไลซิสยางรถยนต์อัตราการไหลแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์เป็น 1 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	78
4.18ก GC/MS โครมาโทแกรมของน้ำมันเบาจาก ไพโรไลซิสยางรถยนต์โดยใช้นิกเกิล โมลิบดีนัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 1 ลิตร ต่อนาที อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	79
4.18ข GC/MS โครมาโทแกรมของน้ำมันเบาจาก ไพโรไลซิสยางรถยนต์โดยใช้นิกเกิล โมลิบดีนัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 1 ลิตร ต่อนาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	79
4.19 ปฏิกิริยา Diels Alder.....	80
4.20 GC/MS โครมาโทแกรมของส่วนกลั่นน้ำมันเบา < 200 °C จากไพโรไลซิส ยางรถยนต์ อัตราการไหลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 1 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	83
4.21 ผลของอุณหภูมิและชนิดบรรยากาศของแก๊สต่อค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ น้ำมันอัตราการไหลแก๊ส 1.0 ลิตรต่อนาที เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล.....	85

สารบัญญภาพ

	ภาพประกอบ	หน้า
4.22	ผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แห้งจากไพโรไลซิสยางรถยนต์ที่อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ 1.0 ลิตรต่อนาที.....	88
4.23	ผลของอุณหภูมিবรรยากาศแก๊ส ต่อการแจกแจงของกำมะถันในผลิตภัณฑ์สำหรับไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊สไฮโดรเจน 0.1 ลิตรต่อนาที เวลา 60 นาทีและตามด้วยไพโรไลซิสยางรถยนต์ อัตราการไหลแก๊ส 1.0 ลิตรต่อนาทีในผลิตภัณฑ์ (ในวงเล็บ: ร้อยละโดยน้ำหนักของกำมะถันในผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด).....	90
4.24	ผลของอุณหภูมิและเวลา ต่อการแจกแจงของกำมะถันในผลิตภัณฑ์สำหรับไฮโดรไพโรไลซิสยางรถยนต์ อัตราการไหลแก๊ส 1.0 ลิตรต่อนาที (ในวงเล็บ: ร้อยละโดยน้ำหนักของกำมะถัน ในผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด).....	92
4.25	ผลของอุณหภูมินิวบรยากาศแก๊ส และตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแจกแจงของกำมะถันในผลิตภัณฑ์ สำหรับไฮโดรไพโรไลซิสยางรถยนต์ที่อัตราการไหลแก๊ส 1.0 ลิตรต่อนาที (ในวงเล็บ: ร้อยละโดยน้ำหนักของกำมะถันในผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด).....	94
4.26	การดูดซับสารประกอบกำมะถันด้วยซีโอไลต์ชนิดNaY แบบ π -Complexation..	98
4.27	การเปรียบเทียบร้อยละการขจัดกำมะถันออกจากน้ำมันเบาและน้ำมันส่วนกลั่น < 200 °C ด้วยกระบวนการต่างๆ.....	99
4.28	การแจกแจงผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ภาวะสูงสุดและต่ำสุดเปรียบเทียบกับน้ำมันดิบจากแหล่งอิหร่าน (Iran) และน้ำมันดิบจากแหล่งลานกระบือ(Lan Krabu).....	100
ค1	การสลายตัวของยางรถยนต์ด้วยเครื่อง TG/DTA.....	
ง1	ตัวอย่างโครมาโทแกรมการวิเคราะห์น้ำมันดิบจาก Simulated Distillation Gas Chromatograph.....	124
ง2	ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือดของน้ำมันดิบจาก Simulated Distillation Gas Chromatograph.....	125