


การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้วโดยไม่โครเวฟ



นางสาวภัทรานิษฐ์ รัศมีดารา

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PRODUCTION OF LIQUID FUEL FROM USED TIRE PYROLYSIS BY MICROWAVE



Miss Pattranit Russmeedara

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้วโดย
ไมโครเวฟ

โดย

นางสาวภัทรานิษฐ์ รัศมีดารา

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

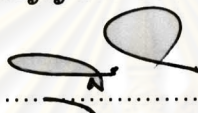
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพิตา หิญาชีระนันท์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

อาจารย์ ดร.คุณากร ภูจินดา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



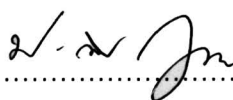
.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)



.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพิตา หิญาชีระนันท์)



.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.คุณากร ภูจินดา)



.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คุณลธาวา)



.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช)

ภัทรานิชรุ่ รัศมีดารา : การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้วโดยไมโครเวฟ. (PRODUCTION OF LIQUID FUEL FROM USED TIRE PYROLYSIS BY MICROWAVE). อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ญิวีระนันท์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อาจารย์ ดร. คุณากร ภูจินดา, 115 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้วโดยไมโครเวฟที่อัตราการให้ความร้อน 102 ถึง 330 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในการไพโรไลซิส 10 ถึง 25 นาที ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจนที่ 0.05 ลิตรต่อนาที ซึ่งร้อยละผลได้ของน้ำมันสูงสุด คือ ร้อยละ 50.3 ที่อัตราการให้ความร้อน 102 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในการไพโรไลซิส 25 นาที เมื่ออัตราการให้ความร้อนและเวลาในการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นส่งผลน้อยมากต่อค่าความร้อนของน้ำมันเบา (40 กิโลจูลต่อกรัม) และถ่านชาร์ (25 กิโลจูลต่อกรัม) ที่ได้การไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ ตามลำดับ ปริมาณกำมะถันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันเบา (ร้อยละ 0.87) และถ่านชาร์ (ร้อยละ 2.39) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น และน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วมีสมบัติการแจกแจงจุดเดือดอยู่ในช่วงแก๊สโซลีน และน้ำมันดีเซล โดยน้ำมันเบาที่ได้สามารถนำไปกลั่นเป็นน้ำมันดีเซลและแก๊สโซลีน ปริมาณร้อยละ 42 และ 48 ตามลำดับ และน้ำมันเบาจากการไพโรไลซิสยางรถยนต์เป็นเวลา 20 นาที ที่อัตราการให้ความร้อน 102 องศาเซลเซียสต่อนาที สามารถนำไปกลั่นเป็นแนฟทาได้มากที่สุดร้อยละ 45.7 โดยน้ำหนัก ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ ที่อัตราการให้ความร้อน 153 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในการไพโรไลซิส 10 นาที ซึ่งมีพื้นที่ผิว 76.2 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุน 139 อังสตรอม และปริมาตรรูพรุน 0.26 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม นำมาใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม (นิกเกิลร้อยละ 5 และโมลิบดีนัมร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก) สำหรับลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันเบา ที่อุณหภูมิการไพโรไลซิส 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 153 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนถ่านชาร์สามารถลดปริมาณกำมะถันได้สูงสุดคือ ร้อยละ 16.2 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัม

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อผู้ผลิต.....ภัทรานิชรุ่ รัศมีดารา
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....นพิตา ญิวีระนันท์
ปีการศึกษา.....2552.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....คุณากร ภูจินดา

5072412123 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORDS: PYROLYSIS / MICROWAVE / USED TIRE / HEATING RATE / SULFUR

PATTRANIT RUSSMEEDARA : PRODUCTION OF LIQUID FUEL FROM USED TIRE PYROLYSIS BY MICROWAVE. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. NAPIDA HINCHIRANAN, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: KUNAKORN POOCHINDA, Ph.D., 115 pp.

This article studied the production of liquid derived from used tire pyrolysis induced by microwave under nitrogen atmosphere at a flowrate of 0.05 L/min with various heating rates and reaction time in a range of 102 – 330°C and 10 – 25 min, respectively. The results indicated that the maximum oil yield was achieved to 50.3 wt% at a heating rate of 102°C/min for 25 min. It was also found that heating rate and reaction time did not affect the heating value of light oil (ca. 40 KJ/g) and pyrolysis char (ca. 25 KJ/g). The sulfur content in the light oil and pyrolysis char slightly increased with increasing the heating rate. The light oil yield from used tire pyrolysis by microwave has boiling point distribution between gasoline and diesel oil. It can be distilled to 42% of diesel oil and 48% of gasoline. The light oil yield was also distilled as naphtha with maximum content of 45.7 wt% at a heating rate of 102 °C/min for 20 min. However, the obtained pyrolysis had a large amount of sulfur compounds light oil. The pyrolysis char produced from used tire pyrolysis by microwave at a heating rate of 153°C/min for 10 min. This char having surface area of 76.2 m²/g with pore size and pore volum of 139 A° and 0.26 cm³/g, respectively was employed as the supporter for NiMo catalyst (5 wt% Ni and 16 wt% Mo) for decreasing the sulfur content in the pyrolysis light oil, The NiMo/char catalyst could provide the highest sulfur removal as 16.2% by using 10 g of NiMo/Char catalyst at 400°C with a heating rate of 153 °C/min, pyrolysis temperature of 400 °C for 10 min.

Department:.....Chemical Technology....Student's Signature.....*Pattranit Russmeedara*
 Field of Study:....Chemical Technology....Advisor's Signature.....*Napida Hinchiran*
 Academic Year:.....2009.....Co-Advisor's Signature.....*K. Poochinda*

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นพิตา หิณฺฐิระนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. คุณากร ภูจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำการทำวิจัย ตลอดจนคุณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยมาตลอด

ขอขอบคุณการสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง และทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน

กราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชดารา ที่กรุณามาเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณคุณกัมปนาท ปราศราศี และคุณดุษฎี บัณฑิตยที่ให้คำปรึกษาแนะนำการทำวิจัย และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและกรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ และขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคและหลักสูตรปิโตรเคมี และพอลิเมอร์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขั้นตอนของดำเนินงานวิจัย.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.2 ยางรถยนต์.....	7
2.2.1 ยางธรรมชาติ.....	8
2.2.2 ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน.....	8
2.2.3 ยางบิวทาไดอีน.....	8
2.2.4 ผงเขม่าดำ.....	10
2.2.5 สารทำให้ยางคงรูป.....	11
2.2.6 สารเติมแต่ง.....	12
2.3 การใช้ประโยชน์จากยางรถยนต์ใช้แล้ว.....	12
2.4 สมบัติไดอิเล็คทริก.....	14
2.5 ไมโครเวฟ.....	15
2.5.1 กลไกการเกิดความร้อน.....	15
2.5.2 อันตรกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุ.....	17
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ.....	18

บทที่	หน้า
2.6.1 ค่าความชื้น.....	18
2.6.2 ความหนาแน่น.....	20
2.6.3 อุณหภูมิ.....	20
2.6.4 ความถี่.....	20
2.6.5 การนำไฟฟ้า.....	20
2.6.6 ค่าการนำความร้อน.....	21
2.6.7 ค่าความจุความร้อนจำเพาะ.....	21
2.6.8 ค่าความลึกในการทะลุทะลวง.....	21
2.7 ข้อได้เปรียบของระบบคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก.....	23
2.8 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	25
2.8.1 แหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูงหรือเจนเนอเรเตอร์.....	27
2.8.2 อุปกรณ์ป้องกัน.....	28
2.8.3 อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณคลื่นที่สะท้อนกลับ.....	28
2.8.4 อุปกรณ์ปรับค่าคลื่น.....	28
2.8.5 แอพพลิเคเคเตอร์.....	29
2.9 อุปกรณ์อื่น ๆ.....	31
2.9.1 ระบบควบคุมการรั่วไหลและความปลอดภัย.....	31
2.9.2 ระบบควบคุม.....	31
2.10 กระบวนการไพโรไลซิส.....	31
2.10.1 การแบ่งประเภทของการไพโรไลซิส.....	32
2.10.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส.....	33
2.11 กระบวนการไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้ว.....	34
2.12 สารประกอบกำมะถันในน้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิส ของยางรถยนต์ใช้แล้ว.....	35
2.13 การกำจัดสารประกอบกำมะถันในน้ำมันเชื้อเพลิง.....	38
2.13.1 การกำจัดกำมะถัน.....	38
2.13.2 ไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน.....	42
2.14 ตัวเร่งปฏิกิริยา และความไวต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน.....	43
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	47
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	53

บทที่	หน้า
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	53
3.2 สารเคมีที่ใช้.....	54
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	54
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างยางรถยนต์ใช้แล้ว.....	54
3.3.2 การไพโรไลซิส.....	54
3.3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	57
3.3.4 กระบวนการดีซัลเฟอไรเซชัน.....	58
3.3.5 การวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของยางรถยนต์ใช้แล้ว และผลิตภัณฑ์.....	59
3.3.6 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	60
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	61
4.1 การวิเคราะห์สมบัติยางรถยนต์ใช้แล้ว.....	61
4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของยางรถยนต์ใช้แล้ว	61
4.1.2 การวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักของยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก.....	63
4.2 ผลของการปรับระดับกำลังไฟฟ้าหน้าเครื่องไมโครเวฟต่ออุณหภูมิ และอัตราการให้ความร้อนของกระบวนการไพโรไลซิส.....	64
4.3 ผลของอัตราการให้ความร้อนและเวลาในการไพโรไลซิส.....	66
4.3.1 ผลของอัตราการให้ความร้อนและเวลาในการไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์.....	66
4.3.2 ผลของอัตราการให้ความร้อนและเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยรังสีไมโครเวฟต่อค่าความร้อนและสมบัติของถ่านชาร์.....	68
4.4 เอกลักษณะของน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ.....	72
4.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามจุดเดือดด้วย Simulated distillation gas chromatography (GC-SIMDIS).....	72
4.5 ผลของอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิในการไพโรไลซิส.....	74
4.5.1 ผลของอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์.....	74

บทที่	หน้า	
4.6	เปรียบเทียบวิธีการไฟโรไลซิสระหว่างการใช้ความร้อนทั่วไปกับการใช้พลังงานไมโครเวฟ.....	75
4.6.1	ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์.....	75
4.6.2	ปริมาณกำมะถันและค่าความร้อนในผลิตภัณฑ์น้ำมันเบาและถ่านชาร์.....	76
4.7	การลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันเบาที่ได้จากการไฟโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟโดยใช้ถ่านชาร์จากกระบวนการไฟโรไลซิส.....	79
4.7.1	อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อการลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันเบา.....	79
4.7.2	สัณฐานวิทยาของถ่านชาร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	82
5	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	86
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	86
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	89
	รายการอ้างอิง.....	90
	ภาคผนวก.....	100
	ภาคผนวก ก สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า.....	101
	ภาคผนวก ข สมบัติของผงเขม่าดำ.....	102
	ภาคผนวก ค การวิเคราะห์สมบัติของแข็ง.....	103
	ภาคผนวก ง การคำนวณ.....	111
	ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว.....	113
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	115

สารบัญญัตราสาร

ตาราง		หน้า
2.1	ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง.....	7
2.2	พลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ.....	13
2.3	สมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุชนิดต่าง ๆ	14
2.4	ค่าสมบัติไดอิเล็กทริกตามประเภทวัสดุในการทำความร้อน.....	19
2.5	ความยาวคลื่นกับค่าความถี่ในการทะลุทะลวงของคลื่นที่ระดับความถี่ต่างๆ	22
2.6	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้ว ๆ	35
2.7	องค์ประกอบพื้นฐานของน้ำมันดิบ.....	37
2.8	ตัวอย่างสารประกอบกำมะถันที่พบในมิดเดิลดิสทิลเลต.....	38
4.1	การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ.....	62
4.2	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ.....	62
4.3	อัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิสูงสุดภายใต้การปรับระดับกำลังไฟฟ้าหน้าเครื่องไมโครเวฟที่แตกต่างกัน.....	66
4.4	ค่าความร้อนและการวิเคราะห์แบบประมาณของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ.....	69
4.5	พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของตัวรองรับ ของถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ	71
4.6	เปรียบเทียบผลของวิธีการไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้ว.....	76
4.7	การวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยความร้อนทั่วไปและด้วยไมโครเวฟ.....	77
4.8	พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น.....	80
4.9	ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า NiMo/Al ₂ O ₃ ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Char และตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Carbon black ต่อการลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันเบาที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ.....	82
4.10	ร้อยละโดยน้ำหนัก และร้อยละโดยอะตอมของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมนิกเกิลและโมลิบดีนัมที่เตรียมโดยมีตัวรองรับที่เป็นถ่านชาร์และผงเขม่าดำ.....	83

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ปริมาณการใช้ยางรถยนต์ชนิดต่างๆในประเทศไทย.....	6
2.2 โครงสร้างทางเคมีของยางต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตยางล้อรถยนต์.....	9
2.3 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของผงเขม่าดำ.....	10
2.4 อันตรกิริยาระหว่างวัสดุไดอิเล็กทริกและสนามไฟฟ้า.....	16
2.5 การเกิดความร้อนภายในวัสดุด้วยพลังงานต่าง ๆ	24
2.6 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในลักษณะต่าง ๆ	26
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของน้ำและค่าประสิทธิภาพ	29
2.8 ชนิดสารประกอบกำมะถันที่แตกต่างกันตามจำนวนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นตาม น้ำมันดิบชนิด.....	36
2.9 ตัวอย่างปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชัน.....	41
2.10 แผนภาพของหน่วยไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน.....	43
3.1 แผนภาพกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ...	55
3.2 แผนภาพกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยเตาเผา.....	57
4.1 การสลายตัวของยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก.....	64
4.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของยางรถยนต์ใช้แล้วที่บรรจุในหลอดควอตซ์รูปถ้วย ภายใต้การให้รังสีไมโครเวฟอัตราการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน	65
4.3 ผลของอัตราการให้ความร้อนด้วยรังสีไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้ว.....	67
4.4 ผลของอัตราการให้ความร้อนด้วยรังสีไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส ต่อการกระจายตัวของกำมะถันในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ ใช้แล้วเทียบกับปริมาณกำมะถันในยางรถยนต์ใช้แล้วเริ่มต้น.....	70
4.5 ร้อยละปริมาณธาตุอะสมและจุดเดือดของน้ำมันชนิดต่าง ๆ น้ำมันเบาที่ได้จากการ ไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ ที่เวลาของการไพโรไลซิส 20 นาที เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปิโตรเลียม.....	73
4.6 ผลของอัตราการให้ความร้อนต่อร้อยละองค์ประกอบในน้ำมันเบาที่ได้จากการไพ โรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟเป็นเวลา 20 นาที.....	73
4.7 ผลของอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้ แล้วด้วยรังสีไมโครเวฟต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ที่ภาวะคงที่ คือเวลา 10 นาที..	74

ภาพประกอบ	หน้า
4.8 เปรียบเทียบผลของวิธีการไพโรไลซิสต่อการกระจายตัวของกำมะถันในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วเทียบกับปริมาณกำมะถันในยางรถยนต์ใช้แล้วเริ่มต้น.....	78
4.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลไฟโอไรเซชันของไทโอพีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา MoS_2	79
4.10 ลักษณะสัญญาณวิทยาของพื้นผิว.....	83
4.11 สเปกตรัม EDS ของถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟที่อัตราการให้ความร้อน 153 องศาเซลเซียสต่ออนาที เวลาในการไพโรไลซิส 10 นาที.....	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้ปริมาณของยางรถยนต์ใช้แล้วในโลกมีมากกว่า 10 ล้านตันต่อปี (Laresgoiti และคณะ, 2004) ซึ่งยางรถยนต์ใช้แล้วก็จะกลายเป็นขยะที่ย่อยสลายได้ยากและเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่ต้องแก้ไขอย่างเร่งด่วน ยางรถยนต์ประมาณร้อยละ 60 เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นยางรถยนต์ใช้แล้วจึงมีศักยภาพสูงในการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน การนำยางรถยนต์ใช้แล้วมาดัดแปรให้อยู่ในรูปพลังงานที่สามารถนำไปใช้ร่วมกับเครื่องยนต์ในรถยนต์ได้โดยตรงทำได้โดยนำยางรถยนต์ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสของยางรถยนต์เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนสูงในการสลายโมเลกุลของยางในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแก๊ส น้ำมัน และถ่านชาร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้เหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น แก๊สและน้ำมันสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน ส่วนถ่านชาร์สามารถนำมาใช้เป็นผงเขม่าดำ (Carbon black) ชนิดคุณภาพต่ำ หรืออาจเพิ่มคุณภาพในการทำเป็นถ่านกัมมันต์ (Chang และคณะ, 1996 และ Williams และคณะ, 2003) ถึงแม้ว่าแก๊สและน้ำมันที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีค่าพลังงานความร้อนประมาณ 13,000 – 15,000 บีทียู/ปอนด์ (กัมปนาท, 2549) แต่ก็ไม่เกิดความคุ้มค่าในเชิงพาณิชย์เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสต้องใช้พลังงานจำนวนมากเพื่อสลายโครงสร้างของยางที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการย่อยสลายยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยพลังงานคลื่นไมโครเวฟ (Microwave heating) แทนซึ่งเป็นวิธีการที่ประหยัดพลังงานและเวลามากกว่าการใช้ความร้อนแบบธรรมดา เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟมีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดความร้อนภายในตัวเนื้อของวัสดุ (Bulk heating) โดยไม่เกิดการสูญเสียพลังงานแต่อย่างใด นำไปสู่การประหยัดพลังงานที่ต้องใช้ ลดเวลาและความรุนแรงของกระบวนการ เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการให้ความร้อนแบบธรรมดาพบว่า ระบบการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟมีข้อดีเพิ่มเติม คือ มีอัตราการเพิ่มความร้อนที่สูงกว่า ไม่มีการสัมผัสโดยตรงระหว่างแหล่งที่ให้ความร้อนกับวัสดุที่ได้รับความร้อน มีการเลือก (Selectivity) ที่จะให้ความร้อน สามารถควบคุมกระบวนการให้ความร้อน และกระบวนการไล่ความชื้นที่ดีกว่า สามารถลดขนาดของเครื่องมือ และลดปริมาณของเสียได้ (Jones และคณะ, 2002)

กระบวนการไพโรไลซิสด้วยความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ มีลักษณะการให้ความร้อนในเชิงปริมาตร (Volumetric heating) และมีความสามารถในการทะลุทะลวงจึงเกิดความร้อนในเนื้อเยื่อที่เป็นฉนวนได้ดี สามารถควบคุมอุณหภูมิในระบบ และทำให้เกิดการกระจายของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ คลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 จิกะเฮิร์ตสามารถถูกดูดกลืนด้วยวัสดุ และทำให้โมเลกุลของวัสดุเกิดการชนกันและเสียดสีจนเกิดความร้อนขึ้น (รัชดา, 2548) เมื่อนำยางรถยนต์ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งยางรถยนต์ใช้แล้วมีองค์ประกอบผงเขม่าดำ ซึ่งผงเขม่าดำนั้นมีสมบัติในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ (Menendez และคณะ, 2002 และ Dominguez และคณะ, 2007) เนื่องจากไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง (30 เมกะเฮิร์ต ถึง 300 กิกะเฮิร์ต) ทำให้สามารถที่จะทะลุผ่านผงเขม่าดำและทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในอนุภาคผงเขม่าดำได้ (Cha และ Kim, 1993) ดังนั้นเมื่อคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเนื้อยางรถยนต์ใช้แล้วสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ อุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงขึ้นภายในเวลาอันสั้น (Ludlow และคณะ, 2001) ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในกระบวนการน้อยกว่าการให้ความร้อนแบบธรรมดา งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการศึกษาการไพโรไลซิสวัสดุต่าง ๆ ด้วยไมโครเวฟแต่ยังไม่มีงานวิจัยใดศึกษาการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ ยางรถยนต์ที่ใช้แล้วมีผงเขม่าดำเป็นองค์ประกอบอยู่แล้วภายในโครงสร้างซึ่งต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาจำเป็นต้องเติมตัวที่สามารถดูดกลืนรังสีไมโครเวฟเพื่อช่วยให้อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยใช้ระยะเวลาอันย่น นอกจากนั้นถึงแม้ว่ากระบวนการไพโรไลซิสของยางรถยนต์จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงถึงประมาณร้อยละ 40-50 แต่น้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้มีคุณภาพต่ำ เนื่องจากมีสารประกอบกำมะถันเป็นจำนวนมากเป็นสารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) ในกระบวนการขึ้นรูปยางรถยนต์ ดังนั้นจึงต้องหากระบวนการกำจัดกำมะถันก่อนที่จะนำน้ำมันไปใช้จริง การกำจัดกำมะถันส่วนมากใช้กระบวนการไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน (Hydrodesulfurization) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในภาวะที่มีอุณหภูมิและความดันสูง (Te และคณะ, 2001 และ Sumbogo Murti และคณะ, 2005) ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะนำใช้ถ่านชาร์ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟมาเป็นตัวรองรับ (support) โลหะนิกเกิล (Ni) และโมลิบดีนัม (Mo) เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดกำมะถันออกจากน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟของยางรถยนต์ใช้แล้ว

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากกระบวนการไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้วโดยไม่โครเวฟ
2. ศึกษาการกระจายตัวและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในภูมิภาคของเหลว และของแข็งที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้วโดยไม่โครเวฟ
3. ศึกษาผลของการใช้ถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยไม่โครเวฟของยางรถยนต์ใช้แล้วในการเป็นตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้น้ำมันเชื้อเพลิงทดแทนจากกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยคลื่นไมโครเวฟ
2. นำถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยเป็นตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. เตรียมเศษยางรถยนต์ขนาด 250-450 ไมครอนและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
2. วิเคราะห์สมบัติของเศษยางรถยนต์ก่อนทำการทดลอง
 - 2.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)
 - 2.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)
 - 2.3 ปริมาณค่าความร้อน (Gross Calorific Value)
 - 2.4 การสลายตัวด้วยความร้อนโดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA)
3. สร้างเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ
4. ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์ น้ำมัน และถ่านชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วในเครื่องไมโครเวฟ ได้แก่
 - 4.1 อัตราการให้ความร้อนของไมโครเวฟ : 102 153 233 และ 330 °ซ ต่อนาที
 - 4.2 เวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส : 10 15 20 และ 25 นาที
5. ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์ น้ำมัน และถ่านชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟเปรียบเทียบกับกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยความร้อนทั่วไป

- 5.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส : 400 500 และ 600 °ซ
6. วิเคราะห์ผลได้และสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและถ่านชาร์
 - 6.1 น้ำมัน : การแจกแจงจุดเดือด ค่าความร้อน และปริมาณกำมะถัน
 - 6.2 ถ่านชาร์ : วิเคราะห์แบบประมาณ วิเคราะห์แบบแยกธาตุ พื้นที่ผิว และปริมาณกำมะถัน
7. ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสำหรับปฏิกิริยาดีซัลเฟอไรเซชันโดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่
 - 7.1 ชนิดของตัวรองรับ : ถ่านชาร์ที่ได้จากไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้ว ไมโครเวฟ และผงเขม่าดำ
8. วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้
 - 8.1 วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนโดยใช้การวัดการดูดซับ-การคายแก๊สไนโตรเจนด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface area and porosity analyzer)
 - 8.2 วิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) และวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy)
9. ศึกษาการกำจัดกำมะถันในน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วโดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่
 - 8.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา : นิกเกิลโมลิบดีนัมบนอลูมินาทางการค้า นิกเกิลโมลิบดีนัมบนถ่านชาร์ และนิกเกิลโมลิบดีนัมบนผงเขม่าดำ
 - 8.2 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา : 4 และ 10 กรัม
10. วิเคราะห์ และ สรุปผลการทดลอง

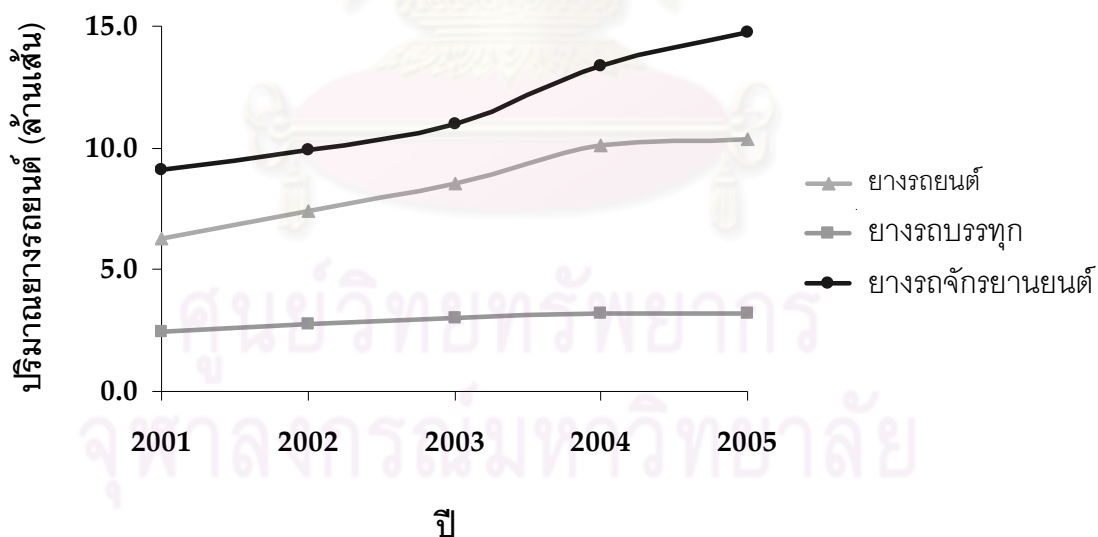
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

เชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งประกอบไปด้วยน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการทางธรณีวิทยาของวัฏจักรคาร์บอนเป็นระยะเวลามากกว่าหลายร้อยล้านปี เป็นแหล่งให้พลังงานที่สำคัญที่สุดสำหรับมนุษยชาติมาเป็นระยะเวลายาวนาน มีอัตราการใช้พลังงานที่สูงมากเมื่อเทียบกับผลผลิตที่ได้จากธรรมชาติ ความต้องการพลังงานจากแหล่งฟอสซิลเพิ่มสูงขึ้นทุก ๆ ปี แม้จะมีความต้องการใช้พลังงานจากแหล่งอื่นเพิ่มมากขึ้นอย่างเด่นชัดก็ตาม แต่ยังคงต่ำกว่ามากเมื่อเทียบกับพลังงานจากฟอสซิล ซึ่งจะเห็นได้จากในปี 1976 ถึง 1994 ปริมาณความต้องการน้ำมันสูงขึ้นร้อยละ 14 ถ่านหินร้อยละ 47 และก๊าซธรรมชาติร้อยละ 65 แต่ในส่วนของเชื้อเพลิงจากแหล่งอื่นเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 14.5 แต่เมื่อเทียบกับปริมาณความต้องการทั้งหมดจะมีสัดส่วนเพียงร้อยละ 15 เท่านั้น (Shell, 1995) บริษัท Shell แสดงข้อมูลไว้ตั้งแต่ปี 1994 ว่าโลกมีปริมาณน้ำมันสำรองใช้ได้อีกประมาณ 45 ปี แต่ดูเหมือนว่าน้ำมันจะหมดก่อน 45 ปีข้างหน้า ถ้าอัตราการใช้เชื้อเพลิงยังเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทุกปี ในส่วนของก๊าซธรรมชาติมีปริมาณสำรองของโลกเหลืออีก 65 ปี ขณะที่ถ่านหินมีสำรองของโลกมากที่สุดประมาณ 200-250 ปี ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาพลังงานจากแหล่งอื่นมาทดแทนแหล่งพลังงานที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งพลังงานทดแทนเป็นพลังงานที่นำมาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิง สามารถแบ่งตามแหล่งที่ได้มาเป็น 2 ประเภท คือ พลังงานทดแทนจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป อาจเรียกว่า พลังงานสิ้นเปลือง ได้แก่ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ นิวเคลียร์ หินน้ำมัน และทรายน้ำมัน เป็นต้น และพลังงานทดแทนอีกประเภทหนึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วสามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก เรียกว่า พลังงานหมุนเวียน ได้แก่ แสงอาทิตย์ (เซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้า) ลม (กังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้า) ชีวมวล (แกลบ ชานอ้อย ทะลายปาล์ม มูลสุกร ฯลฯ) น้ำ (กังหันน้ำจากเขื่อนหรือฝายขนาดเล็ก) และไฮโดรเจน (น้ำผ่านกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส) เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน) ในภาวะที่ประเทศไทยมีความจำเป็นที่จะต้องแสวงหาแหล่งพลังงานหมุนเวียนทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล (ได้แก่ ปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติและถ่านหิน) ซึ่งนับวันจะมีปริมาณลดน้อยลงและมีราคาสูงขึ้น ขยะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งด้านการผลิตพลังงาน เพราะขยะมีศักยภาพที่สามารถนำมาใช้เพื่อผลิตพลังงานได้ ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณมากและไม่ต้องซื้อหา ในปี พ.ศ. 2548 ประเทศไทยมีการจำหน่ายขยะนอกรถยนต์นั่งในประเทศ ประมาณ 10 ล้านเส้น ขยะนอกรถบรรทุกและรถโดยสาร 3

ล้านเส้นยางนอกรถจักรยานยนต์ 15 ล้านเส้นดังรูปที่ 2.1 (สำนักเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) ซึ่งจากตัวเลขนี้ทำให้ในแต่ละปีมียางเก่าเหลือทิ้งจำนวนมาก แต่มีจำนวนเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่โดยที่เหลือถูกนำไปฝังกลบซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด แต่มีข้อเสียคือต้องใช้เนื้อที่มากและใช้เวลายาวนานกว่าจะย่อยสลาย ดังนั้นจึงมีการศึกษาการนำยางรถยนต์มาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์อื่น โดยใช้วิธีสลายโมเลกุลด้วยความร้อนในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนหรือที่เรียกว่า ไพโรไลซิส (pyrolysis) ผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ส่วนของของแข็งประกอบด้วยผงเขม่าดำเป็นหลักสามารถนำกลับไปเป็นสารเติมแต่งในยางหรือนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง เนื่องจากมีค่าความร้อนสูง และสามารถนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ สำหรับของเหลวเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีช่วงจุดเดือดอยู่ระหว่างน้ำมันแก๊สโซลีนและน้ำมันดีเซล ซึ่งสามารถนำไปกลั่นสำหรับใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้วมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นสารสำคัญที่ใช้ในการขึ้นรูปยาง โดยมาตรฐานในการควบคุมปริมาณกำมะถันในน้ำมันต้องมีระดับกำมะถันต่ำกว่า 50 ส่วนในล้านส่วนตามประกาศกระทรวงพลังงานดังตารางที่ 2.1 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดปริมาณกำมะถันในเชื้อเพลิงที่ได้ก่อนนำไปใช้งานจริง



รูปที่ 2.1 ปริมาณการใช้ยางรถยนต์ชนิดต่างๆในประเทศไทย (สำนักเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง (กระทรวงพลังงาน, 2550-2551)

น้ำมัน เชื้อเพลิง	ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูงต่ำ	ประกาศเดิม	ประกาศใหม่	
น้ำมันเบนซิน	โอเลฟิน	ร้อยละโดยปริมาตร	ไม่สูงกว่า	(ไม่ได้กำหนด)	18	
	ตะกั่ว	กรัม/ลิตร	ไม่สูงกว่า	0.013	0.005	
	กำมะถัน	ส่วนในล้านส่วน	ไม่สูงกว่า	500	50	
	เบนซีน	ร้อยละโดยปริมาตร	ไม่สูงกว่า	3.8	1.1	
	แอโรมาติก	ร้อยละโดยปริมาตร	ไม่สูงกว่า	38	38	
	โอเลฟิน	ร้อยละโดยปริมาตร	ไม่สูงกว่า	(ไม่ได้กำหนด)	20	
	ค่าออกเทน	-	ไม่ต่ำกว่า	87	87	
	เสถียรภาพต่อ การเกิด ออกซิเดชัน	นาที่	ไม่ต่ำกว่า	360	360	
	น้ำมันดีเซล	พอลิไซคลิก				
		แอโรมาติก	ร้อยละโดยปริมาตร	ไม่สูงกว่า	(ไม่ได้กำหนด)	11
ไฮโดรคาร์บอน						
กำมะถัน		ส่วนในล้านส่วน	ไม่สูงกว่า	350	50	
ซีเทน/ดัชนีซีเทน		-	ไม่ต่ำกว่า	47	50	
กากถ่าน		ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.05	0.05	
จุดวาบไฟ		องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า	52	52	

2.2 ยางรถยนต์ (บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์, 2547)

ยางรถยนต์ประกอบด้วยยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ยางสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ เช่น ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน (Styrene-butadiene rubber, SBR) ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber, BR) ผงเขม่าดำ (Carbon black) สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agents) และสารเติมแต่งอื่น ๆ (Additives) รายละเอียดขององค์ประกอบต่าง ๆ ของยางรถยนต์แสดงดังนี้

2.2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber) (พงษ์ธร แซ่อู๋, 2547)

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) (รูปที่ 2.2 ก) เป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนล้วน ทำให้มีสมบัติไม่ทนน้ำมัน แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี นอกจากนี้โครงสร้างของยางธรรมชาติมีความสม่ำเสมอ ทำให้ยางสามารถเกิดผลึกภายใต้แรงดึงยืด (Strain-induced crystallization) การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวยังทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลที่ดี นั่นคือ ยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขีดถูสูงขึ้น ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูง อยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก ทำให้ยางแข็งเกินที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จะต้องมีการบดยางก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิต

2.2.2 ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน (Styrene-butadiene rubber, SBR) (พงษ์ธร แซ่อู๋, 2547)

ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) หรือยางเอสบีอาร์ (รูปที่ 2.2 ข) เกิดจากการโคพอลิเมอไรเซชันระหว่างมอนอเมอร์สองชนิด คือ สไตรีนและบิวทาไดอีนแบบอิมัลชัน (emulsion polymerization) ยางเอสบีอาร์ถือว่าเป็นยางสังเคราะห์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีราคาไม่แพง สามารถแปรรูปได้ง่ายจึงทำให้ประหยัดต้นทุนวัตถุดิบและแรงงานการผลิต

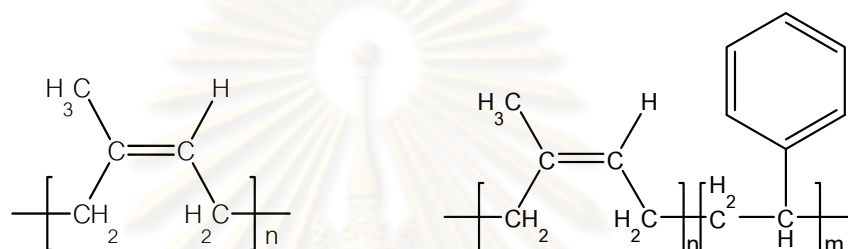
ยางเอสบีอาร์มีข้อด้อยในด้านการเหนียวติด จึงจำเป็นต้องใช้สารเพิ่มความเหนียวติดในการทำผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ยางรถยนต์ ความยืดหยุ่นจะขึ้นอยู่กับปริมาณ สไตรีนในโครงสร้าง โดยถ้าปริมาณสไตรีนสูงขึ้น ทำให้ยางมีความยืดหยุ่นลดลง ความทนต่อแรงดึง และทนต่อการฉีกขาดได้ต่ำกว่ายางธรรมชาติ แต่ถ้าเติมสารเสริมแรงก็จะได้สมบัติดีเท่ายางธรรมชาติ และยางชนิดนี้มีความเป็นฉนวนสูง และมีการกระเดื่องตัวต่ำกว่ายางธรรมชาติ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งานในช่วง 50 -100 °ซ

2.2.3 ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber, BR) (พงษ์ธร แซ่อู๋, 2547)

ยางบิวทาไดอีนเป็นพอลิเมอร์ของบิวทาไดอีนมีการจัดเรียงโมเลกุลหลายแบบ เช่น cis-1,4 (รูปที่ 2.2 ค) แบบ tran-1,4 (รูปที่ 2.2 ง) หรือแบบ vinyl-1,2 (รูปที่ 2.2 จ) ขึ้นอยู่กับชนิด

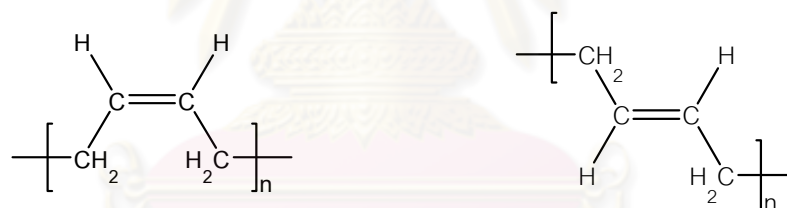
ของตัวริเริ่มที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยทั่วไปยางบิวทาไดอีนทางการค้ามีน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยประมาณ 250,000 ถึง 300,000

ยางบิวทาไดอีนมักใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความต้านทานต่อการขีดถูสูงหรือมีสมบัติการกระด้างกระตอนที่ดีหรือใช้ในกรณีที่ต้องการใช้ยางที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ โดยมักจะนำไปผสมกับยางชนิดอื่น ๆ ในสัดส่วนที่ต่ำกว่าร้อยละ 50 (ส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 10-25) ซึ่งร้อยละ 90 ของยางบิวทาไดอีน ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยางล้อโดยเฉพาะส่วนที่เป็นดอกยาง (ยางเรเดียลจำเป็นต้องใช้ยางบิวทาไดอีนในสัดส่วนที่มากกว่ายางไบแอส เนื่องจากยางเรเดียลต้องการดอกยางที่มีความต้านทานต่อการขีดถูสูงกว่ายางไบแอส)



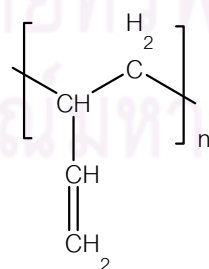
ก) ยางธรรมชาติ

ข) ยางสไตรีนบิวทาไดอีน



ค) ยางซิส-1,4-บิวทาไดอีน

ง) ยางทรานส์-1,4-บิวทาไดอีน

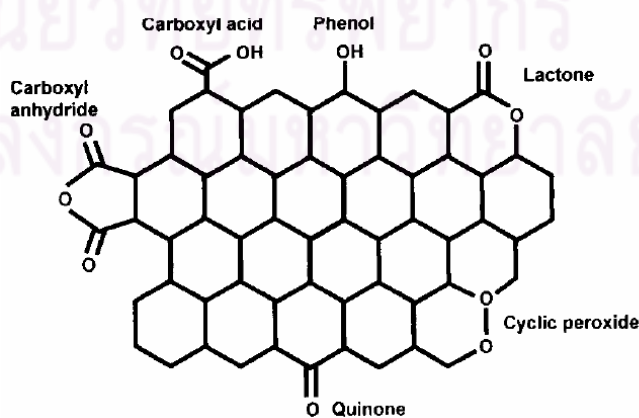


จ) ยางไวนิล-1,2-บิวทาไดอีน

รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของยางต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตยางล้อรถยนต์

2.2.4 ผงเขม่าดำ (Carbon black)

ผงเขม่าดำใช้เป็นสารเสริมแรงในยาง และมีสมบัติในการนำไฟฟ้า ผงเขม่าดำที่ใช้ในทางการค้ามีพื้นที่ผิว (surface area) และความพรุน (porosity) อยู่ในช่วงกว้าง เริ่มจากไม่มีรูพรุนจนถึงรูพรุนรวมตัวกันอยู่มากสูงถึง 1500 ตารางเมตรต่อกรัม ผงเขม่าดำถูกนำมาใช้ศึกษาอย่างกว้างขวางเนื่องจากโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิว และลำดับของโครงสร้างสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงกว้างโดยการปรับปรุง (simple treatment) สมบัติพื้นฐานให้ดีขึ้น ปัญหาสำคัญสำหรับการนำผงเขม่าดำมาใช้เชิงอุตสาหกรรมสำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ผงเขม่าดำมีอนุภาคขนาดเล็กซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางจากประมาณ 8 ถึง 500 นาโนเมตร แต่สามารถเตรียมให้อยู่ในรูปแบบของเม็ดเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและอยู่ในรูปของสารประกอบคาร์บอน/คาร์บอนให้เป็นวัสดุคาร์บอนที่น่าสนใจ คาร์บอนเป็นวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Catalysts) มาเป็นระยะเวลายาวนาน เนื่องจากวัสดุคาร์บอนสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยตรงและยังสามารถทำหน้าที่เป็นตัวรองรับ (support) ที่เหมาะสมได้อีกด้วย (Rodriguez, 1995 และ Radovic และคณะ, 1997) โดยลักษณะโครงสร้างของผงเขม่าดำแสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนที่พื้นผิวผงเขม่าดำ ได้แก่ หมู่ฟีนอล (Phenol) ไฮโดรควิโนน (Hydroquinone) ควิโนน (Quinone) คาร์บอกซิลิก (Carboxylic) และแลกโตน (Lactone) (Boehm, 1994) เป็นต้น หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การกระตุ้นปฏิกิริยาเคมี ความสามารถในการทำให้เปียก (Wettability) การเร่งปฏิกิริยา (Catalytic) สมบัติเชิงไฟฟ้า (Electrical properties) รวมถึงความสามารถในการดูดซับ (Adsorbability) (Mark, 2004) นอกจากนี้ผงเขม่าดำยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้วโดยปราศจากออกซิเจนอีกด้วย



รูปที่ 2.3 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของผงเขม่าดำ (Rodriguez-Reinoso และคณะ, 1998)

2.2.5 สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agents) (เสาวรจณ์ ช้วยจุลจิตรี, 2539)

การวัลคาไนซ์ยางทำให้ยางอยู่ในสภาพที่คงตัว และสามารถรักษารูปทรงไว้ได้ทั้งในลักษณะยืดหยุ่น หรือแข็งกระด้าง โดยการใช้สารวัลคาไนซ์ทำให้เกิดการเชื่อมขวางโมเลกุล ณ ตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา สารวัลคาไนซ์ที่สำคัญของยางธรรมชาติได้แก่ กำมะถัน เปอร์ออกไซด์ และออกไซด์ของโลหะ แต่สารที่นิยมใช้มากที่สุดได้แก่ กำมะถัน เนื่องจากมีราคาถูกละลายได้ดีในยาง โดยที่ปริมาณกำมะถันที่ใช้อยู่ในช่วง 1 – 3 ส่วนในยาง 100 ส่วน (part per hundred of rubber, phr) แต่โดยทั่วไปไม่เกิน 2.5 phr และที่สำคัญที่สุด คือ ยางส่วนมากเป็นยางที่ไม่อิมตัว มีพันธะคู่ เช่น ยางธรรมชาติ ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน ยางบิวทาไดอีน ส่วนยางสังเคราะห์อื่น ๆ อาจใช้สารวัลคาไนซ์แตกต่างกันตามชนิดของยาง การวัลคาไนซ์ยางทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสำคัญ 4 ประการ คือ

1. ยางเปลี่ยนโครงสร้างจากแบบเชิงเส้นเป็นแบบร่างแห โดยทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลและ ยางจะเปลี่ยนจากสภาพอีลาสติกเป็นสภาพพลาสติกที่มีความแข็งแรงมากขึ้น
2. ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์หลาย ๆ ชนิด
3. ทำให้สมบัติเชิงกลเช่น ความทนแรงดึง ความต้านทานการขีดถู และความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้น
4. ทำให้ยางมีความต้านทานความร้อน และแสงเพิ่มขึ้น สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น

การเชื่อมขวางทำให้โมเลกุลของยางมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นการหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนหรือการแข็งตัวเมื่อได้รับความเย็นจึงเกิดได้ยาก รวมทั้งการละลายในตัวทำละลายก็เป็นไปได้ยาก มีเพียงการบวมตัวเท่านั้น การเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้นทำให้สมบัติ เช่นความทนแรงดึง ความแข็งแรง มอดูลัส การยืดจนขาด และการกระดอนของยางเปลี่ยนไป นอกจากนี้ถ้าต้องการให้ยางมีค่ามอดูลัสต่ำ เช่น ลูกโป่ง การเชื่อมขวางทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น

ยางรถยนต์ประกอบด้วยสารวัลคาไนซ์ที่สำคัญ คือ กำมะถัน ซึ่งเป็นองค์ประกอบอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของยางรถยนต์ดังนี้ ส่วนของหน้ายาง (Tread) เป็นพื้นที่ส่วนเดียวของยางรถยนต์ที่สัมผัสผิวถนนขณะใช้งานมีปริมาณกำมะถันอยู่ 2.5 phr ส่วนของแก้มยาง (Sidewall) ทำหน้าที่ปกป้องด้านข้างของโครงยางจากการกระแทกหรือเสียดสีกับพื้นถนนมีปริมาณกำมะถันอยู่ 2.8 phr และส่วนของไลเนอร์ (Inner Liner) เป็นตัวป้องกันการรั่วซึมของลมยางภายในมีปริมาณกำมะถันอยู่ 2.0 phr เป็นต้น (Jame และคณะ, 1994 และ Alliger และคณะ, 1963)

2.2.6 สารเติมแต่งอื่น ๆ (Additives)

สารเติมแต่งอื่น ๆ ในกระบวนการผลิตยางรถยนต์ ได้แก่

- น้ำมัน (Oil) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปิโตรเลียม ช่วยลดต้นทุนการผลิต และช่วยผสมสารเติมแต่งอื่น ๆ ให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกับยางได้ดีขึ้น
- พลาสติไซเซอร์ หรือสารทำให้นิ่ม (Plasticizers or softeners) เป็นสารที่ใส่เข้าไปในยางเพื่อช่วยให้สามารถผสมยางกับสารเคมีได้ง่ายขึ้น เพิ่มความยืดหยุ่น และช่วยให้ยางติดกันได้ง่าย
- สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Ageing resistors) เช่น สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidants) สารแอนติโอโซนแนนท์ (Antiozonants) และสารอื่น ๆ ที่ช่วยป้องกันยางจากการเสื่อมสภาพในขณะที่ใช้งานหรือตั้งทิ้งไว้โดยมีออกซิเจน โอโซน แสง และความร้อนเป็นตัวเร่งให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น
- เส้นใย และเหล็ก (Fiber and steel) มีส่วนช่วยเสริมแรงให้กับยางรถยนต์

2.3 การใช้ประโยชน์จากยางรถยนต์ใช้แล้ว (ศิริรัตน์ จิตการคำ, 2548 และ พรพรรณ นิธิอุทัย, 2528)

1. การนำกลับมาใช้ใหม่ (Reusing) เป็นการนำยางรถยนต์มาแปรสภาพเป็นของใช้ต่าง ๆ เช่น แก้ว กระดาษต้นไม้ ถังขยะ เป็นมาตรการหนึ่งในการนำยางกลับมาใช้ใหม่ แต่ของใช้เหล่านี้ก็กลับกลายเป็นขยะในที่สุด
2. การหล่อตอกยางใหม่ (Retreating) เป็นการนำยางรถยนต์ที่ใช้งานเป็นระยะทางไม่เกิน 20,000 – 40,000 ไมล์ มาหล่อตอกยางใหม่ โดยส่วนนอกสุดที่หุ้มยางรถยนต์ต้องอยู่ในสภาพดี
3. ดาวน์ไซคลิง (Downcycling) เป็นการนำยางรถยนต์มาลดขนาดและใช้เป็นสารเติมแต่ง เช่น ผสมในยางมะตอย หรือการผลิตยางใหม่
4. ยางรีเคลม (Reclaimed rubber) เป็นการทำให้ยางเกิดการดีวัลคาไนเซชัน (Devulcanization) มากที่สุด แต่ต้องทำให้สายโซ่โมเลกุลภายในยางเกิดการแตกสลาย (Depolymerization) น้อยที่สุดเพื่อให้ยางมีสมบัติเหมือนยางใหม่ทั่วไป วิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการแตกพันธะเชื่อมโยงของยาง ได้แก่ การปรับแต่งทางเคมี การสลายโมเลกุลด้วยความร้อน (Thermal breakdown) การสลายโมเลกุลด้วยเทคนิคทางชีวภาพ (Biological breakdown) ดีวัลคาไนเซชันเชิงกล (Mechanical

devulcanization) และการใช้คลื่นอัลตราโซนิกและไมโครเวฟ (Ultrasonic and microwave) โดยการทำให้ยางกลับคืนสู่สถานะพลาสติกต้องทำลายพันธะเชื่อมขวางในยาง แต่เนื่องจากค่าพลังงานพันธะระหว่าง C-C C-S และ S-S มีค่าใกล้เคียงกันคือ 370 310 และ 270 กิโลจูล/โมลตามลำดับ (Fukumori และคณะ, 2003) ทำให้ทุกพันธะในยางมีโอกาสแตกออกจากกันได้ในช่วงกระบวนการผลิตยางรีเคลม ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดร่วมกัน คือ การแตกออกของพันธะเชื่อมขวาง (Devulcanization) และการแตกออกของสายโซ่โมเลกุลของยาง (Depolymerization) ซึ่งการที่โครงสร้างโมเลกุลของยางถูกทำลายนี้เองส่งผลให้ยางรีเคลมมีสมบัติเชิงกลด้อยกว่ายางใหม่

5. การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง (Tire derived fuel, TDF) เนื่องจากยางรถยนต์มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 60 เมื่อเกิดการเผาไหม้สามารถให้พลังงานความร้อนประมาณ 13,000–15,000 บีทียู/ปอนด์ ซึ่งมีค่าสูงเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น เช่น ถ่านหิน และไม้ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ยางรถยนต์มีค่าพลังงานความร้อนสูงจึงถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตยางใหม่ อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ และกระดาษ แต่การใช้ยางรถยนต์เป็นพลังงานโดยการเผาไหม้โดยตรงเป็นวิธีการที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมากเพราะทำให้เกิดสารพิษขึ้น ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 พลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ (Mackillop และคณะ, 2002)

ประเภทเชื้อเพลิง	พลังงาน (บีทียู/ปอนด์)
ปิโตรเลียมโค้ก (Petroleum coke)	14,000
ไม้ (Wood)	4,400
ถ่านหินบิทูมัส (Bituminous coal)	13,000
ถ่านหินลิกไนต์ (Lignite coal)	7,000
ยางรถยนต์	13,000 - 15,000

2.4 สมบัติไดอิเล็กทริก (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช , 2551)

สมบัติทางฉนวนไฟฟ้าที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือ มีประจุไฟฟ้าอิสระเพียงเล็กน้อยเป็นตัวพาเมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกประจุที่มีอยู่น้อยมากนั้นจะผ่านเข้าไปยังเนื้อของวัสดุ และประจุไฟฟ้าที่เป็นบวกและลบที่อยู่ภายในโมเลกุลหรืออะตอมของไดอิเล็กทริกนั้นเกิดการเคลื่อนที่ ไดโพลจำเป็นอย่างยิ่งที่ประจุต้องเท่ากันและประจุที่ตรงกันข้ามต้องแยกออกจากกันโดยมีระยะทางที่มีขอบเขตจำกัด ตัวอย่างของสเตอริโอเคมีสทรี (Steriochemistry) ของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของน้ำ ทำให้โมเลกุลที่มีขั้วของน้ำเกิดการเคลื่อนที่ น้ำจัดอยู่ในกรณีของโมเลกุลที่ไม่สมมาตร ไดโพลอาจจะเป็นสมบัติที่เฉพาะของไดอิเล็กทริกหรืออาจจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดเป็นไดอิเล็กทริก อิเล็กตรอนที่มีอยู่ในโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (non-polar molecules) หรืออะตอมมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อสัมผัสกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกสามารถที่จะเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าที่เป็นบวกและลบให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างชั่วคราว การเคลื่อนที่นี้ทำให้เกิดการเสียดสีภายในไดอิเล็กทริกและพลังงานที่หายไปจะเปลี่ยนไปเป็นความร้อน

ผลของการเกิดอันตรกิริยาของวัสดุไดอิเล็กทริกกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงของไมโครเวฟ คือ วัสดุดูดกลืนพลังงานคลื่นไมโครเวฟ ความสามารถของวัสดุที่จะดูดกลืนพลังงานขณะที่อยู่ภายในควาวิตี้ของเครื่องไมโครเวฟ (microwave cavity) จะสูญเสียไปเมื่อสัมผัสกับวัสดุ ขึ้นอยู่กับเวลาของการกลับคืนสู่ความสมดุล (relaxation times) ของโมเลกุลในวัสดุ ซึ่งในการเปลี่ยนทิศทางการขึ้นขึ้นอยู่กับธรรมชาติของหมู่ฟังก์ชันและปริมาตรของโมเลกุล โดยทั่วไปสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ปริมาณความชื้น ความหนาแน่น และรูปทรงเรขาคณิตของวัสดุ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุบางชนิด แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุชนิดต่าง ๆ

ประเภทวัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก	อ้างอิง
พอลิเอทิลีน (Polyethylene)	2.26	-	Tamara และคณะ, 2007
พอลิสไตรีน (Polystyrene)	2.56	-	Tamara และคณะ, 2007
ผงเขม่าดำ (Carbon black)	2.50-3.00	-	www.asiinstr.com
ยาง (rubber)	4.00	0.14	รัชดา ไสภาคะยัง 2548
ผงยางรถยนต์ (Tire)	2.49	0.10	

2.5 ไมโครเวฟ (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช , 2551)

2.5 หลักการของการทำความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ย่านความถี่ไดอิเล็กทริก คือ 1 ถึง 100 เมกะเฮิรตซ์ และย่านความถี่ไมโครเวฟ คือ 300 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 300 กิกะเฮิรตซ์

2.5.1 กลไกการเกิดความร้อน (Heating mechanism)

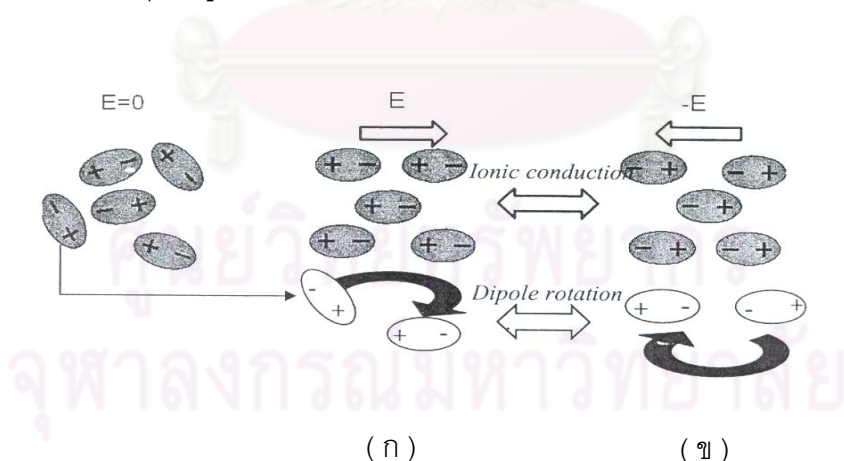
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งในช่วงย่านความถี่ไมโครเวฟและช่วงไดอิเล็กทริกไม่ใช่พลังงานความร้อนแต่คลื่นเหล่านี้สามารถแปลงเป็นความร้อนได้เมื่อเกิดอันตรกิริยากับวัสดุ (Lossy material) ซึ่งจะเห็นได้จากการเกิดความร้อนขึ้นภายในเนื้อวัสดุเองโดยมีหลายกลไกในการแปลงพลังงาน ซึ่งกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟอาศัยกลไกชนิดเหนี่ยวนำเชิงไอออน (Ionic conduction) และกลไกชนิดการหมุนของทั้งสองขั้ว (Dipolar rotation)

2.5.1.1 กลไกชนิดเหนี่ยวนำเชิงไอออน

กลไกนี้เริ่มขึ้นเมื่อประจุไอออนซึ่งเกิดการแตกตัวในสารละลายถูกเร่งด้วยแรงของสนามไฟฟ้าที่กระทำ เช่น สารละลายเกลือในน้ำซึ่งในสารละลายจะประกอบไปด้วยไอออนของโซเดียม (Na^+) คลอไรด์ (Cl^-) ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+ , H^+) และไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ซึ่งเคลื่อนที่โดยสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับประจุที่มีอยู่แต่ละไอออน การเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้ไอออนชนกับโมเลกุลของน้ำที่ยังไม่เกิดการแตกตัวเป็นไอออนอย่างต่อเนื่อง ส่งผลทำให้พลังงานจลน์เพิ่มขึ้น และเป็นเหตุให้ไอออนเกิดความเร่งและส่งผลเป็นลูกโซ่ต่อการชนของโมเลกุลอื่น ๆ คล้ายกับการชนของลูกบิลเลียด เมื่อค่าประจุเปลี่ยนแปลงไอออนจึงยังมีความเร่งเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม โดยเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดด้วยอัตราความถี่สูงนับล้านครั้งต่อวินาที ทำให้มีการชนและถ่ายเทพลังงานในระดับโมเลกุลอย่างมหาศาล ดังนั้นจึงมีขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงพลังงาน 2 ขั้นตอน คือ พลังงานของสนามไฟฟ้าถูกแปลงไปเป็นพลังงานจลน์โดยการเหนี่ยวนำแบบบังคับทิศทาง (Ordered kinetic energy) ซึ่งจะถูกเปลี่ยนกลับมาเป็นพลังงานจลน์โดยการเหนี่ยวนำแบบไร้ทิศทาง (Disordered kinetic energy) ณ จุดซึ่งมีการเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน และพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นด้วยกลไกนี้ก็จึงไม่ขึ้นอยู่กับระดับของอุณหภูมิหรือความถี่

2.5.1.2 กลไกชนิดการหมุนของทั้งสองขั้ว

สำหรับโมเลกุลหลาย ๆ ชนิด เช่น โมเลกุลน้ำซึ่งมีสมบัติเป็นสองขั้ว (Dipole) โดยธรรมชาติ หมายถึง โมเลกุลมีสมบัติของการกระจายประจุที่ไม่สมมาตรเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลาง ส่วนโมเลกุลของสสารชนิดอื่นก็จะเกิดความไม่สมมาตรได้หากเกิดการเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ทั้งนี้เพราะสนามไฟฟ้าทำให้เกิดหน่วยแรงค้ำภายในโมเลกุล โดยขั้วทั้งสองจะได้รับอิทธิพลจากกลไกดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงขั้วอย่างรวดเร็วตามสนามไฟฟ้าที่มากระทำดังแสดงในรูปที่ 2.4 เช่น คลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2,450 เมกะเฮิร์ต สามารถทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของขั้วประจุถึง 4,900 ล้านครั้งต่อหนึ่งรอบคลื่น แม้ว่าในตอนเริ่มต้น ประจุในโมเลกุลจะมีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบหรือแบบสุ่มก็จะได้รับผลให้มีการจัดเรียงประจุตามทิศทางหรือขั้วของสนามไฟฟ้าที่มากระทำ อย่างไรก็ตามเมื่อสนามที่มากระทำมีค่าลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ทำให้ขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้างดหายไปกลับมามีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบเช่นเดิม คือ การคลายสนาม (Relaxes) และเช่นกันเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นการสร้างหรือการจัดเรียง (Alignment) และการคลายสนามที่ความถี่หนึ่งจะเกิดขึ้นนับล้านครั้งในหนึ่งวินาทีซึ่งเป็นการแปลงพลังงานสนามไฟฟ้าไปเป็นศักย์เก็บไว้ในวัสดุแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์หรือพลังงานความร้อน นอกจากนั้นขนาดของโมเลกุลขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิในขณะที่มีการสร้างหรือการจัดเรียง



รูปที่ 2.4 อันตรกิริยาระหว่างวัสดุไดอิเล็กทริกและสนามไฟฟ้า (Electric Field) : (ก) การเรียงตัวของสภาพเชิงขั้วภายในวัสดุไดอิเล็กทริกเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า และ (ข) การเรียงตัวของสภาพเชิงขั้วเมื่อมีสนามไฟฟ้า (Ratanadecho, 2002)

การคลายสนามไฟฟ้าถูกนิยามเป็นความถี่ของการคลายสนาม (Relaxation frequency) โดยโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก เช่น น้ำและมอนอเมอร์มีค่าความถี่ของการคลายสนามมากกว่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ และมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นเหตุให้การเปลี่ยนพลังงานไปเป็นความร้อนได้ช้าลง ในทางตรงกันข้ามกับโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ เช่น พอลิเมอร์ มีค่าความถี่ของการคลายสนามน้อยกว่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ มีผลทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นได้ในบางสภาวะ ซึ่งนั่นก็คือมีการแปลงพลังงานไปเป็นความร้อนได้สูงและนำไปสู่การเกิดปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอะเวย์ (Thermal runaway) ในวัสดุได้ง่าย มีข้อสนับสนุนถึงความจริงอย่างหนึ่งที่ว่าของเหลว เช่น น้ำและมอนอเมอร์จะเป็นตัวดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดีกว่าพอลิเมอร์ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถนำไมโครเวฟไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบแห้ง หรือการบ่มวัสดุที่มีองค์ประกอบเป็นของเหลวและมอนอเมอร์ นอกจากนี้ไมโครเวฟยังสามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบแห้งอาหารหรือเวชภัณฑ์ที่ภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งได้เช่นกัน โดยปกติพลังงานที่เกิดจากการหมุนของทั้งสองข้ออาจเรียกเป็นอย่างอื่นได้หลายชื่อเช่น ค่าการกำเนิดความร้อนภายใน ค่าความร้อนที่ผลิตขึ้นภายใน (Internal heat generation) หรือค่ากำลังการดูดซับ (Microwave power absorbed) เป็นต้น

สำหรับค่าสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุนี้โดยทั่วไปแล้วแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวในกรณีของกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ (Microwave heating process) และกระบวนการหลอมละลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave melting process) และแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิและความชื้นในกรณีการอบแห้ง (Drying) ด้วยไมโครเวฟ (Microwave drying process)

2.5.2 อันตรกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุ

โดยปกติเราสามารถแบ่งประเภทของวัสดุที่มีอันตรกิริยากับคลื่นไมโครเวฟได้ 4 ชนิด คือ

- วัสดุตัวนำไฟฟ้า (Conductors) คือ วัสดุที่มีอิเล็กตรอนอิสระ (Free Electrons) เช่น โลหะซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคล้ายกับแสงซึ่งสะท้อนเมื่อกระทบกับกระจก โดยปกติวัสดุเหล่านี้ถูกใช้ออกแบบเป็นบริเวณกักเก็บคลื่นเพื่อควบคุมทิศทางการแพร่กระจายของคลื่น หรือเป็นผนังท่อนำคลื่นหรือแอฟพลิคเคเตอร์ หรือคาวิตี (Cavity)
- วัสดุฉนวนไฟฟ้า (Insulators) คือ วัสดุประเภทไม่มีสมบัติในการนำไฟฟ้า เช่น แก้ว เซรามิก และอากาศ โดยฉนวนนี้สามารถสะท้อนและดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ไปจนถึงส่งผ่านคลื่นได้ โดยปกติถูกใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มหรือตัวบรรจุวัสดุที่ต้องการทำให้ร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ฐานรองรับจานและวัสดุ

อื่นๆ วัสดุเหล่านี้ถูกพิจารณาเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกที่ไม่มีการสูญเสียของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใน (Non-lossy dielectrics)

- วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric) โดยวัสดุประเภทนี้มีสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวนไฟฟ้า และจัดอยู่ในประเภทของวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีการสูญเสียของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Lossy dielectrics) ดังนั้นวัสดุกลุ่มนี้จึงสามารถดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแปลงเป็นพลังงานความร้อนได้ ได้แก่ น้ำ น้ำมัน ไม้ และอาหารที่มีความชื้น เป็นต้น ในกรณีการเกิดความร้อนของน้ำภายในเตาไมโครเวฟที่ใช้ภายในครัวเรือน เนื่องจากโมเลกุลของน้ำซึ่งมีการกระจายตัวของประจุแบบไม่สมมาตรทำให้เกิดโพลาริเซชันแบบถาวรขึ้น เกิดกลับตัวไปมาตามความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ เช่น คลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 กิกกะเฮิร์ต มีการกลับไปกลับมาของขั้วประจุเป็นจำนวน 2,450 ล้านรอบต่อวินาทีในหนึ่งรอบคลื่นจะประกอบไปด้วยคลื่นช่วงบวกและคลื่นช่วงลบของสนามไฟฟ้า ดังนั้นโมเลกุลจะหันขั้วบวกไปทางขั้วลบของสนามไฟฟ้า 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที และหันขั้วลบไปทางขั้วบวกของสนามไฟฟ้าอีก 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที รวมแล้วมีการเปลี่ยนแปลงของขั้วประจุถึง 4,900 ล้านครั้งต่อวินาที ทำให้เกิดการชนและเสียดสีกันจนเกิดเป็นความร้อนภายในทำให้อุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นในที่สุด
- วัสดุที่มีองค์ประกอบของแม่เหล็ก (Magnetic Compounds) วัสดุประเภทนี้ เช่น แม่เหล็ก มีอันตรกิริยากับองค์ประกอบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือ สนามแม่เหล็กแปลงสภาพจนเกิดเป็นความร้อนอย่างรวดเร็ว เช่น วัสดุจำพวก ซิลิคอนคาร์ไบด์ เป็นต้น ดังนั้นวัสดุในกลุ่มนี้จึงมักถูกประยุกต์ใช้เป็นตัวกั้นหรือใช้ค (Shielding หรือ chocking devices) เพื่อป้องกันการรั่วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ โดยตัวมันทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับคลื่น

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช , 2551)

2.6.1. ค่าความชื้น

ค่าความชื้นอิสระในสสารมีผลอย่างมากต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) เนื่องจากน้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องประมาณ 78 เหตุนี้เมื่อมีปริมาณน้ำมากในสสารหรือวัสดุยอมทำให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยปกติจะเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน และเมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกหลายชนิดมาผสมกันจะเกิดพฤติกรรมที่มีความซับซ้อนและยากต่อการ

อธิบายได้ แต่อย่างไรก็ตามได้มีกฎหลัก (Rules of Thumb) สำหรับอธิบายปรากฏการณ์นี้ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ความชื้นสูงชันมีผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงชัน
- โดยปกติค่าไดอิเล็กทริกของส (Dielectric loss) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นเพิ่มขึ้น แต่อยู่ในช่วงความชื้นประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 แต่ก็เป็นไปได้ที่จะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มสูงชันไปมากกว่านี้ (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ)
- ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมอยู่ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแต่ละองค์ประกอบ

สำหรับวัสดุหลาย ๆ ประเภทซึ่งประกอบด้วยแอลกอฮอล์และตัวทำละลายอินทรีย์จะมีสมบัติไดอิเล็กทริกที่เหมาะสมสำหรับการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและไดอิเล็กทริก ดังนั้นจึงมีพฤติกรรมคล้ายกับน้ำ ดังแสดงค่าสมบัติตามประเภทวัสดุในการทำความร้อน ดังเช่นในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าสมบัติไดอิเล็กทริกตามประเภทวัสดุในการทำความร้อน (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

วัสดุที่สามารถทำความร้อนได้ดี	วัสดุที่สามารถทำความร้อนได้ต่ำ
น้ำ (Water)	ไฮโดรคาร์บอน
กรดแอนไฮไดรด์ (Acid Anhydrides)	ฮาโลเจน ไฮโดรคาร์บอน (Halogenated Hydrocarbons)
แอลกอฮอล์ (Alcohols)	อัลคาลิเฮไลด์ เช่น เกลือ (Alkali Halides, e.g., Salt)
แอนดิไฮด์ (Aldehydes)	ออกไซด์อนินทรีย์ เช่น อะลูมิเนียม
คีโตน (Ketones)	(Inorganic Oxides, e.g., Alumina)
เอไมด์ (Amides)	ธาตุบางชนิด เช่น ซัลเฟอร์
เอมีน (Amines)	(Some Elements, e.g., Sulfur)
ไซยาไนด์ (Cyanides)	โบรอนไนไตรด์ (Boron Nitride)
โปรตีน (Proteins)	ไมก้า (Mica)
เฟอร์ไรต์ (Ferrites)	
เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectrics)	
สารละลายไอออนิก (Ionic Solutions)	

ด้วยเหตุที่การอบแห้งเกี่ยวข้องกับกาไล่น้ำหรือสารละลายออกจากวัสดุ ดังนั้นถ้าน้ำหรือความชื้นถูกขับออกมาจะทำให้ไดอิเล็กทริกคอสแฟกเตอร์มีค่าลดลง โดยในหลาย ๆ กรณีที่น้ำถูกไล่ออก ทำให้การทำความร้อนของตัววัสดุมีขีดจำกัดและกลายเป็นวัสดุที่สามารถทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทะลุผ่านของตัววัสดุไปได้ที่ระดับความชื้นต่ำ

2.6.2 ความหนาแน่น

โดยปกติค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในวัสดุจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของวัสดุลดลง ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ลดลงตามไปด้วย

2.6.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในลักษณะที่ซับซ้อนโดยอาจมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตาม วัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและไดอิเล็กทริกคอสแฟกเตอร์ต่ำ และในช่วงที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็งจะไม่สามารถชี้ชัดได้ถึงแนวโน้มที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุที่ทั้งค่าความชื้นและอุณหภูมิมีความสำคัญต่อค่าสมบัติไดอิเล็กทริกและกระบวนการ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องเข้าใจถึงอันตรกิริยาของคลื่นและวัสดุไดอิเล็กทริกอย่างถ่องแท้ เช่น ไม้ที่มีค่าความชื้นระดับต่ำค่าหนึ่ง พบว่าค่าไดอิเล็กทริกคอสแฟกเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ จึงมีผลให้เกิดปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอะเวย์ (thermal runaway) ซึ่งเป็นสาเหตุให้ไม้เกิดการไหม้ได้หากถูกอบแห้งอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน

2.6.4 ความถี่

ความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำมีผลต่อค่าสมบัติไดอิเล็กทริกด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามด้วยเหตุที่กระบวนการทำความร้อนในงานอุตสาหกรรมถูกจำกัดด้วยความถี่ที่คงที่ อยู่แล้วตามมาตรฐาน ISM ทำให้วิศวกรถูกจำกัดการใช้งานในเรื่องของความถี่นี้

2.6.5 การนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้า คือ ความสามารถของวัสดุในการนำกระแสไฟฟ้า โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน โดยทั้งอิเล็กตรอนและไอออนสามารถเป็นผลกระทบหลักในการทำ ความ

ร้อนและการอบแห้งเนื่องจากผลของน้ำที่ถูกเคลื่อนย้ายออกสู่ภายนอกทำให้ความเข้มข้นของไอน้ำภายในสูงขึ้น

2.6.6 ค่าการนำความร้อน

ค่าการนำความร้อนมีบทบาทลดลงในกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กทริกเมื่อเทียบกับกระบวนการทำความร้อนด้วยวิธีแบบเก่า อันเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟส่งผลทำให้ความเร็วในการทำความร้อนมีค่าสูงกว่าจนค่าการนำความร้อนมีผลกระทบต่อระบบไม่มากนัก อย่างไรก็ตามมีบางกรณีที่ค่าการนำความร้อนมีบทบาทหลัก เช่น เมื่อความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับความลึกของวัสดุที่ต้องการทำความร้อนขึ้น ดังนั้นการนำความร้อนจึงเป็นตัวกำหนดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อวัสดุ ณ ตำแหน่งที่คลื่นทะลุเข้าไปไม่ถึง

2.6.7 ค่าความจุความร้อนจำเพาะ

โดยปกตินักวิจัยและวิศวกรหรือผู้ออกแบบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟและไดอิเล็กทริกจะตัดตัวแปรนี้ทิ้งไป และมุ่งพิจารณาที่ค่าสมบัติไดอิเล็กทริกเป็นสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามโดยความเป็นจริง ค่าความจุความร้อนจำเพาะเป็นตัวแปรสำคัญซึ่งเป็นสาเหตุให้วัสดุมีความร้อนเพิ่มขึ้นได้มากขึ้นตามธรรมชาติ ดังนั้นการพิจารณาทั้งค่าไดอิเล็กทริกและค่าความจุความร้อนจำเพาะจึงนับว่าเป็นสิ่งที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง

2.6.8 ค่าความลึกในการทะลุทะลวง

ปกติตัวแปรนี้มีการเรียกกันหลายชื่อ เช่น ความลึกในการทะลุทะลวง (Penetration depth) หรือความลึกเชิงกำลัง (Power penetration depth) เป็นต้น แต่ก็มี ความหมายทางกายภาพเดียวกัน แม้ว่าค่าความลึกในการทะลุทะลวงจะไม่ได้เป็นสมบัติของวัสดุแต่ก็ส่งผลต่อสมบัติหลาย ๆ อย่างของวัสดุ และค่านี้ยังมีความสำคัญมากที่สุดสำหรับกรณีวิเคราะห์เชิงลึกของกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ด้วยเหตุที่การทำความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นการทำความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heating) ดังนั้นความลึกในการทะลุทะลวงของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งหากคลื่นไม่สามารถทะลุทะลวงผ่านวัสดุไปได้ การทำความร้อนจะถูกจำกัดอยู่เพียงแค่นี้ผิวของวัสดุเท่านั้น

ตัวแปรที่มีผลต่อค่าความลึกของการทะลุทะลวงของสนาม คือ ความยาวคลื่น (Wavelength, λ) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant, ϵ') และค่าไดอิเล็กตริกสูญเสียแฟกเตอร์ (Dielectric loss factor) ดังแสดงในสภาวะความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$D_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon'}}{2\pi\epsilon''} \quad (2.1)$$

โดยที่ D_p คือ ระดับความลึกในแนวตั้งฉากกับผิวตกกระทบซึ่งแสดงความสามารถในการทะลุทะลวงได้ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจันระดับพลังงานของคลื่นลดลงเหลือ 37 % ($1/e$)

λ คือ ความยาวคลื่นในฟรีสเปซหรือที่ว่าง (Free space) (m)

จากสมการที่ (2.1) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า วัสดุที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูญเสียสูงจะมีค่าความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่นได้ต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูญเสียแฟกเตอร์ต่ำกว่า และยังพบว่าความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรืออีกนัยหนึ่งคือความถี่มีผลต่อความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่นด้วยเช่นกันดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความยาวคลื่นกับค่าความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่นที่ระดับความถี่ต่าง ๆ
(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช , 2551)

ความถี่ของคลื่น (MHz)	ความยาวคลื่น (เมตร)	ความลึกในการทะลุทะลวง (เมตร)
5.0	60.00	23.90
13.56	22.10	8.80
27.12	11.10	4.40
40.0	7.50	3.00
915	0.328	0.130
2450	0.122	0.049

สำหรับกรณีอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่าความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่นได้ คือ ขนาดของชิ้นที่ต้องการทำความร้อน โดยหากมิติของชิ้นงานมีขนาดที่ยาว (Semi-infinite) กว่าค่าความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่นหลาย ๆ เท่าก็จะทำให้ค่าความชันของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคล้ายกับวิธีการทำความร้อนแบบดั้งเดิมที่เป็นการให้ความร้อนที่ผิวชิ้นงาน โดยมีอุณหภูมิภายในชิ้นงานที่ต่ำกว่าที่ผิวภายนอก แต่อย่างไรก็ตามหากมิติของชิ้นงานมีขนาดที่สั้นหรือแคบเมื่อเทียบกับค่าความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่น ประมาณ 1 หรือ 2 เท่าก็จะทำให้เกิดการก่อดัวของคลื่นนิ่ง (Standing wave) หรือการเกิดเรโซแนนซ์อันเนื่องจากรวมตัวของคลื่นที่เดินหน้า (Forward wave) และคลื่นที่สะท้อน (Reflected wave) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุที่มีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกที่ต่างกัน ซึ่งในกรณีนี้บางครั้งทีบริเวณตรงกลางชิ้นงานจะเป็นบริเวณที่มีความร้อนสูงสุดจนเกิดการไหม้ได้ในขณะที่ผิวภายนอกยังคงเย็นตัวอยู่

2.7 ข้อได้เปรียบของระบบคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช , 2551)

การทำความร้อนและการอบแห้งด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟไดอิเล็กตริกมีความแตกต่างไปจากระบบดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่ โดยระบบดั้งเดิมที่ใช้จะเกิดความล่าช้าในการเคลื่อนที่ของความร้อนจากผิวของวัสดุเข้าสู่ภายในซึ่งถูกกำหนดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายนอกที่ร้อนกับภายในที่เย็นกว่า ในขณะที่การทำความร้อนและการอบแห้งด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกจะมีผลในเชิงการทำความร้อนทั่วถึงทั้งก้อน (Bulk heating) ซึ่งเกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุตลอดเนื้อวัสดุ โดยในทางทฤษฎีการทำความร้อนจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดและรวดเร็วแม้ว่าในทางปฏิบัติอาจจะไม่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเหมือนทางทฤษฎีก็ตาม อย่างไรก็ตามความเร็วของการทำความร้อนเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญประการหนึ่งสำหรับการออกแบบเชิงอุตสาหกรรมซึ่งมีความเป็นไปได้ในการใช้เวลาเพียงช่วงวินาทีหรือนาทีในบางกระบวนการผลิต ในขณะที่วิธีการดั้งเดิมใช้เวลาเป็นนานเป็นชั่วโมงหรือเป็นวันเพื่อให้กระบวนการดำเนินอย่างเสร็จสมบูรณ์ เช่น การให้ความร้อนพลาสติกบางชนิดสามารถทำได้ในอัตรา 30,000^oซต่อวินาที

ตัวแปรที่กำหนดความเร็วของการทำความร้อน ได้แก่ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ สมบัติไดอิเล็กตริก ลักษณะรูปร่าง ประสิทธิภาพของการเกิดคัปปลิงของคลื่นภายในภาควิตี (Coupling efficiency) พลังงานที่ถูกสร้างขึ้นภายในวัสดุ กำลังไมโครเวฟ และไดอิเล็กตริกที่ป้อนเข้าไปรวมถึงตัวแปรอื่นที่มีสมบัติเทียบเท่ากัน พบว่าความเร็วในการทำความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อกำลังที่ป้อนเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า



รูปที่ 2.5 การเกิดความร้อนภายในวัสดุด้วยพลังงานต่างๆ [Ratanadecho, 2002]

(ก) พลังงานไมโครเวฟ และ (ข) พลังงานแบบดั้งเดิม (ให้ความร้อนที่ผิว)

สรุปข้อได้เปรียบของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กทริก คือ

- ใช้เวลาน้อย ประหยัดเนื้อที่และแรงงาน ลดจำนวนวัสดุที่เสียเนื่องจากอุปกรณ์ทำงานส่วนใหญ่ไม่เคลื่อนที่
- การทะลุทะลวงของพลังงาน (Energy penetration) ของไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปกำเนิดพลังงานความร้อนภายในวัสดุทำให้มีความร้อนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อนวัสดุดังรูปที่ 2.5 ในขณะที่การให้ความร้อนแบบอื่นจะให้ความร้อนที่ผิววัสดุซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวด้านนอกเพราะมีอุณหภูมิสูงเกินไปในขณะที่ภายในเนื้อวัสดุยังได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการ นอกจากนี้ยังใช้เวลามากเพราะมีข้อจำกัดทางด้านความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจึงทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า
- ความสามารถในการเลือกที่จะซับพลังงานไมโครเวฟภายในวัสดุ (Selective energy absorption) วัสดุบางชนิดสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ทันที แต่วัสดุบางชนิดไม่สามารถดูดซับพลังงานได้

สมบัติเหล่านี้เป็นข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งของกระบวนการไมโครเวฟ เช่น สามารถให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุหีบห่อได้โดยไม่ทำลายหีบห่อนั้น

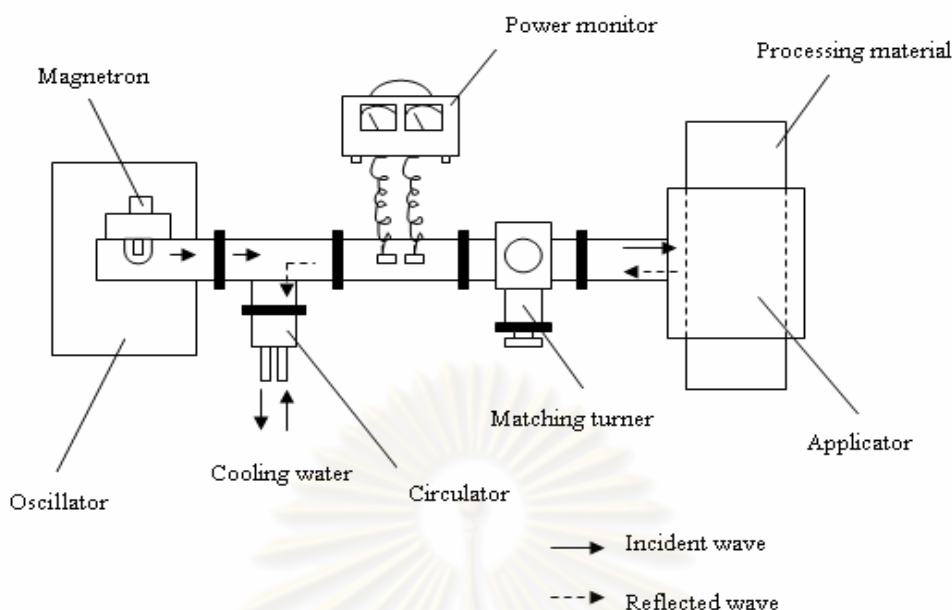
- การควบคุมระบบสามารถกระทำได้ดีและรวดเร็วกว่า โดยธรรมชาติของการปิดเปิดสามารถเปลี่ยนแปลงระดับการทำความร้อนอย่างทันทีทันใด เพียงแค่ทำการควบคุมพลังงานในช่วงขาออกของแหล่งกำเนิดทำให้ระบบมีประสิทธิภาพและมีความแน่นอนในการควบคุมการทำความร้อนของอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเก่า เช่น เตาอบลมร้อนหรือไฟฟ้า ต้องใช้เวลามากในการปรับอุณหภูมิ แต่เตา

ไมโครเวฟสามารถปรับอุณหภูมิด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้เวลาน้อยมาก (ภายในเสี้ยววินาที)

- ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้นเมื่อเทียบกับระบบการทำความร้อนแบบดั้งเดิม เนื่องจากที่ระดับความร้อนที่สูงจะไม่เกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุ เหมือนที่เกิดขึ้นกับระบบการทำความร้อนแบบดั้งเดิม
- สามารถทำให้เกิดผลกระทบทางกายภาพและเคมีเท่าที่ต้องการได้ โดยปกติปฏิกิริยาทางเคมีและกายภาพจะถูกร่งให้เกิดขึ้นจากความร้อนที่สร้างด้วยวิธีนี้ ซึ่งได้แก่ ปฏิกิริยาการพองตัว (Puffing) การอบแห้ง (Drying) การหลอมละลาย (Melting) การทำให้โปรตีนเปลี่ยนแปลงสภาพไป (Protein denaturation) การที่แป้งเกิดเจลลิตาในเซชัน (Starch gelatinization) หรือ ปฏิกิริยาอื่นๆ ที่คล้ายกัน
- มีประสิทธิภาพสูง โดยการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟใช้พลังงานน้อยกว่าการทำ ความร้อนแบบเก่ามากเมื่อเทียบกับการเกิดปริมาณความร้อนภายในวัสดุที่เท่ากัน (การทำความร้อนแบบเก่ามีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 10 -30 % ในขณะที่การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 60 - 70 %) โดยในการทำความร้อนด้วยวิธีนี้ พลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกแปลงโดยตรงเพื่อทำให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้น โดยไม่เกิดการสูญเสียไปกับอากาศผนังของเตา สายพานลำเลียง หรือส่วนอื่น ๆ ของระบบ อันจะนำสู่การประหยัดพลังงาน
- ไมโครเวฟเป็นกระบวนการสะอาด (Clean processing) กระบวนการทาง ไมโครเวฟไม่สร้างมลภาวะต่างจากกระบวนการให้ความร้อนแบบอื่นที่ใช้ เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ทำให้มีก๊าซไอเสียออกมาด้วย

2.8 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Miles และคณะ, 2002)

การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กทริกมีกลไกเช่นเดียวกันแต่มีวิธีการในการที่ทำให้บรรลุเป้าหมายแตกต่างกัน โดยพื้นฐานของระบบเหล่านี้จะประกอบด้วย แหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูงหรือเจนเนอเรเตอร์ และใช้ท่อนำคลื่น (Waveguide) ไปยังชิ้นงาน (Load) ที่อยู่ในแอปพลิเคเตอ์ (Applicator) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในลักษณะต่าง ๆ (Miles และคณะ, 2002)

จากรูปที่ 2.6 แมกนีตรอน (Magnetron) ที่ติดตั้งบนท่อนำคลื่นทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟหรือสร้างพลังงานไมโครเวฟ ไมโครเวฟจะเคลื่อนที่ผ่านท่อนำคลื่นไปยังวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการที่อยู่ภายในควาวิตี้ หรือ แอปพลิเคชันเตอร์ เมื่อพลังงานไมโครเวฟเข้าสู่วัสดุแล้ว ส่วนที่นอกเหนือจากการดูดซับ (Absorbed Wave) โดยตัววัสดุ จะมีบางส่วนที่ทะลุผ่าน (Transmitted wave) วัสดุและจะมีบางส่วนที่สะท้อนกลับ (Reflected wave) ไป ซึ่งอัตราพลังงานไมโครเวฟที่สะท้อนกลับขึ้นอยู่กับค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ และลักษณะประจำตัวของวัสดุเอง คลื่นสะท้อนที่เกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟขณะชนกับวัสดุ อาจทำให้ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเสียหายได้ (โดยเฉพาะระบบที่ใช้ไมโครเวฟกำลังสูง) ดังนั้นโดยทั่วไประบบไมโครเวฟจะติดตั้งตัวดักคลื่น หรือ เซอร์คิวเลเตอร์ (Circulator) (อุปกรณ์ทำให้คลื่นไมโครเวฟเดินได้ทางเดียว) ระหว่างตัวกำเนิดคลื่นและท่อนำคลื่นเพื่อป้องกันการเสียหายดังกล่าว นอกจากนั้นยังติดตั้งอุปกรณ์ปรับแต่งคลื่นเพื่อที่จะลดพลังงานสะท้อนกลับนี้ โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Matching tuner มาติดตั้งระหว่างท่อนำคลื่นและบริเวณทำความร้อน อุปกรณ์ตัวนี้ทำหน้าที่ปรับให้คลื่นไมโครเวฟมีการดูดซับในตัววัสดุได้ดีขึ้นโดยที่การสะท้อนของคลื่นที่ผิววัสดุลดลง ส่งผลทำให้ระบบไมโครเวฟทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดอีกด้วยรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละตัวภายในระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ พร้อมหลักการทำงานเบื้องต้นแสดงได้ดังนี้

2.8.1 แหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูงหรือเจนเนอเรเตอร์ (Generator)

แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟหรือเจนเนอเรเตอร์ (Generator) ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟกระแสตรงและตัวแมกนีตรอน หรือไคลสตรอน (Klystron) โดยตัวแมกนีตรอน เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดอันหนึ่งในระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ แมกนีตรอนเป็นหลอดสร้างคลื่นไมโครเวฟจากการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (DC energy) ภายใต้แรงดันไฟฟ้าสูง ๆ ที่ Magnetron anode โดยมีประสิทธิภาพประมาณ 70 - 90% ภายในแมกนีตรอนประกอบด้วยไส้หลอด (Filament) โดยแคโทด (Cathode) ซึ่งเป็นขั้วใดขั้วหนึ่งของไส้หลอด (ทำจากขดลวดทังสเตน) ถูกบรรจุอยู่ในช่องสุญญากาศซึ่งส่วนของผนังรอบ ๆ จะทำหน้าที่เป็นขั้วแอนโนด (Anode) คลื่นไมโครเวฟที่ถูกกำเนิดขึ้นจะถูกส่งออกมาภายนอกโดย Antenna ในการทำงานของแมกนีตรอนนั้น แมกนีตรอนจะถูกจ่ายด้วยไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำประมาณ 3-4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ที่ไส้หลอด ซึ่งจะทำให้ไส้หลอดร้อนและปล่อยอิเล็กตรอนออกมา และเมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงไปที่ขั้วใดขั้วหนึ่งของไส้หลอดซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทดเทียบกับขั้วแอนโนด ก็จะทำให้อิเล็กตรอนถูกบังคับให้เคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถาวร และเมื่อความต่างศักย์มีค่าสูงจนถึงค่าหนึ่งก็จะทำให้แมกนีตรอนสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้

โดยที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะถูกกำหนดด้วยโครงสร้างภายในช่องสุญญากาศระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วแอนโนด ซึ่งทำให้มีความเหมาะสมที่ทำให้แมกนีตรอนสามารถกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต โดยทั่วไปแมกนีตรอนแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ แมกนีตรอนที่ทำงานเป็นจังหวะหรือพัลส์ (Pulsed magnetron) ซึ่งประยุกต์ใช้ในงานเรดาร์ และแมกนีตรอนที่ทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous - Wave (CW) magnetron) ซึ่งใช้ับกระบวนการทางความร้อน เช่น เตาไมโครเวฟตามบ้าน และกระบวนการทางอุตสาหกรรม

อายุการใช้งานของแมกนีตรอนขึ้นอยู่กับปริมาณของคลื่นที่สะท้อนกลับ และยังขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ อีก ได้แก่

- การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ส่งไป
- อุณหภูมิ ปริมาณ และคุณภาพของน้ำหล่อเย็น
- อัตราการไหลและอุณหภูมิของอากาศหล่อเย็น
- สภาพของการติดตั้ง เช่น การสั้น อุณหภูมิบรรยากาศ ฯลฯ
- ขั้นตอนการติดตั้งแมกนีตรอน
- ขั้นตอนการใช้งาน

จากการประมาณอายุการใช้งานของแมกนีตรอน โดยบริษัท Micro Denshi ประเทศญี่ปุ่น ทำการวัดจากแมกนีตรอน จำนวน 523 ตัว พบว่าอายุการใช้งานที่น้อยที่สุดที่พบ คือ 1,000 ชั่วโมง

หรือประมาณ 1 ปี ส่วนอายุเฉลี่ยของการใช้งานอยู่ที่ 6,400 ชั่วโมง และอายุการใช้งานสูงสุดที่พบคือ 10,000 ชั่วโมง

2.8.2 อุปกรณ์ป้องกัน (Protective Devices)

อุปกรณ์ป้องกันหลาย ๆ อย่างได้ถูกนำมาใช้กับระบบไมโครเวฟเพื่อป้องกันการสะท้อนของพลังงานไมโครเวฟในระดับสูงที่อาจทำลายแมกนีตรอนหรือโครสตอน โดยมีวิธีอย่างง่ายคือ มีสวิตช์ความร้อนซึ่งเป็นหลอดที่มีความไวต่อการทำความร้อนที่สูงจนเกินไปและตัดพลังงานได้ แต่อย่างไรก็ตามด้วยหลอดที่ใช้เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการป้องกันจึงได้มีวิธีอื่นเพิ่มเติม คือ การใช้ตัวตรวจวัดพลังงานที่สามารถกำหนดทิศทางได้ซึ่งช่วยลดพลังงานในส่วนที่กำลังเคลื่อนที่ไปข้างหน้ากับที่สะท้อนกลับและสามารถปิดระบบได้เมื่อพลังงานการสะท้อนมีค่ามากจนเกินไป โดยระบบที่มีความซับซ้อนจะมีเซอร์คูเลเตอร์ (Circulator) เป็นอุปกรณ์ที่เป็นแม่เหล็กถาวร ตั้งอยู่บนท่อนำคลื่น ติดตั้งอยู่ระหว่างเจนเนอเรเตอร์และแอฟลิเคเตอร์ ตัวมันทำหน้าที่ส่งผ่านคลื่นที่สะท้อนกลับจากแอฟลิเคเตอร์เข้าไปในโหลดหลอก (Dummy load) เช่น โหลดจำพวกน้ำ หรือวัสดุอื่น ๆ (การติดตั้งระบบน้ำเข้าร่วมกับระบบเซอร์คูเลเตอร์ที่สมบูรณ์แล้วบางที่เรียกระบบนี้ว่า ไอโซเลเตอร์ (Isolator) หรือ ไอโซ – เซอร์คูเลเตอร์ (Iso – Circulator) ซึ่งเป็นการช่วยปกป้องแมกนีตรอนจากคลื่นที่สะท้อนกลับ และช่วยยืดอายุการใช้งานของแมกนีตรอนออกไป จึงนับได้ว่าระบบนี้มีประสิทธิภาพสูงโดยเฉพาะมีการแนะนำให้ประยุกต์ใช้กับระบบที่มีกำลังระดับสูง

2.8.3 อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณคลื่นที่สะท้อนกลับ (Reflection monitor)

เป็นเครื่องที่ใช้ตรวจวัดปริมาณคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากแอฟลิเคเตอร์เนื่องจากวัสดุไม่ได้ดูดซับเอาไว้

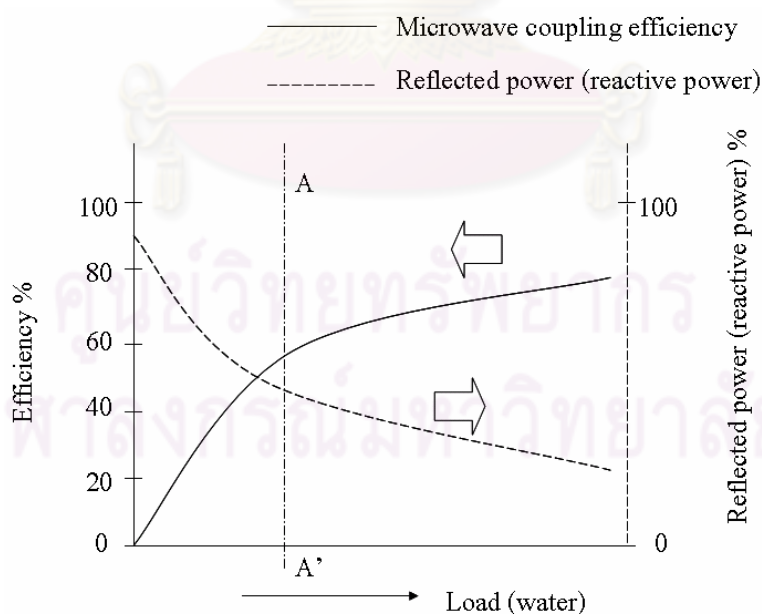
2.8.4 อุปกรณ์ปรับค่าคลื่น (Matching tuner)

อุปกรณ์นี้อาศัยการปรับค่าตัวต้านทานเพื่อปรับค่าคลื่นไมโครเวฟจากเจนเนอเรเตอร์ให้เหมาะสมกับวัสดุที่จะให้ความร้อน ซึ่งต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์วัดกำลังคลื่น (Power monitor) เป็นตัวช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพ และช่วยเรื่องการปกป้องและความปลอดภัยของตัวเจนเนอเรเตอร์ ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของน้ำและประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 2.7 ผลจากการปรับค่าทำ

ให้อายุการใช้งานของแมกนีตรอนยาวนานขึ้นเนื่องจากสามารถช่วยลดการสะท้อนกลับของคลื่นตามทีกล่าวมาข้างต้น

2.8.5 แอพพลิเคเตอร์

แอพพลิเคเตอร์ หรือควิตี้ เป็นส่วนที่มีไว้สำหรับทำความร้อนของกระบวนการโดยได้รับพลังงานไมโครเวฟมาจากเจนเนอเรเตอร์หรือแมกนีตรอน โดยปกติการจ่ายพลังงานไมโครเวฟไปยังโหลดหรือวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการมีความแตกต่างกันตามชนิดของกระบวนการและวัสดุ โดยพลังงานไมโครเวฟจะส่งผ่านผ่านที่ว่างและมีจุดรวมที่โหลด หลังจากการสร้างคลื่นในย่านความถี่ไมโครเวฟแล้ว คลื่นจะถูกส่งไปยังแอพพลิเคเตอร์ ด้วยใช้ท่อนำคลื่น แม้ว่าในบางครั้งสามารถใช้สายโคแอกเซียลได้แต่ก็เหมาะกับการส่งคลื่นในช่วงกำลังต่ำเท่านั้น โดยปกติท่อนำคลื่นจะเป็นท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้ากลวง ซึ่งอาจทำจากทองเหลืองหรืออะลูมิเนียมโดยที่ขนาดภายในนี้จะต้องใช้ความระมัดระวังในการออกแบบและเลือกใช้เพื่อที่จะสามารถควบคุมสมบัติของคลื่นไมโครเวฟตามที่ต้องการไปยังแอพพลิเคเตอร์ได้ แอพพลิเคเตอร์มีอยู่ด้วยกันหลายชนิดและสร้างจากวัสดุประเภทโลหะเสมอ



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของน้ำและค่าประสิทธิภาพ (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช , 2551)

โดยทั่วไปแอฟพลีเคเตอร์ถูกแบ่งประเภทตามชนิดคาวิตี และท่อนำคลื่น ดังนี้

- ชนิดคาวิตี (Cavity applicators)
 - คาวิตีชนิดทำงานเป็นกะ
 - คาวิตีชนิดทำงานแบบต่อเนื่อง
- ชนิดท่อนำคลื่น (Waveguide applicators)
 - ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม
 - ท่อนำคลื่นแบบวงกลม
 - ท่อนำคลื่นแบบคูโมงค์
 - ท่อนำคลื่นแบบหักโค้ง

โดยทั่วไปคาวิตีสามารถแบ่งออกได้สองประเภท คือ คาวิตีชนิดโหมดเดียว (Single-mode cavities) และคาวิตีชนิดมัลติโหมด (Multimode cavities) ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.8.5.1 คาวิตีชนิดโหมดเดียว (Single-Mode Cavities)

แอฟพลีเคเตอร์ที่มีลักษณะเรโซแนนซ์โหมดเดียว (Single resonant mode) หรือเรโซแนนซ์เดี่ยว (Single resonance) ทำงานใกล้เคียงกับความถี่ทำงาน ส่วนใหญ่แอฟพลีเคเตอร์ลักษณะนี้จะเป็นรูปทรงกระบอก (Cylindrical Applicators) หรือทรงสี่เหลี่ยม (Rectangular Applicators) ซึ่งลักษณะแอฟพลีเคเตอร์แบบนี้ง่ายต่อการควบคุมการกระจายตัวของคลื่นง่ายต่อการวิเคราะห์และออกแบบ แอฟพลีเคเตอร์ดังกล่าวมักใช้สำหรับกระบวนการทางอาหาร อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดอีกมาก ปริมาตรของโหลดหรืออาหารที่ค่าไดอิเล็กตริกใด ๆ จะต้องมีขนาดเล็ก ๆ เท่านั้น เพื่อที่ยังคงสภาพความเป็นคลื่นเรโซแนนซ์ภายในแอฟพลีเคเตอร์อยู่ได้

2.8.5.2 คาวิตีชนิดมัลติโหมด (Multimode Cavities)

ส่วนใหญ่ในกระบวนการให้ความร้อนแก่อาหารจะใช้คาวิตีชนิดเรโซแนนซ์มัลติโหมดยกตัวอย่างเช่น เตาอบไมโครเวฟบ้าน ซึ่งภายในแอฟพลีเคเตอร์มีโหลดติดตั้งอยู่ จะมีคลื่นไมโครเวฟซึ่งมาจากหลายระนาบและหลายทิศทางมาตกกระทบบนโหลดนี้ ผลรวมของคลื่นที่ตกกระทบบนร่วมกับคลื่นที่สะท้อนที่โหลดและผนังของแอฟพลีเคเตอร์ก่อให้เกิดคลื่นเรโซแนนซ์หรือมัลติโหมด ทำให้การกระจายของสนามมีความซับซ้อนมากขึ้น การวิเคราะห์และออกแบบโดยผ่านวิธีคำนวณแบบง่าย ๆ ไม่สามารถกระทำได้ จึงต้องอาศัยเทคนิคการคำนวณขั้นสูงและคอมพิวเตอร์สมัยใหม่เข้ามาช่วย นอกจากนี้ข้อสมมติฐานที่ว่ากำลังคลื่นไมโครเวฟที่ลดลงแบบ

เอกซ์โพเนนเชียลภายในวัสดุนั้น พบว่าไม่สามารถนำมาใช้ร่วมกับแอปพลิเคชันเรโซแนนท์ มัลติโหมด อย่างไรก็ตามค่าระยะความลึกเชิงผิวยังพอนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ หากว่าวัสดุนั้นมีขนาดมากกว่าค่าระยะความลึกเชิงผิว (Skin depth) มาก ๆ ไมโครเวฟจะไม่สามารถแทรกผ่านไปยังส่วนกลางของวัสดุได้ ในกรณีนี้ความร้อนจะแพร่กระจายจากบริเวณผิวสู่ตำแหน่งที่ลึกลงไปโดยโหมดของการนำเป็นสำคัญ แต่ถ้าวัสดุมีความหนาน้อยกว่าระยะความลึกเชิงผิวแล้ว ไมโครเวฟจะสามารถแทรกผ่านไปยังส่วนกลางของวัสดุได้ ทำให้ความร้อนกระจายตัวสม่ำเสมอมากขึ้น แต่การกระจายตัวของคลื่นและความร้อนที่แท้จริงยังคงขึ้นกับปัจจัยอื่นอีกมากมาย และมีหลายเหตุผลที่ทำให้ความร้อนกระจายตัวไม่สม่ำเสมอได้

2.9 อุปกรณ์อื่น ๆ (Other devices)

2.9.1 ระบบควบคุมการรั่วไหลและความปลอดภัย (Leakage and safety control systems)

ทั้งการลดการแทรกของคลื่นที่รบกวนในย่านความถี่คลื่นวิทยุให้อยู่ภายในข้อจำกัดที่ยอมรับได้และเพื่อความปลอดภัยของบุคคล ต้องมีการควบคุมปริมาณการรั่วของรังสีจากระบบการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นี้คือ ไช้ค (Chokes) หรือโพรงลดกำลัง (Attenuating tunnels) โดยติดตั้งไช้คที่บริเวณช่องเปิดของสายพานลำเลียง รอบประตู หรือหน้าต่าง รอยต่อ และบริเวณอื่นซึ่งมีลักษณะคล้ายกัน

2.9.2 ระบบควบคุม (Control Systems)

จากการที่กำลังในช่วงขาออกของระบบการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟหรือไดโอดเล็คทริกจะต้องถูกควบคุมด้วยพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นระบบควบคุมเฉพาะจะถูกออกแบบให้มีวงจรของการป้อนกลับเพื่อติดตามบางตัวแปรที่เกิดขึ้นขณะระบบมีการทำงานเช่น ความชื้น และสามารถควบคุมระบบกำลังขาออกโดยอัตโนมัติให้สัมพันธ์กับปริมาณความชื้นได้ดีและรวดเร็ว

2.10 กระบวนการไพโรไลซิส (Kohan และคณะ, 1979)

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal Degradation) ภายใต้ภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการผลิตเชื้อเพลิง

สังเคราะห์ปฏิกิริยา ไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งทางตรงจากการออกซิเดชันเพียงบางส่วน หรือจากปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ และทางอ้อม ซึ่งในปัจจุบันการสลายตัวทางความร้อนในภาวะที่มีออกซิเจนน้อย หรือในที่มีการถ่ายเทความร้อนให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรงจากการเผาไหม้บางส่วนของชาร์และแก๊ส เรียกได้ว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิส

2.10.1 การแบ่งประเภทของการไพโรไลซิส (อุบลรัตน์ ลิ้มประภาสิริกุล, 2547)

การไพโรไลซิสสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามอุณหภูมิที่ใช้ คือ

- ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature pyrolysis) ช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 800 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่มีรูพรุน มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูง ลักษณะของถ่านชาร์ค่อนข้างอ่อนและเปราะไร้ควัน เหมาะสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงทั่วไป และได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันทาร์ปริมาณสูง
- ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูง (High temperature pyrolysis) ช่วงอุณหภูมิมากกว่า 800 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่มีลักษณะแข็งและไม่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ถ่านชาร์นี้ใช้มากในกระบวนการถลุงเหล็ก กระบวนการไพโรไลซิสให้ผลิตภัณฑ์แก๊สปริมาณสูงมากและผลิตภัณฑ์น้ำมันทาร์ปริมาณต่ำ

การไพโรไลซิสสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามแหล่งกำเนิดความร้อน คือ

- ไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไป (Conventional pyrolysis) การเผาไหม้โดยตรงด้วยความร้อนและทางไฟฟ้า (Obemberger, 1998) ให้ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนมากที่สุดที่อุณหภูมิต่ำและเวลาการเกิดปฏิกิริยานาน (Iwasaki, 2003 และ Li และคณะ, 2004) ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำและอัตราการให้ความร้อนต่ำด้วย (Savova และคณะ, 2001) อาจเป็นไปได้ที่จะเรียกการไพโรไลซิสเป็นแฟลช (flash) หรือ ฟาส (fast) ไพโรไลซิสแทนได้ ภายใต้ภาวะที่อัตราการให้ความร้อนสูงมาก เวลาการเกิดปฏิกิริยาสั้น และอุณหภูมิที่ใช้ประมาณ 500 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมากที่สุด (Bridgwater และคณะ, 1999 Tsai และคณะ, 2006 และ Acikgoz และคณะ, 2004)
- ไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ (Microwave pyrolysis) ความร้อนจากไมโครเวฟเป็นทางเลือกอย่างหนึ่งสำหรับกระบวนการไพโรไลซิส เช่น ชีวมวล (Kriegerbrockett, 1994) ถ่านหิน (Monsef-Mirzai และคณะ, 1995) น้ำมันจากหิน (oil shales) (Ben และคณะ, 2000) และขยะอินทรีย์ต่าง ๆ (Holland, 1995) วัสดุเหล่านี้โดยทั่วไปแล้วมีสมบัติเป็นตัวกระตุ้น (receptor) พลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ไม่ดีนัก

จึงไม่สามารถได้รับพลังงานจากไมโครเวฟได้โดยตรงที่จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการไพโรไลซิสเหนี่ยวนำด้วยคลื่นไมโครเวฟอาจเป็นไปได้ถ้าวัสดุบีบผสมกับตัวกระตุ้นพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่มีประสิทธิภาพ เช่น คาร์บอน (Ben และคณะ, 2000 และ Holland, 1995) หรือ โลหะออกไซด์ (Monsef-Mirzai และคณะ, 1995)

- ไพโรไลซิสด้วยพลาสมา (Plasma pyrolysis) (Nema และคณะ, 2002) หลักการทำงานของพลาสมาคือของไหลนำไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากอะตอมซึ่งประกอบด้วยอนุภาคที่เป็นประจุและเป็นกลางทางไฟฟ้า อนุภาคที่เป็นประจุมีพลังงานจลน์สูงเมื่อไอออนในพลาสมาวมกันกับอิเล็กตรอนที่หลุดออก พลังงานจะถูกปล่อยออกมาในรูปของรังสีอัลตราไวโอเล็ตเกิดเป็นพลังงานจลน์ในรูปของความร้อนและสามารถใช้เพื่อการสลายตัวทางเคมีได้ การกระทำภายใต้อุณหภูมิสูงของประกายพลาสมา (plasma-arc) ในภาวะปราศจากออกซิเจนทำให้เกิดการสลายตัวของขยะอย่างสมบูรณ์กลายเป็นโมเลกุลอย่างง่าย พลาสมาที่ร้อนเหมาะสมอย่างมากสำหรับการปรับสภาพ (treatment) ขยะแข็ง และสามารถทำลายโมเลกุลที่เป็นพิษด้วยการสลายตัวทางความร้อน ข้อดีของการไพโรไลซิสด้วยพลาสมา คือ เกิดการลดปริมาตรของสารอินทรีย์มากกว่าร้อยละ 99 การไพโรไลซิสด้วยพลาสมาเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายให้นำมาใช้ในการปรับสภาพของขยะที่เป็นพิษ (Down to Earth, 1996) การไพโรไลซิสขยะด้วยพลาสมาทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีสิ่งตกค้างที่เป็นอันตรายเหลืออยู่

2.10.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส (ชูศักดิ์ โภคะนุทรานนท์, 2536)

- องค์ประกอบของสารตั้งต้น

สารตั้งต้นมีความสำคัญกับกระบวนการไพโรไลซิสเนื่องจากประเภทของสารแต่ละประเภทจะมีความสามารถในการสลายตัวและมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน หากสารตั้งต้นใดมีปริมาณสารระเหยสูงก็มีโอกาสที่จะสลายตัวให้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้สูง

- อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส

อุณหภูมิการสลายตัวของกระบวนการไพโรไลซิสนั้นมีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น อุณหภูมิการสลายตัวของยางรถยนต์ใช้แล้วจะแบ่งช่วงการสลายตัวเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ที่อุณหภูมิ 150-310 องศาเซลเซียสเป็น

การสลายตัวของสารเติมแต่งต่าง ๆ เช่น พลาสติกไซเซออร์ (Plasticizers) ซึ่งเป็นการสลายตัวอย่างช้า ๆ อุณหภูมิ 310-430 องศาเซลเซียสเป็นช่วงการสลายตัวของยางธรรมชาติ และช่วงสุดท้าย คือ อุณหภูมิ 350-490 องศาเซลเซียสเป็นช่วงการสลายตัวของยางสังเคราะห์

- อัตราการให้ความร้อน

อัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส แต่เดิมภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งได้โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยออกมาอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนต่ำจะถูกนิยามให้มีผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนดโดยทั่ว ๆ ไป อัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลต่างของอุณหภูมิมากกว่า $10^3 - 10^5$ องศาเซลเซียสต่อวินาที

2.11 กระบวนการไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้ว (Kohan และคณะ, 1979)

กระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วเป็นการสลายตัวทางความร้อนโดยปราศจากออกซิเจน การไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วเป็นกระบวนการช่วยเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ เช่น โอเลฟิน สมบัติทางเคมีและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

กระบวนการพื้นฐานโดยทั่วไปของการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้ว

- ยางรถยนต์ที่ตัดเป็นชิ้นแล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียสในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน
- ผลิตภัณฑ์ลำดับแรก คือ แก๊ส น้ำมัน และถ่านชาร์ แสดงดังตารางที่ 2.6
- น้ำมันและถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสนำไปผ่านกระบวนการเพื่อเข้าสู่การผลิตลำดับที่สองเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส
 - ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้นำไปปรับปรุงคุณภาพทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นซึ่งมีหลายเกรด
 - น้ำมันที่ไม่มีองค์ประกอบของกำมะถันทำให้เปลี่ยนแปลงเป็นผงเขม่าดำที่มีคุณภาพสูงโดยผ่านกระบวนการเผาไหม้ด้วยเตาเผา และทางเลือกอื่น ๆ คือน้ำมันสามารถนำไปแยกเพื่อเพิ่มมูลค่าทางเคมีในการเป็นการป้อนด้วยกระบวนการกลั่น

ตารางที่ 2.6 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้ว (Kaminsky และคณะ, 1992)

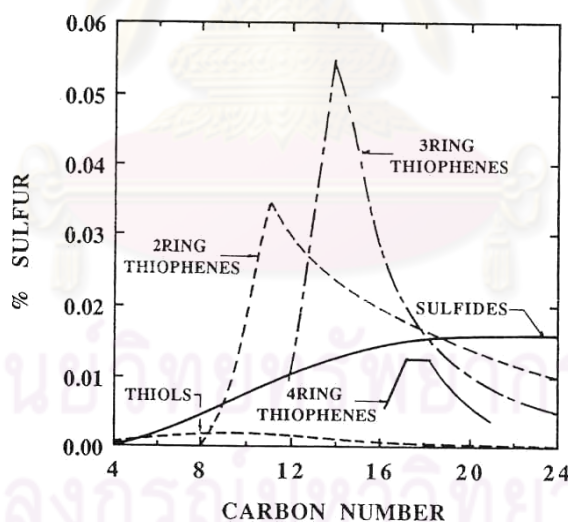
ผลิตภัณฑ์ ลำดับแรก	ร้อยละ โดย น้ำหนัก	ส่วนประกอบ	ผลิตภัณฑ์ ลำดับสอง
แก๊ส	10 – 30	แก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทน สารไฮโดรคาร์บอนอื่น และกำมะถันประมาณร้อยละ 1	-
น้ำมัน	38 - 55	แอมโรมาติกปริมาณมีมวลโมเลกุล 300 – 400 กำมะถันปริมาณต่ำ (ร้อยละ 0.3 – 1.0)	ผงเขม่าดำ
ถ่านชาร์	33 - 38	ถ่าน มากกว่าร้อยละ 15 (ซิงค์ออกไซด์) กำมะถันร้อยละ 3 - 5	ถ่านกัมมันต์

2.12 สารประกอบกำมะถัน (Sulfur compounds) ในน้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้ว (ปราโมทย์ ไทยเวช, 2548)

ปริมาณกำมะถันในน้ำมันดิบอาจจะมีได้ตั้งแต่ 0.04 ถึง 7.5% โดยน้ำหนักขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบ สำหรับน้ำมันดิบที่มีปริมาณกำมะถันสูง ปริมาณเนื้อกำมะถันที่วิเคราะห์ได้อาจดูไม่สูงมากนัก แต่จำนวนสารประกอบที่มีกำมะถันอยู่ด้วยจะมีปริมาณสูงมาก ตัวอย่างเช่น น้ำมันดิบที่มีเนื้อกำมะถันอยู่ 5% โดยน้ำหนัก อาจมีโมเลกุลของสารประกอบที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วยมากถึง 50% ของน้ำหนักทั้งหมด ที่มีอยู่ในน้ำมัน และมักปรากฏว่าน้ำมันที่มีความถ่วงจำเพาะสูงจะมีปริมาณกำมะถันสูงเช่นกัน แต่ก็ไม่แน่เสมอไป สารประกอบกำมะถันในน้ำมันดิบมักมีโครงสร้างยุ่งยากซึ่งจะสลายตัวเมื่อถูกความร้อน ให้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และสารอินทรีย์ที่มีกำมะถันอื่นซึ่งมีโครงสร้างง่ายกว่า (Organic sulfur compounds) สารประกอบกำมะถันในน้ำมันส่วนใหญ่มีจุดเดือดสูง และอยู่ในผลิตภัณฑ์หนัก เช่น ส่วนของน้ำมันดีเซล และน้ำมันเตา ในทางอุตสาหกรรมน้ำมัน แบ่งสารประกอบกำมะถันออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่มีฤทธิ์กัดกร่อน และประเภทที่ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน สารประกอบกำมะถันที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และเมอร์แคปแทน (Mercaptans) ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีจุดเดือด -62 องศาเซลเซียส และละลายอยู่ในผลิตภัณฑ์เบาที่กลั่นออกมา นอกจากจะเป็นกรดอ่อนแล้วยังมีพิษรุนแรงจึงจำเป็นต้องกำจัดออกจากผลิตภัณฑ์ ส่วน

สารประกอบพวกเมอร์แคปแทน ซึ่งมีสูตรทั่วไป R-S-R (R แทนหมู่อัลคิล) ยิ่งโมเลกุลมีขนาดเล็กยิ่งมีฤทธิ์การกัดกร่อนสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโลหะทองแดง เช่น เมทิลเมอร์แคปแทน ($\text{CH}_3\text{-S-H}$) เอทิลเมอร์แคปแทน ($\text{C}_2\text{H}_5\text{-S-H}$) สารทั้งสองนี้มีกลิ่นแรงมาก ส่วนสารประกอบกำมะถันที่ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน ได้แก่ สารประกอบเมอร์แคปแทนอื่น ๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ

สารประกอบกำมะถันในน้ำมันปิโตรเลียม มักพบในส่วนของน้ำมันปิโตรเลียมที่มีจุดเดือดสูงที่อุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียส สารประกอบกำมะถันที่พบเป็นสารประกอบกลุ่มซัลไฟด์ (Sulfide) ไดซัลไฟด์ (Disulfide) และไทออล (Thiols) เช่น ไทโอเฟน (Thiophene), เบนโซไทโอเฟน (Benzothiophene), ไดเบนโซไทโอเฟน (Dibenzothiophene) และอนุพันธ์ของสารประกอบกำมะถันที่เรียกว่า Refractory Sulfur Compounds (Toshiaki, 1999) จากรูปที่ 2.8 สารประกอบไทโอเฟนและอนุพันธ์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อจำนวนอะตอมของคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะสารประกอบที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 10 ถึง 16 อะตอมซึ่งอยู่ในช่วงของแก๊สออยล์ (Gas oil) จำนวนสารประกอบไทโอเฟนและอนุพันธ์ที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงปริมาณกำมะถันที่เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน ในขณะที่ปริมาณของไทออลและซัลไฟด์ไม่สูงมากนัก



รูปที่ 2.8 ชนิดสารประกอบกำมะถันที่แตกต่างกันตามจำนวนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นตามน้ำมันดิบชนิด Middle East (Toshiaki, 1999)

จากตารางที่ 2.7 ปริมาณกำมะถันในน้ำมันดิบอาจจะมีค่าสูงถึงร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะมีผลต่อการขจัดกำมะถันในผลิตภัณฑ์น้ำมัน เพราะปริมาณกำมะถันที่สูงหมายถึงต้นทุนในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้น


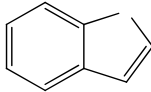
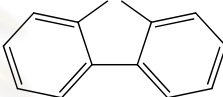
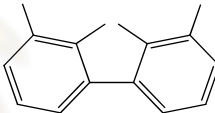
จากตารางที่ 2.8 สารประกอบกำมะถันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น ไทอัล และซัลไฟด์ มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ซึ่งง่ายต่อการกำจัดออกด้วยเทคนิคไฮโดรดีซัลไฟเอโรเซชัน แต่เมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นและโครงสร้างเป็นแบบวงแหวน เช่น ไทโอฟินและอนุพันธ์ การกำจัดกำมะถันออกด้วยเทคนิคไฮโดรดีซัลไฟเอโรเซชันกระทำได้ยากขึ้น เพราะความเกาะกะของหมู่เมทิลที่เกาะอยู่กับวงแหวนแอโรมาติกเป็นตัวขัดขวางการทำปฏิกิริยาโดยเฉพาะอย่างยิ่ง 4,6-ไดเมทิลไดเบนโซไทโอฟิน (4,6-Dimethyldibenzothiophene, 4,6-DMDMT) (Landau, 1997)

ยางรถยนต์โดยทั่วไปประกอบไปด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ร้อยละ 88 ซึ่งเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วและมีค่าความร้อนค่อนข้างสูง นอกจากนี้ยางรถยนต์ยังมีร้อยละของกำมะถันต่ำกว่าถ่านหิน ยางรถยนต์มีกำมะถันอยู่ในช่วงร้อยละ 1.24 – 1.5 โดยน้ำหนัก ส่วนถ่านหินมีกำมะถันอยู่ในช่วงร้อยละ 0.5 – 4.5 ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด (Michael, 2004)

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบพื้นฐานของน้ำมันดิบ (องค์พะงา ศรีวรรณ 2546)

ธาตุ	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
คาร์บอน	84-87
ไฮโดรเจน	11-14
กำมะถัน	0.3
ไนโตรเจน	0-0.6

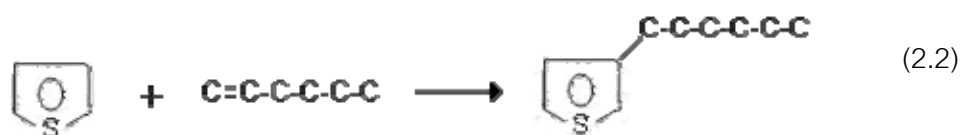
ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างสารประกอบกำมะถันที่พบในมิดเดิลดีสทิลเลต (Landau, 1997)

สารประกอบกำมะถัน	โครงสร้าง
Thiols	RSH
Sulfides	RSR
Thiophene	
Benzothiophene	
Dibenzothiophene	
4,6-Dimethyldibenzothiophene	

2.13 การกำจัดสารประกอบกำมะถันในน้ำมันเชื้อเพลิง

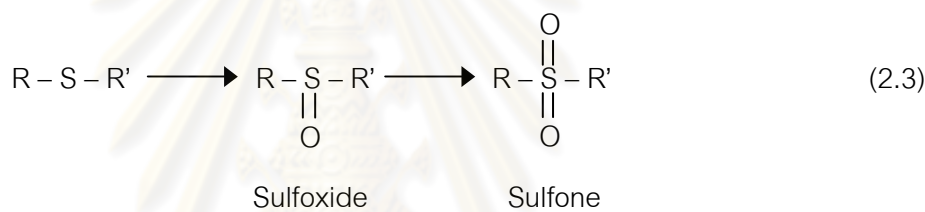
2.13.1 การกำจัดกำมะถัน (Desulfurization) (Babich และคณะ, 2003)

ก) การเลื่อนจุดเดือดด้วยอัลคิลเลชัน (Shifting the Boiling Point by Alkylation) อาศัยหลักการที่ว่า เมื่อสารประกอบอินทรีย์ของกำมะถันมีจุดเดือดสูงขึ้น ก็สามารถที่จะแยกองค์ประกอบที่เบาว่าออกไปได้ด้วยกระบวนการกลั่น เช่น การเกิดปฏิกิริยาอัลคิลเลชัน ของสารประกอบไทโอเฟนด้วยโอเลฟินจากไทโอเฟนที่มีจุดเดือด 85 องศาเซลเซียส เมื่อเปลี่ยนเป็นสารผลิตภัณฑ์ (3-Hexylthiophene) จะมีจุดเดือดสูงถึง 221 องศาเซลเซียส ดังสมการที่ 2.2



ข) การสกัดด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม (Solvent Extraction) อาศัยหลักการคือ สารประกอบอินทรีย์ ของกำมะถันสามารถละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสมได้ดีกว่า ไฮโดรเจน

ค) การขจัดกำมะถันโดยวิธีออกซิเดชันเฟอโรไซแอน (Oxydesulfurization) (เยาวนาฏ ยกรัตน์, 2544) เป็นกระบวนการที่จะต้องใช้ออกซิไดซ์ เพื่อเปลี่ยนอะตอมของกำมะถันในน้ำมันให้เป็นสารประเภท Sulfoxide หรือ Sulfone ซึ่งสารประเภท Sulfoxide หรือ Sulfone เป็นสารที่มีสภาพขั้ว (Polarity) สูงขึ้นกว่าเดิมดังสมการที่ 2.3 โดยปกติน้ำมันเป็นสารประเภทไม่มีขั้ว (Non-Polar) และสารกำมะถันประเภท Sulfoxide หรือ Sulfone มีจุดเดือดสูงขึ้นไปกว่าเดิม การเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารประกอบกำมะถันในน้ำมันให้ต่างจากสมบัติของน้ำมันทั่วไป ทำให้สามารถแยกสารประกอบกำมะถันจากน้ำมันได้ง่ายขึ้น เช่นการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้ตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น เมทานอล น้ำ หรืออื่น ๆ

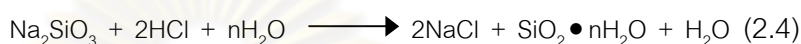


ง) การดูดซับบนตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง (Desulfurization by adsorption on solid sorbent) เนื่องจากการดูดซับเป็นการใช้ประโยชน์บนพื้นผิวของตัวดูดซับ การเลือกตัวดูดซับจำเป็นต้องพิจารณาถึงลักษณะ และสมบัติของตัวดูดซับแต่ละชนิดซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันดังนี้

- ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ได้จากการสลายตัวด้วยความร้อนของสารที่มีองค์ประกอบคาร์บอนต่าง ๆ เช่น ไม้ ขี้เลื่อย กะลามะพร้าว ถ่านหิน กระจุก เป็นต้น เพื่อให้ได้ถ่านที่ปราศจากสารระเหยง่าย จากนั้นกระตุ้นผิวด้วยสารเคมีที่เหมาะสม เช่น ไอน้ำ กรด แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ และอื่น ๆ เพื่อปรับผิวให้เหมาะกับการดูดซับ ถ่านกัมมันต์ใช้มากในการจับแก๊สต่าง ๆ ใช้ในการกำจัดสีของน้ำมัน และเป็นตัวกรองที่มีประสิทธิภาพสูง
- อะลูมินา (Alumina) ผลิตจากสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) ตามธรรมชาติ โดยการเผาไล่โมเลกุลของน้ำออกจากสารประกอบที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ เพื่อให้เกิด

ผลึกอะลูมินาซึ่งมีพื้นที่ผิวประมาณ 250 ตารางเมตรต่อกรัม หรืออาจเผาไล่น้ำที่อุณหภูมิ 400 – 800 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาสั้น ๆ เพื่อให้ได้อะลูมินาที่มีพื้นที่ผิวประมาณ 300 – 350 ตารางเมตรต่อกรัมและมีรูพรุนที่ใหญ่กว่า 50 อังสตรอม นอกจากนี้พื้นที่ผิวของอะลูมินา มีลักษณะเป็นขั้วสูง จึงเหมาะสำหรับการดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วเช่นไอน้ำ (Yang, 2003)

- ซิลิกาเจล (Silica Gel) เป็นสารประกอบที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารประกอบโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) กับกรดเกลือ (HCl) ดังสมการที่ 2.4



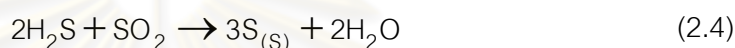
ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ผลึกซิลิกาเจล เมื่ออบให้แห้งจะได้ผลึกของซิลิกาเจล ลักษณะสมบัติของซิลิกาเจลขึ้นกับความเข้มข้นของซิลิกา อุณหภูมิ และความเป็นกรดต่างในกระบวนการผลิต พื้นที่ผิวของซิลิกาเจลมีความเป็นขั้ว จึงสามารถนำไปใช้ดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วได้ดี

- ซีโอไลต์ (Zeolite) (Seader และคณะ, 1998 และกฤติยา เลือสินาค, 2533) เป็นผลึกของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตของธาตุหมู่ที่ 1 หรือ 2 เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม โครงสร้างของผลึกซีโอไลต์ ประกอบด้วยทรงผลึกสี่หน้าของ SiO_4 และ AlO_4 ซึ่งแต่ละหน่วยจัดเรียงตัวต่อกันโดยการใช้ออกซิเจนร่วมกัน เกิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นวงของอะตอมออกซิเจน และต่อกันเป็นโครงสร้างที่เป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม และโครงสร้างดังกล่าวจะประกอบเข้ากันด้วยในลักษณะสามมิติเกิดเป็นโครงผลึกของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ โดยลักษณะโครงสร้างและขนาดรูพรุนจะมีผลต่อสมบัติการดูดซับของผลึกซีโอไลต์ ดังนั้นชนิดของซีโอไลต์จึงขึ้นกับสัดส่วนของอะตอมซิลิกอนต่ออะตอมอะลูมิเนียม ชนิดของไอออนและโลหะที่ใช้ดุลประจุของผลึก

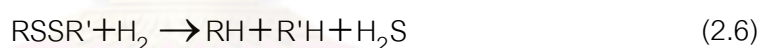
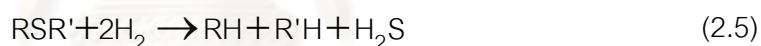
ในงานวิจัย Unapumnuk และคณะ (2008) ศึกษาอิทธิพลของอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิในการไพโรไลซิส 350 ถึง 1000 องศาเซลเซียส ในการกำจัดกำมะถันระหว่างการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยการดีซัลเฟอร์ไรเซชัน (desulfurization) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความสามารถในการกำจัดกำมะถันจากกระบวนการไพโรไลซิสมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยในช่วงอุณหภูมิ 350-400 องศาเซลเซียสที่อัตราการให้ความร้อน 1-10 องศาเซลเซียส/นาที่ และที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที่ สามารถกำจัดกำมะถันได้ถึงร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยาง คือ แก๊ส ของเหลว และ

2.13.2 ไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชัน (Hydrodesulfurization) (มณฑลปิโตรเลียมแห่งทวีปเอเชีย, 2535)

ไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชันเป็นกระบวนการกำจัดกำมะถันจากน้ำมันเชื้อเพลิงผ่านปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาในบรรยากาศไฮโดรเจน เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ข้อดีของกระบวนการนี้ คือ แก๊สไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากับกำมะถันได้ผลิตภัณฑ์ คือ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยตรงซึ่งสามารถกำจัดได้เกือบหมดโดยถูกแยกออกและเปลี่ยนเป็นธาตุกำมะถันด้วยกระบวนการ Claus process ซึ่งบางส่วนของไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกออกซิไดซ์ด้วยอากาศและทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เป็นกำมะถันดังสมการที่ 2.4

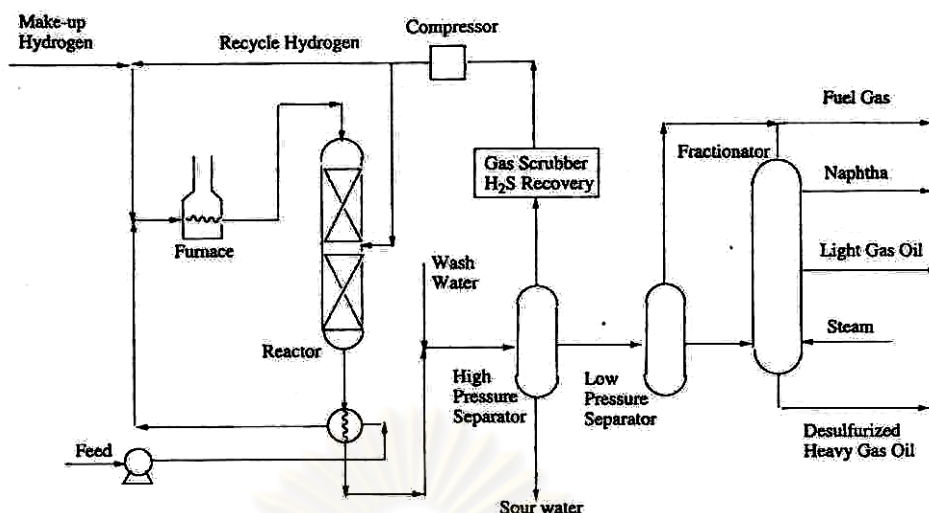


กำมะถันส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปไทอัล ซัลไฟด์ ไทโอพีน และอนุพันธ์ของไทโอพีนต่าง ๆ ได้แก่ เบนโซไทโอพีน ไดเบนโซไทโอพีน เมอร์แคปแทน และซัลไฟด์ ทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนเพื่อสร้างไฮโดรเจนซัลไฟด์และไฮโดรคาร์บอนดังสมการที่ 2.5 – 2.7



โดย R และ R' คือกลุ่มไฮโดรคาร์บอนต่างๆ

รูปที่ 2.10 แสดงหน่วยไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชันในโรงกลั่นน้ำมัน โดยสารป้อน (Feed) จะถูกส่งเข้าเตาเผาพร้อมกับแก๊สไฮโดรเจนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ จากนั้นของผสมทั้งสองจะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งภายในประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโคบอลต์-โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา (Co-Mo/Al₂O₃) หรือนิกเกิล-โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา (Ni-Mo/Al₂O₃) อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าประมาณ 350 – 370 องศาเซลเซียส ความดันประมาณ 50 บรรยากาศ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกแยกออกทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกส่งเข้าสู่กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ ก่อนที่เข้าสู่หน่วยกลั่นลำดับส่วนได้ผลิตภัณฑ์ออกมาตามจุดเดือดได้แก่ แก๊สเชื้อเพลิง แนฟทา แก๊สออยล์เบา และแก๊สออยล์หนักซึ่งมีปริมาณกำมะถันต่ำ



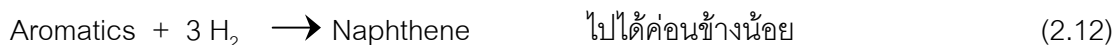
รูปที่ 2.10 แผนภาพของหน่วยไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน (Charles, 1991)

2.14 ตัวเร่งปฏิกิริยา และความไวต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน (ปราโมทย์ และ นุรักษ์, 2543)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันมีอยู่ 2 ประเภทคือ

- โคบอลต์ - โมลิบดีนัม (Co - Mo)
- นิกเกิล - โมลิบดีนัม (Ni - Mo)

โลหะโคบอลต์ นิกเกิล และโมลิบดีนัม เป็นตัวสำคัญ เพราะซัลไฟด์ ของโลหะเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงและให้ค่าการเลือกเกิด (Selectivity) ดี ในการเปลี่ยน S O และ N ที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารอินทรีย์ ให้ไปเป็น H₂S H₂O และ NH₃ ตามลำดับ นอกจากนั้นโอเลฟินที่มีอยู่ก็จะเปลี่ยนเป็นพาราฟินได้ แต่ปฏิกิริยากับแอมโรมาติกจะเกิดขึ้นน้อย โลหะเหล่านี้เคลือบอยู่บนผิวของอะลูมินาในรูปของออกไซด์ ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นซัลไฟด์ก่อนนำเข้าไปใช้งาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการดังสมการที่ 2.8 - 2.12



ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาอาจกล่าวรวม ๆ ได้เป็นขั้นตอน ดังนี้

1. โมเลกุลของน้ำมันที่มีกำมะถันและไฮโดรเจนที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ผ่านฟิล์มบางๆ ของของเหลวที่อยู่รอบ ๆ ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปถึงผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. โมเลกุลเหล่านั้นจะแพร่กระจาย (Diffuse) เข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา
3. เกิดการดูดซับของโมเลกุลเหล่านั้นบนตำแหน่งที่ว่องไว (Active Site)
4. เกิดปฏิกิริยาขึ้นที่ตำแหน่งที่ว่องไว
5. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกคาย (Desorb) ออกจากตำแหน่งที่ว่องไว
6. เกิดการแพร่กระจายของผลิตภัณฑ์ออกจากรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา
7. ผลิตภัณฑ์จะเดินทางผ่านฟิล์มของเหลวรอบ ๆ ตัวเร่งปฏิกิริยาออกมาในเนื้อน้ำมัน เพื่อออกจากเครื่องปฏิกรณ์ต่อไป

ทั้ง 7 ขั้นนี้ บางอย่างก็มีการเกิดต่อ ๆ กัน บางอย่างก็พร้อมกัน บางขั้นก็เร็ว บางขั้นก็ช้า โดยทั่วไปขั้นที่ 1 3 5 และ 7 จะเกิดการชนได้อย่างรวดเร็ว แต่ขั้นที่ 2 4 และ 6 เกิดขึ้นได้ช้า ขั้นที่ 1/2 และ 6/7 ต้องเกิดต่อเนื่องกัน แต่ขั้นที่ 2/3 และ 5/6 อาจเกิดพร้อมกันก็ได้ จะเห็นว่าอัตราเร็วของการกำจัดกำมะถันขึ้นอยู่กับการแพร่กระจายเข้าและออกจากรูพรุน และความเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา กล่าวคือขนาดและรูปร่างของเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา ความพรุน ตลอดจนขนาดของรูพรุนต้องสัมพันธ์กันอย่างดี ทางทฤษฎีอาจหาความสัมพันธ์ระหว่างความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยากับสมบัติอื่น ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ซึ่งจะช่วยบอกว่าควรเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างไรให้ได้ความว่องไวสูง

ตัวเร่งปฏิกิริยาทั่วไปมีลักษณะดังนี้

- 1) ขนาดและรูปร่าง (Size and Shape)
 - ทรงกลม (Extrudate spheres) 1.5 หรือ 3.0 มิลลิเมตร
 - เม็ด (Pellet) 3.0 มิลลิเมตร
- 2) ปริมาตรรูพรุนจำเพาะ (Specific pore volume) 0.50 – 0.60
- 3) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) 195 – 300 ตารางเมตรต่อกรัม
- 4) ความหนาแน่นรวมอัดแน่น (Compact Bulk Density) 0.59 – 0.74 ตันต่อลูกบาศก์เมตร
- 5) Bulk Crushing Strength 11.8–16.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- 6) ร้อยละโดยน้ำหนักของโคบอลต์หรือนิกเกิล 2.4 – 4.4
- ร้อยละโดยน้ำหนักของโมลิบดีนัม 7.7 – 10.0

โดยปกติถ้ามีโลหะอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยามาก ก็จะมี ความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูงตามไปด้วย

ตามทฤษฎีอาจหาความสัมพันธ์ระหว่างความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยากับสมบัติต่าง ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา กล่าวคือ Specific Surface Area (S) Average Pore Radius (r) (คือ สองเท่าของผลหาร Specific Pore Volume (V) ด้วย S หรือ $2V/S$) ขนาดของเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา ($2R$) Bulk Density (b) และปริมาณของโลหะ (M) ซึ่งในกรณีที่มีการแพร่กระจายของไฮโดรคาร์บอนเป็นตัวจำกัดความเร็วของปฏิกิริยา ได้ค่าความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นดังสมการที่ 2.13

$$k = \frac{3S \cdot b}{2R} \sqrt{r \cdot D \cdot k_s^0 \cdot f(M)} \quad (2.13)$$

เมื่อ k_s^0 เป็นค่าความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะมากที่สุดขึ้นอยู่กับประเภทของโลหะที่ใช้และความเข้มข้น ปกติโลหะจะเคลือบได้สูงสุด ถ้ามีปริมาณโลหะมากเกินไปความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะลดลงเพราะโลหะเริ่มไปอุดตามรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

$f(M)$ เป็นค่าที่ขึ้นกับปริมาณโลหะและอื่น ๆ เช่น วิธีการเคลือบโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยา เทคนิคการเตรียม และประเภทของตัวรองรับ (Support) ที่ใช้

ในการกำจัดกัมมะถัน สารป้อนตัวเดียวกัน (ค่า D คงที่) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดที่กำหนดให้ (R คงที่) และวิธีการเตรียม ปริมาณ และประเภทโลหะเหมือนเดิม ($f(M)$ คงที่) ค่าความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับ Surface Area ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา ($S \cdot b$) และกับ $\sqrt{\text{Pore Radius}}$ ดังนั้น Specific Surface Area (S) และ Pore Radius (r) ควรจะใหญ่ที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยสรุปตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีต้อง

- 1) เม็ดเล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยไม่ก่อให้เกิด ความดันลด (Pressure drop) ในเครื่องปฏิกรณ์สูงเกินไป และไม่ทำให้ Catalyst bed สกปรกเร็ว
- 2) ความพรุนของเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยาควรจะมีมากที่สุด โดยไม่ทำให้ความแข็งแรงของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำเกินไป
- 3) ขนาดของรูพรุน (Pore diameter) ไม่ควรจะเล็กกว่า 50 อังสตรอม เพราะโมเลกุลจะเคลื่อนไหวได้ยากในรูเล็ก
- 4) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) มากที่สุด ให้พอดีกับความต้องการในข้อ 2) และ 3)
- 5) ความหนาแน่นรวมอัดแน่น (Catalyst Bulk Density) สูงเท่าที่จะพอดีกับความต้องการในข้อ 2)
- 6) ปริมาณโลหะที่เคลือบลงไปควรมากที่สุดโดยไม่ไปอุดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยามากเกินไป

โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มากในอุตสาหกรรมสำหรับกระบวนการไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันเป็นการผสมของโลหะที่ว่องไวบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ซึ่งจำเป็นต้องทำให้เป็นซัลไฟด์ก่อนนำมาใช้งาน ดังนั้นโลหะซัลไฟด์จะว่องไวสำหรับกระบวนการไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน

งานวิจัยของ Gissy และคณะ (1980) ศึกษาขั้นตอนการทำงานของกระบวนการไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันของ ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา (Co-Mo/alumina) ทำการปรับปรุงสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการทำให้อยู่ในรูปซัลไฟด์ก่อนที่จะนำเบนโซไทโอเฟน (Benzothiophene) ละลายในนอร์มัล-โดเดเคน (n-dodecane) เพื่อใช้สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน และพบว่าการทำให้อยู่ในรูปของซัลไฟด์ก่อนด้วยไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) นั้นทำให้กระบวนการไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันมีความว่องไวมากกว่าการทำให้อยู่ในรูปของซัลไฟด์ด้วยไทโอเฟน (Thiophene) เนื่องจากเกิดการเกาะกันของสารตั้งต้น (Coke precursor) ซึ่งเกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรจีโนไลซิส (Hydrogenolysis) ของไทโอเฟน วิธีของการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในรูปของซัลไฟด์ ในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา (Ni-Mo/ Al_2O_3) มีความสำคัญมากกว่าในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา (Co-Mo/ Al_2O_3) ถ้าไม่ทำให้อยู่รูปของซัลไฟด์ก่อนนำไปใช้งาน นิกเกิลออกไซด์ (NiO) อาจจะถูกรีดิวซ์กลายเป็นโลหะนิกเกิล (Ni) ในเครื่องปฏิกรณ์ และยากต่อการเปลี่ยนไปเป็นซัลไฟด์ โลหะนิกเกิลอาจจะเป็นตัวการที่ไม่พึงประสงค์และอาจจะเป็นไปได้ที่จะเกิดการเกาะกันจนเป็นก้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเร็วกว่านิกเกิลซัลไฟด์

งานวิจัยของ Moon และ Ihm (1988) ศึกษาความว่องไวของตัวเร่งโมลิบดีนัมและโคบอลต์บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) หรือ อะลูมินา (Al_2O_3) ในกระบวนการไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันของไทโอเฟน และกระบวนการไฮโดรจีเนชันของเอทิลีน โดยใช้การดูดซับทางเคมีด้วยไนตริกออกไซด์ (NO chemisorption) และด้วยเทคนิคการคายซับตามการโปรแกรมอุณหภูมิ (Temperature. programmed desorption) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคาร์บอนเป็นตัวรองรับสำหรับกระบวนการไฮโดรจีเนชันและกระบวนการไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันมีความว่องไวมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอะลูมินาเป็นตัวรองรับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีปริมาณโลหะน้อย

งานวิจัยของ Farag และคณะ (1999) ศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความว่องไวในการเกิดกระบวนการไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน (Hydrodesulfurization, HDS) ของไดเบนโซไทโอเฟน (Dibenzothiophene, DBT) และ 4,6-ไดเมทิลไดเบนโซไทโอเฟน (4,6-dimethyldibenzothiophene, 4,6-DMDBT) บนตัวเร่งโคบอลต์โมลิบดีนัม-คาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้นและตัวเร่งโคบอลต์โมลิบดีนัม/อะลูมินาทางการค้า ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ sampling micro-autoclave ที่อุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส และที่บรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 2.9 เมกกะปาสกาล พบว่า ตัวเร่งโคบอลต์-โมลิบดีนัม/คาร์บอน มีความว่องไวต่อกระบวนการไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันสำหรับไดเบนโซไทโอเฟน

และน้ำมันดีเซล (Diesel fuel) มากกว่าตัวเร่งทางการค้าโคบอลต์-โมลิบดีนัม/อะลูมินา อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างส่วนมากในพฤติกรรมเกี่ยวกับการเร่งสังเกตเห็นได้สำหรับตัวเร่งโคบอลต์-โมลิบดีนัม/คาร์บอน ขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมและธรรมชาติของตัวรองรับคาร์บอน สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเตรียมด้วยวิธีฝังตัวแบบสมบูรณ์ (Complete impregnation) ด้วยการซัลไฟด์ ระหว่างการฝังตัว มีความว่องไวมากที่สุด การเลือกเกิดของกระบวนการไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันของไดเบนโซไทโอพีนในส่วนของดีซัลเฟอไรเซชัน (Desulfurization) และไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) พบว่าเกือบจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงในการเลือกเกิดกระบวนการไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันสำหรับ 4,6-ไดเมทิลไดเบนโซไทโอพีนตามอุณหภูมิไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenative route) มักเกิดที่อุณหภูมิต่ำ ขณะที่กระบวนการดีซัลเฟอไรเซชันโดยตรงจะเกิดที่อุณหภูมิสูง

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Monsef-Mirzai และคณะ (1995) ศึกษาการไพโรไลซิสถ่านหินด้วยไมโครเวฟ โดยมีคอปเปอร์ออกไซด์และเหล็กออกไซด์เป็นตัวกระตุ้นพลังงานไมโครเวฟผสมกับอนุภาคถ่านหิน ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจากอุณหภูมิห้องถึง 1200 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 3 นาที การไพโรไลซิสภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนส่งผลทำให้ได้ร้อยละผลได้ของทาร์สูงถึงร้อยละ 49 โดยน้ำหนัก (เมื่อใช้คอปเปอร์ออกไซด์) ร้อยละ 27 โดยน้ำหนัก (เมื่อใช้เหล็กออกไซด์) หรือร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (เมื่อใช้ถ่านโค้ก) ทาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟและด้วยความร้อนทั่วไปมีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าถ้าใช้ถ่านโค้กเป็นตัวกระตุ้นคลื่นไมโครเวฟทำให้ได้สัดส่วนของเอโรมาติกมากกว่าเมื่อใช้คอปเปอร์ออกไซด์และเหล็กออกไซด์ ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสถ่านหินด้วยไมโครเวฟสามารถนำมาใช้เป็นตัวกระตุ้นพลังงานคลื่นไมโครเวฟ ตัวกระตุ้นออกไซด์ช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

งานวิจัยของ El harfi และคณะ (2000) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของหินเชล (Oil shale) ภายใต้คลื่นไมโครเวฟ และกระบวนการไพโรไลซิสด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสพบว่า ในกระบวนการไพโรไลซิสภายใต้คลื่นไมโครเวฟ น้ำมันที่ได้มีจำนวน มีปริมาณซัลเฟอร์และไนโตรเจนน้อยกว่าน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสด้วยความร้อน ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสทั้งสองแบบมีค่าเท่ากัน คือ ร้อยละ 92 ที่กำลังของไมโครเวฟเท่ากับ 300 และ 400 วัตต์ และการไพโรไลซิสภายใต้คลื่นไมโครเวฟใช้เวลาน้อยกว่าการไพโรไลซิสด้วยความร้อน โดยการไพโรไลซิสภายใต้คลื่นไมโครเวฟใช้เวลา 40 นาที (300 วัตต์) 25 นาที (450 วัตต์) และ 8 นาที (600 วัตต์) ในขณะที่ไพโรไลซิสด้วยความร้อนใช้เวลา 60 นาที

งานวิจัยของ Ludlow-Palafox และคณะ (2001) ศึกษาการย่อยสลายพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-density polyethylene) และอะลูมิเนียมพอลิเมอร์ลามิเนต (Aluminum/polymer laminates) ได้แก่ หลอดยาสีฟัน (Toothpaste tube) ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้ไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 500 – 700 องศาเซลเซียส และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในด้านการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมัน/ไข (Oils/waxes) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ (Semibatch bench-scale apparatus) พบว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมัน/ไขที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสมากกว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการย่อยสลาย ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง เช่น อัลคีน (Alkene) อัลเคน (Alkane) และไดอัลคีน (Dialkene) ได้น้ำมันไขประมาณร้อยละ 81-93 ส่วนที่เหลือ คือ สารเชิงซ้อนผสมกันระหว่างสารอะลิฟาติกแบบวงและแบบกิ่งและสารเอโรมาติก แต่ไม่พบเป็นผลิตภัณฑ์

งานวิจัยของ Menendez และคณะ (2004) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนน้ำเสียด้วยไมโครเวฟในเตาอบไมโครเวฟชนิดมัลติโหมด ภายใต้บรรยากาศฮีเลียมที่อัตราการไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที คลื่นไมโครเวฟที่ใช้กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ ความถี่คลื่นไมโครเวฟ 2450 เมกะเฮิร์ต และการไพโรไลซิสด้วยเตาเผาไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศแก๊สฮีเลียมเช่นเดียวกับการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส 1000 องศาเซลเซียส โดยการวิเคราะห์สัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการ พบว่าการใช้พลังงานไมโครเวฟและตัวกระตุ้นพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมสามารถทำให้กากตะกอนน้ำเสียแบบเปียกสามารถไพโรไลซิสและได้ความชื้นได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ และพบว่าแคลเซียมออกไซด์มีบทบาทสำคัญในการเร่งปฏิกิริยาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการไพโรไลซิสทั้งสองวิธี พบว่าการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟสามารถผลิตผลิตภัณฑ์แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ในปริมาณที่น้อยกว่าการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปในเตาเผาไฟฟ้า แก๊สที่ผลิตได้จากการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟมีปริมาณแก๊สคาร์บอนนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนปริมาณสูง ขณะที่แก๊สที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปมีปริมาณสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำในปริมาณสูงกว่า และพบว่าจากการไพโรไลซิสจากทั้งสองวิธี ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีศักยภาพเป็นเชื้อเพลิง

งานวิจัยของ Miura และคณะ (2004) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของท่อนไม้ (Wood blocks) ภายใต้คลื่นไมโครเวฟโดยใช้เตาอบไมโครเวฟสองชนิดที่มีกำลัง 1.5 และ 3 กิโลวัตต์ และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากวิธีการให้ความร้อนทั้งสองแบบ พบว่าเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนทั่วไปแล้ว การให้ความร้อนภายใต้คลื่นไมโครเวฟกับไม้ซึ่งเป็นฉนวนความร้อน ทำให้แกนกลางของไม้เปลี่ยนเป็นสีดำ แสดงว่าอุณหภูมิตรงแกนกลางของไม้สูงกว่าบริเวณที่ผิว ด้วยเหตุนี้สารระเหยง่ายที่ผลิตได้จากแกนกลางของไม้สามารถแพร่ผ่านไปยังชั้นผิวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าได้ง่าย และช่วยป้องกันการเกิดสารระเหยง่ายที่ไม่ต้องการได้ซึ่งต่างจากกลไกการถ่ายโอนความร้อนด้วย

วิธีให้ความร้อนทั่วไป นอกจากนี้พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ที่ได้มีมากกว่า และผลจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในถ่านชาร์แสดงให้เห็นว่าการไพโรไลซิสด้วยคลื่นไมโครเวฟได้จำนวนคาร์บอนที่เกาะติดอยู่ภายในรูพรุนน้อยกว่าวิธีการให้ความร้อนทั่วไป สำหรับท่อนไม้ที่มีขนาดใหญ่กว่าสามารถไพโรไลซิสได้ด้วยกำลังของไดอิเล็กทริกต่อหน่วยของน้ำหนักที่น้อยกว่าท่อนไม้ขนาดเล็ก นอกจากนี้พบว่าได้ผลผลิตของน้ำมันทาร์ประมาณร้อยละ 15 – 30 โดยน้ำหนัก

งานวิจัยของ Bilali และคณะ (2005) ศึกษาการไพโรไลซิสหินฟอสเฟสจากโมร็อกโกด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่กำลังไฟฟ้า 400 650 720 และ 800 วัตต์ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการไหล 150 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าความร้อนของหินฟอสเฟสเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดอันตรกิริยาของสนามไมโครเวฟกับองค์ประกอบที่หลากหลายของหินฟอสเฟส สำหรับกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 400 วัตต์ ความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดรีแลคเซชันทางไดอิเล็กทริกของพันธะอิสระหรือพันธะที่อ่อนแอของโมเลกุลน้ำ แต่ไม่มีการสลายตัวของสารอินทรีย์และแร่ธาตุ ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถผลิตน้ำมันได้ สำหรับกำลังไฟฟ้าระหว่าง 400 ถึง 800 วัตต์ อุณหภูมิของหินฟอสเฟสปรากฏขึ้นเป็นสามช่วง ช่วงแรก ความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดรีแลคเซชันทางไดอิเล็กทริกของโมเลกุลน้ำ และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามการสลายตัวของสารอินทรีย์และแร่ธาตุ ช่วงที่สองอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการสูญเสียการเหนี่ยวนำ และการสูญเสียรีแลคเซชันทางไดอิเล็กทริกของผลิตภัณฑ์ที่เกิดการสลายตัว ช่วงที่สามอุณหภูมิลดลงเป็นผลจากการหายไปของการสูญเสียการเหนี่ยวนำและการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของผลิตภัณฑ์ที่เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์และแร่ธาตุ (โมเลกุลสารอินทรีย์และไอออน คาร์บอนेट ดิน ไพไรต์ เป็นต้น) และพบว่าที่กำลังไฟฟ้า 720 วัตต์ ผลิตน้ำมันได้มากที่สุดร้อยละ 0.45 โดยน้ำหนัก น้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟส่วนใหญ่ประกอบด้วยพาราฟิน เป็นผลเนื่องจากการแตกตัวของสายโซ่อัลคิลของสารประกอบแอโรมาติก แอโรมาติก ในน้ำมันมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งนำไปสู่การสลายตัวทางความร้อนของโมเลกุลคีโรซีนและเอสฟลาทีนภายในโมเลกุลแอโรมาติกซึ่งสามารถละลายในนอร์มัลแอลเคน

งานวิจัยของ Menendez และคณะ (2005) ศึกษาการไล่ความชื้น การไพโรไลซิส และการผลิตแก๊ส (Microwave-induced drying, pyrolysis and gasification: MWDPG) ของกากตะกอนน้ำเสีย (Sewage sludge) เหนี่ยวนำด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยศึกษาการทำให้ของแข็งส่วนที่เหลือเป็นแก้ว พบว่า MWDPG ของกากตะกอนน้ำเสียแบบเปียกที่อุณหภูมิสูงสามารถผลิตของแข็งที่มีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางได้ค่อนข้างน้อย ของแข็งเหล่านี้บางส่วนอาจเปลี่ยนเป็นแก้วถ้าอุณหภูมิระหว่างเกิดกระบวนการสูงอย่างเพียงพอ ลักษณะเฉพาะของของแข็งที่ได้จากไพโรไลซิสกากตะกอนโดยทั่วไปไม่ดีพอที่สำหรับปรับปรุงเป็นตัวดูดซับ (adsorbent) ได้แก่ การพัฒนาการของพื้นที่ผิวที่มีความพรุนต่ำ ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กต่ำ และพื้นที่ผิวน้อย การ

กระตุ้นถ่านชาร์ททางกายภาพไม่ได้ช่วยปรับปรุงสมบัติเฉพาะของของแข็งให้ดีขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบวิธีการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟและด้วยความร้อนทั่วไปในเตาเผาไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟมีประสิทธิภาพมาก (สามารถผลิตของแข็งที่มีองค์ประกอบของสารระเหยง่ายอยู่ในปริมาณน้อย) และปริมาณของของแข็งส่วนที่เหลือลดลง เมื่อเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของของแข็งที่ได้จาก MWDPG กับของแข็งที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไป พบว่า ถ่านชาร์ทที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟมีรูพรุนน้อยกว่าและทนต่อการแยกสารที่ละลายออกจากสารที่ไม่ละลายโดยการล้างด้วยตัวละลายที่เหมาะสม (lixiviation) ของสารอินทรีย์ และโลหะหนักมากกว่าถ่านชาร์ทที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไป

งานวิจัยของ Dominguez และคณะ (2005) ศึกษาการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของน้ำมันที่ผลิตจากการไพโรไลซิสจากตะกอนน้ำเสีย (Sewage sludge) ด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยใช้แกรไฟต์และถ่านชาร์เป็นตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ส่งผลให้อุณหภูมิสูงถึง 1000 องศาเซลเซียสภายในเวลาเพียง 2 ถึง 3 นาที องค์ประกอบของน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสเชิงคุณภาพไม่คำนึงถึงชนิดของตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ น้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟประกอบไปด้วยอะลิฟาติกและออกซิเจนมากกว่าน้ำมันที่ได้จากการให้ความร้อนทั่วไปที่อุณหภูมิเดียวกัน (1000 องศาเซลเซียส) และยังคงรักษาหมู่ฟังก์ชันบางส่วนของกากตะกอนเอาไว้ ในการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟการใช้แกรไฟต์แทนถ่านชาร์ชอบเกิดการแตกตัวของสายโซ่อะลิฟาติกขนาดใหญ่กลายเป็นชนิดที่เล็กกว่า ผลิตแอลคีนมากกว่านอร์มัลแอลเคน และช่วยเพิ่มสัดส่วนของมอนออะโรมาติก เตาอบไมโครเวฟแบบมัลติโหมดทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวและดีไฮโดรจิเนชันมากกว่าเตาอบแบบโหมดเดียว อย่างไรก็ตามการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงไม่เกิดขึ้นจึงส่งผลให้น้ำมันที่เกิดขึ้นมีความเสี่ยงต่อความเป็นพิษที่ต่ำ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาลำดับสองมีความสำคัญมากในการให้ความร้อนทั่วไป เนื่องจากนำไปสู่การเกิดพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนมากกว่า 6 วงแหวน

งานวิจัยของ Dominguez และคณะ (2006) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสจากตะกอนน้ำเสีย ด้วยคลื่นไมโครเวฟและเตาอบไฟฟ้าโดยใช้แกรไฟต์และถ่านชาร์เป็นตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ พบว่าได้ผลผลิตภัณฑ์แก๊สมากที่สุด ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงและเป็นแหล่งไฮโดรเจนหรือแก๊สสังเคราะห์ (ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์) ได้ กระบวนการไพโรไลซิสด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่สัดส่วนสูงกว่ากระบวนการไพโรไลซิสด้วยความร้อน แก๊สไฮโดรเจนมีค่ามากที่สุดถึงร้อยละ 38 และแก๊สผสมระหว่างไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่ามากที่สุดประมาณร้อยละ 66 ผลจากการวิเคราะห์น้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสด้วยคลื่นไมโครเวฟด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบอะลิฟาติกไฮโดรเจน (Aliphatic hydrogen) ร่วมกับเอสเทอร์ คาร์บอกซิลิก หรือหมู่เอไมด์ ส่วนน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วย

ความร้อนมีสัดส่วนของแอมโรมาติกไฮโดรเจนสูง และนอกจากนี้มีการตรวจสอบลักษณะน้ำมันที่ได้ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry) พบว่ากระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งให้ความร้อนเพื่อผลิตน้ำมันส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความเป็นพิษมากกว่าการไพโรไลซิสด้วยคลื่นไมโครเวฟที่สามารถช่วยป้องกันการเกิดหมู่ฟังก์ชันบางอย่าง เช่น อะลิฟาติกและสารที่ประกอบออกซิเจน และไม่พบสารประกอบพอลิไซคลิกของอะโรมาติก (Polycyclic of aromatic)

งานวิจัยของ Dominguez และคณะ (2007) ศึกษาการไพโรไลซิสเปลือกเมล็ดกาแฟด้วยความร้อนทั่วไปและเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟเพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจนสำหรับเป็นเชื้อเพลิง ที่อุณหภูมิ 500 800 และ 1000 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิของการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลงในทั้งสองระบบ เมื่อเปรียบเทียบการไพโรไลซิสเมล็ดกาแฟทั้งสองระบบ พบว่า ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์โค้กัลเคียงกัน ส่วนร้อยละผลได้ของน้ำมันจากการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปสูงกว่า แต่ร้อยละผลได้ของแก๊สต่ำกว่าการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ การไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไป เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 500-1000 องศาเซลเซียส ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจากร้อยละ 56.58 เป็นร้อยละ 32.08 ขณะที่แก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น แก๊สไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิ 500-800 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารไฮโดรคาร์บอน เช่น มีเทนและเอทิลีนลดลงขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส การไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ คือ แก๊สไฮโดรเจนที่ทุก ๆ อุณหภูมิ ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิระหว่าง 500-1000 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นร้อยละ 5 เท่านั้น ในขณะที่การไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 ความเข้มข้นทั้งหมดของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน (syngas) ในการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟสูงกว่าด้วยความร้อนทั่วไป ส่วนผลของอุณหภูมิกับอัตราส่วนระหว่างแก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ตรงข้ามกับการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไป โดยการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟอัตราส่วนของแก๊สทั้งสองจะลดลงขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สในการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟสูงกว่า ขณะที่ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 24 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความร้อนของแก๊สเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สำหรับค่าความร้อนของน้ำมันจากการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปประมาณ 30-32 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ด้วยไมโครเวฟประมาณ 34 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

งานวิจัยของ Huang และคณะ (2008) ศึกษาการนำทรัพยากรและพลังงานจากฟางข้าว (Rice straw) กลับคืนมาได้ทั้งหมดโดยการไพโรไลซิสเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟ จากผลของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการไพโรไลซิส พบว่าการไพโรไลซิสฟางข้าวเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟไม่จำเป็นต้องใส่ตัวดูดคลื่นคลื่นไมโครเวฟ (Microwave receptor) เพื่อช่วยในการ

ไพโรไลซิสฟางข้าวถึงแม้ว่าฟางข้าวจะไม่มีสมบัติความเป็นไดอิเล็กทริกก็ตาม (Dielectric) ซึ่งอาจจะเป็นผลจากไพโรไลซิสภายใต้เครื่องไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยว (Single-mode microwave device) เนื่องจากพลังงานคลื่นไมโครเวฟสามารถโฟกัสได้ดีทำให้เกิดจุดร้อนขึ้นภายในฟางข้าว ส่งผลทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนที่ดีกว่าและช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยา トラบิตที่กำลังไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟสูงกว่า 86 วัตต์ จะมีพลังงานที่เพียงพอที่สามารถเกิดการไพโรไลซิสฟางข้าวได้ อย่างไรก็ตามถ่านชาร์บางส่วนเกิดขึ้นระหว่างเริ่มต้นทำปฏิกิริยาและกลายมาเป็นตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งทำหน้าที่ช่วยในการไพโรไลซิส จากการศึกษาผลของขนาดอนุภาค พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงน้อยกว่า 0.425 มิลลิเมตร ส่งผลให้อัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และที่กำลังไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ 200-350 วัตต์ ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็งอยู่ในช่วง 18.51-19.66 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมซึ่งมากกว่าฟางข้าว 15.26 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เนื่องจากมีสารระเหยง่ายเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส และมีคาร์บอนคงตัวเป็นองค์ประกอบหลัก อย่างไรก็ตามภายใต้กำลังไฟฟ้า 400-500 วัตต์ ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลงเป็น 16.78-17.44 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เนื่องจากกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟไม่สูงพอที่ทำให้บางส่วนของคาร์บอนคงตัวสามารถเกิดไพโรไลซิสได้ คาร์บอนคงตัวเกิดการสลายตัวอย่างเห็นได้ชัดที่ กำลังไฟฟ้าสูงกว่า 400 วัตต์ หรือที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาประมาณ 470 องศาเซลเซียส เมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 300-500 วัตต์ พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ของแข็งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.6 เท่า และพื้นที่ผิวสูงตามกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีขนาดไม่ต่างกันมาก คือ 24-25 อังสตรอม และพื้นที่ผิวที่สูงของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟสามารถใช้เป็นตัวดูดซับได้ (Adsorbent)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลวทดแทนจากยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยเทคนิคไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ และศึกษาผลของตัวแปร รวมถึงภาวะที่ใช้ในการลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้ว โดยใช้ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสเป็นตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน

3.1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. ตะแกรงร่อนขนาด 250-850 ไมครอน
2. เครื่องไมโครเวฟบ้าน (Domestic microwave oven) ยี่ห้อ อิเล็กโทรลักซ์ รุ่น EMM2005/EMM2005S (Electrolux EMM2005/EMM2005S) กำลังไฟฟ้าวรวม 1,300 วัตต์ กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 800 วัตต์ ความถี่ 2,450 เมกะเฮิร์ต ขนาด 484 x 376 x 285 มิลลิเมตร แรงดันไฟฟ้า 230 โวลต์/ 50 เฮิร์ต
3. คิวทูปตัวยู (u-tube reactor) เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 ซม. ยาว 18 ซม. กว้าง 14 ซม.
4. เครื่องควบคุมอัตราการไหลแก๊ส (Mass flow controller) Aalborg Model GFC 171
5. เครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary evaporator) Heidolph Hei-VAP
6. อุปกรณ์การกรองพร้อมกระดาษกรอง Whatman glass microfibre filters (GF/C)
7. กรวยกรองแบบสุญญากาศ (Buchner funnel)
8. กระดาษกรอง Whatman no.42 และ no.1
9. เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermalgravimetric analyzer, TGA) Perkin Elmer รุ่น Pyris diamond สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบโดยการสลายตัวด้วยความร้อน
10. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface area and porosity analyzer) ASAP รุ่น 2020
11. เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน LECO รุ่น CHN2000

12. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) JEOL รุ่น JSM-6480LV และวิเคราะห์เชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDS) Oxford รุ่น 7573

3.2 สารเคมีที่ใช้

1. ยางรถยนต์ใช้แล้ว ขนาด 250-450 ไมครอน
2. เตตระไฮโดรฟูแรน 99.99% (AR Grade, Fisher Chemicals)
3. แก๊สไนโตรเจน (N_2) 99.99% จาก Praxair
4. ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมทางการค้า M8-21 (Commercial Grade, BASF in Germany) แสดงสมบัติ ในภาคผนวก ก
5. นิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Nickel nitrate hexahydrate, $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) (Extra pure, QReC™)
6. แอมโมเนียมโมลิบเดต (Ammonium heptamolybdate, $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$) (AR Grade, Ajax Finechem Pty Ltd.)
7. ผงเขม่าดำ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 11.86 ไมครอน จากบริษัทอุตสาหกรรมปิโตรเคมี กัลไทย จำกัดมหาชน (TPI) แสดงสมบัติ ในภาคผนวก ข

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างยางรถยนต์ใช้แล้ว

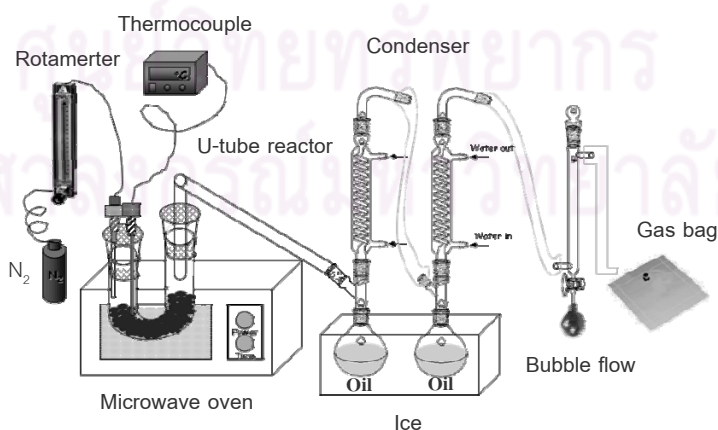
คัดขนาดยางรถยนต์ให้มีขนาด 250–450 ไมครอน ด้วยตะแกรงเบอร์ 20 และ 60 เก็บไว้ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปทำการทดลอง

3.3.2 การไพโรไลซิส

ก) การไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ

นำยางรถยนต์ใช้แล้ว 60 กรัม ใส่ลงในควอซท์รูบ์ตัวยู ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ความสูง 18.5 เซนติเมตร ความกว้าง 13 เซนติเมตร นำควอซท์รูบ์ตัวยูใส่ในเครื่องไมโครเวฟบ้าน (Domestic microwave oven) ยี่ห้ออิเล็กทรอนิกส์ รุ่น EMM2005/EMM2005S (Electrolux EMM2005/EMM2005S) กำลังไฟรวม 1,300

วัตต์ กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 800 วัตต์ ความถี่ 2,450 เมกะเฮิร์ต ขนาด 484 x 376 x 285 มิลลิเมตร แรงดันไฟฟ้า 230 โวลต์/ 50 เฮิร์ต เครื่องมือวัดอุณหภูมิ ชนิด K มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ความยาว 18 เซนติเมตร ใส่ในหลอดรูปตัวยู โดยปลายของเครื่องมือวัดอุณหภูมิสัมผัสกับยางรถยนต์ใช้แล้วประกอบเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.1 พร้อมกับทดสอบรอยรั่ว ไล่อากาศภายในควอซ์หลอดตัวยูด้วยแก๊สไนโตรเจน ซึ่งใช้ในการทดลองที่อัตราการไหล 0.05 ลิตร/นาที่ จากนั้นทำการปรับกำลังไฟฟ้าหน้าเครื่องไมโครเวฟไปที่ 300 วัตต์ โดยมีอัตราการให้ความร้อน 102 องศาเซลเซียสต่อนาที จับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยเริ่มนับเวลาตั้งแต่เริ่มเปิดเครื่องไมโครเวฟจนถึงเวลา 10 นาที ไอระเหยที่เพิ่มขึ้นถูกควบแน่นในขวดก้นกลมจำนวน 2 ขวด ซึ่งแช่อยู่ในอ่างน้ำแข็ง น้ำมันที่ได้นี้เรียกว่าน้ำมันเบา (Pyrolysis light oil) จากนั้นนำควอซ์หลอดตัวยูออกจากเครื่องไมโครเวฟแล้วชะล้างผลิตภัณฑ์ที่เหลืออยู่ในควอซ์หลอดตัวยู และที่เหลืออยู่ในเครื่องแก้วควบแน่นด้วยเตตระไฮโดรฟูแรน ปิดฝาขวดให้สนิทเพื่อป้องกันการระเหย ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้เตตระไฮโดรฟูแรนสกัดผลิตภัณฑ์เหลวออกจากถ่านชาร์ จากนั้นกรองสารละลายของเหลวออกจากกากของแข็งด้วยอุปกรณ์การกรองสุญญากาศ นำกากของแข็งที่เหลืออยู่ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปใส่ในโถดูดความชื้น แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกส่วนนี้ว่า ถ่านชาร์ (Pyrolysis char) ส่วนของสารละลายของเหลวที่ได้ไประเหยตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแรนออกที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสด้วยเครื่องระเหยแบบหมุนที่ความดัน 400 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 40 นาที หลังจากนั้นลดความดันลงเป็น 200 มิลลิบาร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกส่วนนี้ว่า น้ำมันหนัก (Pyrolysis heavy oil)



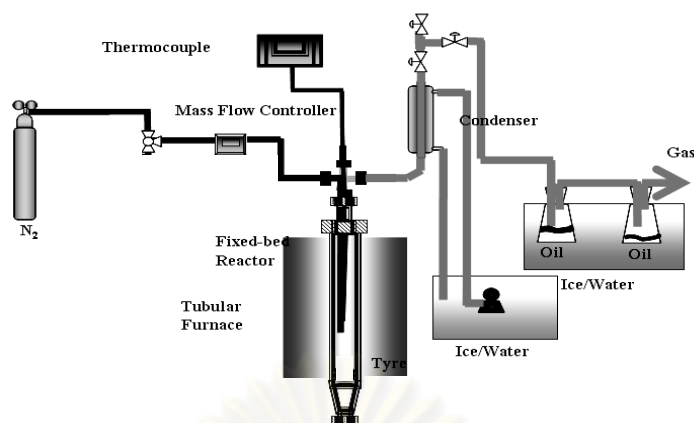
รูปที่ 3.1 แผนภาพกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ

การศึกษาระบบการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟแบ่งเป็น 3 กรณี คือ

- 1) ผลของเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสโดยศึกษาที่ภาวะอัตราการให้ความร้อนที่ 105 องศาเซลเซียส เริ่มนับเวลาการทำไพโรไลซิสตั้งแต่เริ่มเปิดเครื่องไมโครเวฟจนถึงเวลา 15 20 และ 25 นาที
- 2) ผลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการไพโรไลซิสโดยทำการปรับกำลังไฟฟ้าที่หน้าเครื่องไมโครเวฟที่ 450 600 และ 700 วัตต์ เพื่อให้มีอัตราการให้ความร้อนที่ใช้ในการไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน ทำการจับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยเริ่มนับเวลาตั้งแต่เริ่มเปิดเครื่องไมโครเวฟจนถึงเวลา 10 15 20 และ 25 นาที
- 3) ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสโดยทำการปรับกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟไปที่ 450 วัตต์ และศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสที่ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส จับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยเริ่มนับเวลาตั้งแต่เริ่มเปิดเครื่องไมโครเวฟจนถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ และจับเวลาต่อจนถึงเวลา 10 นาที

ข) การไพโรไลซิสด้วยเตาเผา

เพื่อเปรียบเทียบกับการไพโรไลซิสด้วยระบบไมโครเวฟ ทำการศึกษาสมบัติและการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยเตาเผา โดยนำยางรถยนต์ใช้แล้ว 60 กรัม ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง นำเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งใส่ในเตาเผาแบบท่อ (Tubular furnace) ประกอบเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.2 พร้อมกับทดสอบรอยรั่ว ไล่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยแก๊สไนโตรเจนซึ่งใช้ในการทดลองที่อัตราการไหล 0.05 ลิตร/นาที จากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิเป็น 400 องศาเซลเซียส เตาเผาให้อัตราการให้ความร้อนประมาณ 14 องศาเซลเซียสต่อนาที จับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยเริ่มนับเวลาตั้งแต่อุณหภูมิถึงค่าที่กำหนด จนครบ 10 นาที ไอระเหยที่เกิดขึ้นถูกควบแน่นในขวดรูปชมพู่จำนวน 2 ขวด ซึ่งแช่อยู่ในอ่างน้ำแข็ง น้ำมันที่ได้นี้เรียกว่าน้ำมันเบา (Pyrolysis light oil) จากนั้นนำเครื่องปฏิกรณ์ออกจากเตาเผาแล้วชะล้างผลิตภัณฑ์ที่เหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเตตระไฮโดรฟูแรนปิดฝาขวดให้สนิทเพื่อป้องกันการระเหย



รูปที่ 3.2 แผนภาพกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยเตาเผา

ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้เตตระไฮโดรฟูแรนสกัดผลิตภัณฑ์เหลวออกจากถ่านชาร์ จากนั้นกรองสารละลายของเหลวออกจากกากของแข็งด้วยอุปกรณ์การกรองสุญญากาศ นำกากของแข็งที่เหลืออยู่ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก ส่วนของสารละลายของเหลวที่ได้ไประเหยตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแรนออกที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสด้วยเครื่องระเหยแบบหมุนที่ความดัน 400 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 40 นาที หลังจากนั้นลดความดันลงเป็น 200 มิลลิบาร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกส่วนนี้ว่า น้ำมันหนัก (Pyrolysis heavy oil) และที่ภาวะของอัตราการให้ความร้อนเดียวกันนั้นในการไพโรไลซิส ต่อไปทำการเปลี่ยนอุณหภูมิจาก 400 องศาเซลเซียส เป็น 500 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ก) สำหรับการเตรียมนิกเกิลโมลิบดีนัม (ปริมาณนิกเกิลร้อยละ 5 และปริมาณโมลิบดีนัมร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก) บนถ่านชาร์ ทำได้ดังต่อไปนี้ (Prins และคณะ, 1997 และ Vladimir และคณะ, 2001)

1. เตรียมสารละลายนิกเกิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท เข้มข้น 0.2558 โมลต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร และสารละลายแอมโมเนียมโมลิบดีต เข้มข้น 0.0715 โมลต่อลิตร

2. เติมสารละลายนิกเกิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท ลงในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดตลงไปจนให้เข้ากัน
 3. ชั่งถ่านชาร์ขนาด 1-2 มิลลิเมตร ที่ผ่านการอบแห้งแล้ว จำนวน 23.7 กรัม
 4. เติมถ่านชาร์ลงในสารละลาย กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
 5. ให้ความร้อน จนอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส กวนต่อไปจนน้ำเริ่มแห้ง
 6. อบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้เป็นเวลา 1 คืนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์
- ข) สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมบนผงเขม่าดำ วิธีการเตรียมเช่นเดียวกับ ก) แต่เปลี่ยนตัวรองรับจากถ่านชาร์เป็นผงเขม่าดำ
- ค) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมทางการค้าแสดงสมบัติ ในภาคผนวก ก

3.3.4 กระบวนการดีซัลเฟอร์เซชัน

1. นำผงยางรถยนต์ 60 กรัม และตัวเร่งปฏิกิริยา 4 และ 10 กรัม ใส่ลงในควอซ์ตลับด้วยใส่ลงในเครื่องไมโครเวฟ โดยตำแหน่งในการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่สูงจากระดับของยางรถยนต์ที่ใส่ในควอซ์เป็นระยะ 3 เซนติเมตร
2. ประกอบอุปกรณ์ทั้งหมด ใส่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการปรับกำลังไฟฟ้าหน้าเครื่องไมโครเวฟไปที่ 450 วัตต์ จากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที โดยควบคุมให้มีอัตราการให้ความร้อนประมาณ 153 องศาเซลเซียสต่อนาที จับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยเริ่มนับเวลาตั้งแต่เริ่มเปิดเครื่องไมโครเวฟจนถึงอุณหภูมิของระบบถึง 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที
3. เมื่อครบระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ลดอุณหภูมิของเครื่องไมโครเวฟ จนเหลือ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นถอดควอซ์ตลับออกจากไมโครเวฟ
4. นำตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากควอซ์ตลับด้วย
5. เก็บผลิตภัณฑ์น้ำมันไว้ในขวดสีชาเพื่อรอวิเคราะห์ต่อไป

3.3.5 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของยางรถยนต์ใช้แล้วและผลิตภัณฑ์

ก) การวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของยางรถยนต์ใช้แล้ว

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis, ASTM D 3173-3175)
2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis, ASTM D 3176-89)
3. ค่าความร้อนและปริมาณกำมะถันรวม (ASTM D 2015 และ ASTM D 3177 Method B) (ภาคผนวก ค)
4. การสูญเสียน้ำหนักของยางรถยนต์ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและอุณหภูมิ ด้วยเครื่อง Thermogravimetric/Differential Thermal Analyzer (TG/DTA)

ข) การวิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส (ตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ง)

1. ร้อยละการเปลี่ยนของยางรถยนต์
2. ร้อยละผลได้ของเหลว
3. ร้อยละผลได้ของแข็ง
4. ร้อยละผลได้ของแก๊ส

ค) การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เหลว

1. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เหลวด้วยแก๊สโครมาโตกราฟีแบบจำลองการกลั่น (Simulated distillation gas chromatograph) (ASTM D 2887-93) (ภาคผนวก จ)

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เหลวด้วยวิธีนี้จะวิเคราะห์ปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ตามจุดเดือดขององค์ประกอบดังต่อไปนี้

จุดเดือดเริ่มต้น ถึง 200 องศาเซลเซียส	= แนฟทา (Naphtha)
200 ถึง 250 องศาเซลเซียส	= เคโรซีน (Kerosene)
250 ถึง 350 องศาเซลเซียส	= น้ำมันแก๊สเบา (Light gas oil)
350 ถึง 370 องศาเซลเซียส	= น้ำมันแก๊ส (Gas oil)
370 ถึง จุดเดือดสุดท้าย	= กากของแข็ง (Long residue)

การวิเคราะห์เริ่มด้วยการนำผลิตภัณฑ์เหลวไปละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ในอัตราส่วน 1 ใน 100 ส่วนโดยปริมาตร

2. การตรวจสอบคุณภาพน้ำมันในด้านค่าความร้อนและปริมาณกำมะถันรวม (ASTM D 2015 และ ASTM D 3177 Method B ตามลำดับ)

ง) การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์

1. ค่าความร้อนและปริมาณกำมะถันรวม (ASTM D 2015 และ ASTM D 3177 Method B)
2. วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนโดยใช้การวัดการดูดซับ-การคายแก๊สไนโตรเจนด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface area and porosity analyzer) ASAP รุ่น 2020
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) JEOL รุ่น JSM-6480LV และวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน ด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDS) Oxford รุ่น 7573

3.3.6 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา

1. วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนโดยใช้การวัดการดูดซับ-การคายแก๊สไนโตรเจนด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface area and porosity analyzer) ASAP รุ่น 2020
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) JEOL รุ่น JSM-6480LV และวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDS) Oxford รุ่น 7573

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์สมบัติยางรถยนต์ใช้แล้ว

4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบต่าง ๆ และค่าความร้อนของยางรถยนต์ใช้แล้วที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง พบว่ายางรถยนต์ที่ใช้แล้วมีสารระเหยสูงถึงร้อยละ 64.4 ซึ่งมาจากส่วนของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ในยางรถยนต์ใช้แล้ว นอกจากนี้ยางรถยนต์ใช้แล้วมีปริมาณความชื้นต่ำประมาณร้อยละ 0.34 ปริมาณเถ้าร้อยละ 10.8 และคาร์บอนคงตัวร้อยละ 24.5 และจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุแสดงให้เห็นว่ายางรถยนต์ใช้แล้วประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 77.6 และไฮโดรเจนร้อยละ 7.12 นอกจากนี้ยางรถยนต์ใช้แล้วยางรถยนต์ใช้แล้วมีธาตุกำมะถันอยู่ประมาณร้อยละ 1.43 เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปยาง (Vulcanization) ที่ต้องใช้กำมะถันเป็นตัวเชื่อมขวาง

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ได้แก่ น้ำมันแก๊สโซลีน (47 เมกะจูล/กิโลกรัม) น้ำมันดีเซล (45 เมกะจูล/กิโลกรัม) ชีวมวลได้แก่ ปาล์ม (22.6 เมกะจูล/กิโลกรัม) และแกลบ (13.4 เมกะจูล/กิโลกรัม) รวมถึงยางรถยนต์ พบว่ายางรถยนต์ที่ใช้แล้วมีค่าความร้อนสูงประมาณ 34.6 เมกะจูล/กิโลกรัม แต่ยังมีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล (กัมปนาท ปราศราศี, 2549) และน้ำมันแก๊สโซลีน และเมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนของยางรถยนต์ใช้แล้วกับชีวมวล ได้แก่ ปาล์ม และแกลบซึ่งมีค่าความร้อน 22.6 เมกะจูล/กิโลกรัม (Yan และคณะ, 2005) และ 13.4 เมกะจูล/กิโลกรัม (Ji-Lu, 2007) ตามลำดับ พบว่าชีวมวลมีค่าความร้อนน้อยกว่ายางรถยนต์ใช้แล้วทั้งนี้เนื่องจากปาล์มและแกลบมีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนต่ำ โดยปาล์มมีร้อยละคาร์บอนและไฮโดรเจนเท่ากับ 53.8 และ 7.3 ในส่วนแกลบมีร้อยละคาร์บอนและไฮโดรเจนเท่ากับ 41.7 และ 7.7 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่ายางรถยนต์ใช้แล้วจึงทำให้ยางรถยนต์มีค่าความร้อนสูงกว่าชีวมวล

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ และแบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
<u>การวิเคราะห์แบบประมาณ</u>	
ความชื้น	0.34
เถ้า	10.8
สารระเหย	64.4
คาร์บอนคงตัว	24.5
<u>การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ</u>	
คาร์บอน	77.6
ไฮโดรเจน	7.12
ไนโตรเจน	0.29
กำมะถัน	1.43
ออกซิเจน	13.6

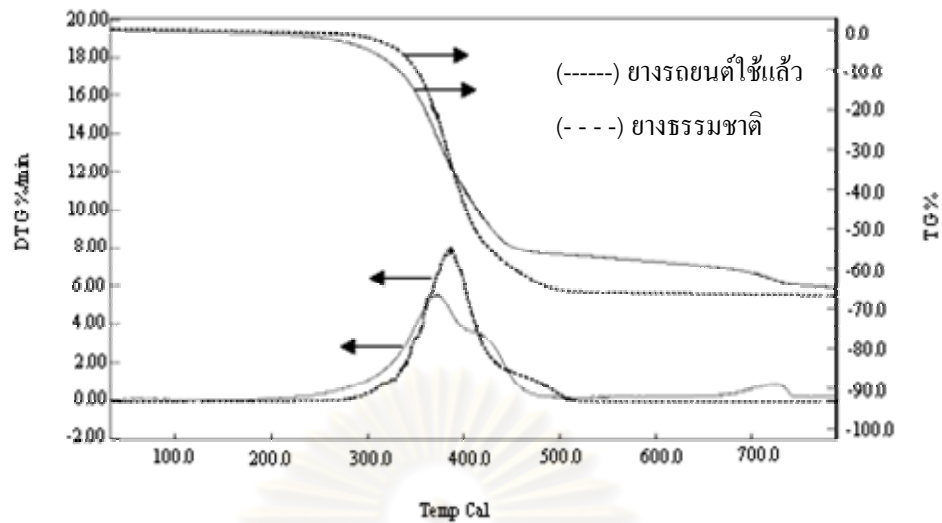
ตารางที่ 4.2 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

ชนิดของเชื้อเพลิง	ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	ที่มา
น้ำมันแก๊ซولين	47.0	กระทรวงพลังงาน, 2551
น้ำมันดีเซล	45.0	กระทรวงพลังงาน, 2550
ชีวมวล		
- ปาล์ม	22.6	Yan และคณะ, 2005
- แกลบ	13.4	Ji-Lu, 2007
ยางรถยนต์ใช้แล้ว	34.6	

4.1.2 การวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักของยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA)

เมื่อนำยางรถยนต์ที่ใช้แล้วมาหาองค์ประกอบของสารโดยให้ความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่ายางรถยนต์ที่ใช้แล้วสลายตัวด้วยความร้อนประมาณร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก อีกประมาณร้อยละ 35 เป็นส่วนของถ่านชาร์ที่ไม่สลายตัว และพบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น (Initial decomposition temperature, T_{i0}) เท่ากับ 333 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการสลายตัวที่อัตราการสลายตัวสูงสุด (Maximum decomposition temperature, T_{max}) เท่ากับ 375 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นเทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติพบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นเท่ากับ 358 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิการสลายตัวที่อัตราการสลายตัวสูงสุดเท่ากับ 383 องศาเซลเซียส โดยยางธรรมชาติจะสลายตัวหมด อย่างไรก็ตามยางรถยนต์ใช้แล้วเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่ายางธรรมชาติเนื่องจากมาจากยางรถยนต์ใช้แล้วมีส่วนประกอบอื่น ได้แก่ สารเติมแต่งต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนเซชันของยางรถยนต์ ซึ่งสามารถสลายตัวได้ก่อนที่อุณหภูมิต่ำ จากอัตราการสลายตัวสูงสุดของยางรถยนต์ใช้แล้วเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ พบว่ายางรถยนต์ที่ใช้แล้วมีอัตราการสลายตัวสูงสุดต่ำกว่ายางธรรมชาติเนื่องจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้วผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันจึงทำให้โมเลกุลมีการเชื่อมโยงกันอย่างแข็งแรง Murillo และคณะ (2006) พบว่ายางธรรมชาติจะสลายตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 480 องศาเซลเซียส ซึ่งที่อุณหภูมิตั้งแต่ 150-310 เป็นช่วงการสลายตัวของความชื้นและสารเติมแต่งต่าง ๆ ในยาง และช่วงอุณหภูมิ 350-490 องศาเซลเซียส คือ ช่วงการสลายตัวของยางสังเคราะห์ได้แก่ ยางบิวทาไดอีน และยางบิวทาไดอีนสไตรีน ดังนั้นจึงวิเคราะห์ได้ว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของยางรถยนต์ใช้แล้วที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ คือ ยางธรรมชาติ

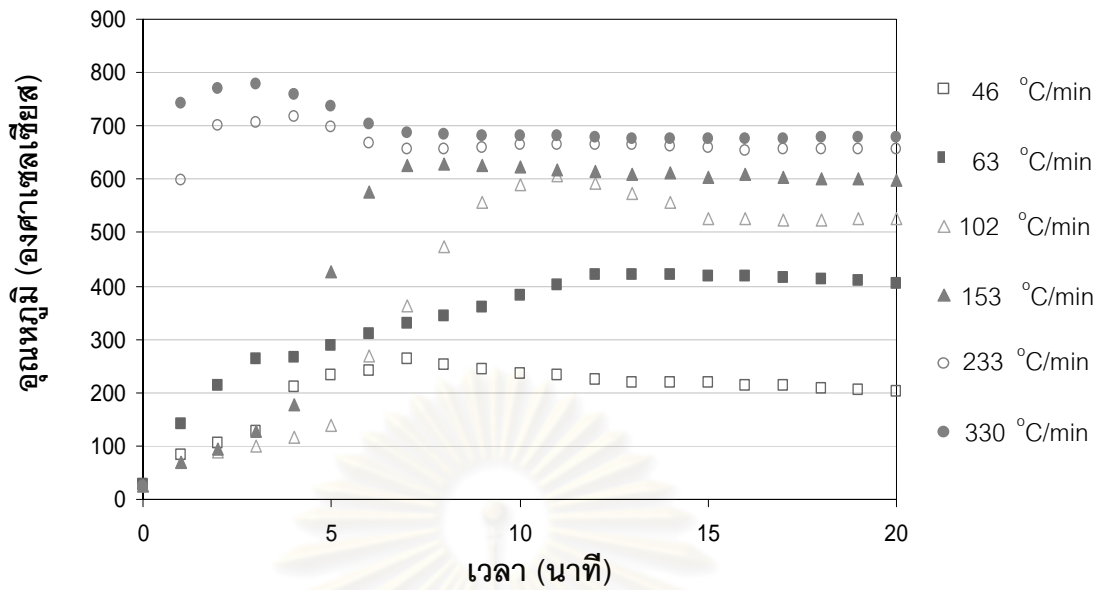
จากผลการสลายตัวด้วยความร้อนของยางรถยนต์ใช้แล้ว ซึ่งยางรถยนต์มีอุณหภูมิการสลายตัวที่อัตราการสลายตัวสูงสุด 375 องศาเซลเซียส ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ ที่ภาวะอุณหภูมิของการไพโรไลซิสสูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของยางรถยนต์ใช้แล้วต่อไป



รูปที่ 4.1 การสลายตัวของยางรถยนต์ที่ใช้แล้วด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (—) ยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว (- -) ยางธรรมชาติ

4.2 ผลของการปรับระดับกำลังไฟฟ้าหน้าเครื่องไมโครเวฟต่ออุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนของกระบวนการไพโรไลซิส

เมื่อใส่ผงยางรถยนต์ใช้แล้วปริมาณ 60 กรัม ลงในหลอดรูปตัวยู และกำหนดเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสเท่ากับ 20 นาที การปรับระดับกำลังไฟฟ้าหน้าเครื่องไมโครเวฟจาก 100 ถึง 700 วัตต์ ส่งผลต่ออัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิของยางรถยนต์ใช้แล้วภายในหลอดรูปตัวยู กราฟแสดงดังรูปที่ 4.2 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกระตุ้นไมโครเวฟ (Microwave receptor) เพื่อช่วยในการไพโรไลซิส เนื่องจากในยางรถยนต์ใช้แล้วมีผงเขม่าดำ (Carbon black) เป็นองค์ประกอบอยู่ ซึ่งผงเขม่าดำหรือถ่านชาร์มีสมบัติในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ (Menendez และคณะ, 2002 และ Dominguez และคณะ, 2007) เนื่องจากไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง (30 เมกะเฮิร์ต ถึง 300 กิกกะเฮิร์ต) ทำให้สามารถที่จะทะลุผ่านถ่านชาร์และทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในอนุภาคถ่านชาร์ได้ (Cha และ Kim, 1993)



รูป

ที่ 4.2 การ

เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของยางรถยนต์ใช้แล้วที่บรรจุในหลอดควอตซ์รูปตัวยูภายใต้การให้รังสีไมโครเวฟอัตราการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน

ดังนั้นเมื่อคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเนื้อยางรถยนต์ใช้แล้วสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ ทำให้อุณหภูมิของยางรถยนต์ใช้แล้วสูงขึ้นมากกว่า 700 องศาเซลเซียส ภายในระยะเวลาอันสั้น (น้อยกว่า 5 นาที) เมื่ออัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 233 และ 330 องศาเซลเซียสต่อนาที ทั้งนี้จากกราฟในช่วงแรกที่อุณหภูมิของยางรถยนต์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตามการสลายตัวของสารระเหยง่ายซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่มากภายในยางรถยนต์ใช้แล้ว และเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ของยางรถยนต์ หลังจากนั้นอุณหภูมิของยางรถยนต์ใช้แล้วลดลงและมีแนวโน้มที่คงที่ เป็นผลจากการสลายตัวของสารระเหยง่ายภายในยางรถยนต์เกิดการสลายตัวจนหมด รวมทั้งเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์กลายเป็นเถ้าและคาร์บอนคงตัว ช่วงของอุณหภูมิที่คงที่สำหรับแต่ละกำลังไฟฟ้าที่ให้กับยางรถยนต์ใช้แล้ว พบว่าอุณหภูมิสุดท้ายของการไพโรไลซิสยางรถยนต์ที่วัดได้มีค่าสูงขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ให้กับยางรถยนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากการไพโรไลซิสมีปริมาณเพิ่มขึ้นขณะที่อัตราการให้ความร้อนสูงขึ้น (Morita และ Sano, 1999 และ Mourao, 2001) ผลที่ได้แสดงให้เห็นดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 อัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิสูงสุดภายใต้การปรับระดับกำลังไฟฟ้าหน้าเครื่องไมโครเวฟที่แตกต่างกัน

ระดับพลังงานไมโครเวฟ (วัตต์)	อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียสต่อนาที)	อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส)
100	48	262
200	63	422
300	102	606
450	153	629
600	233	717
700	330	777

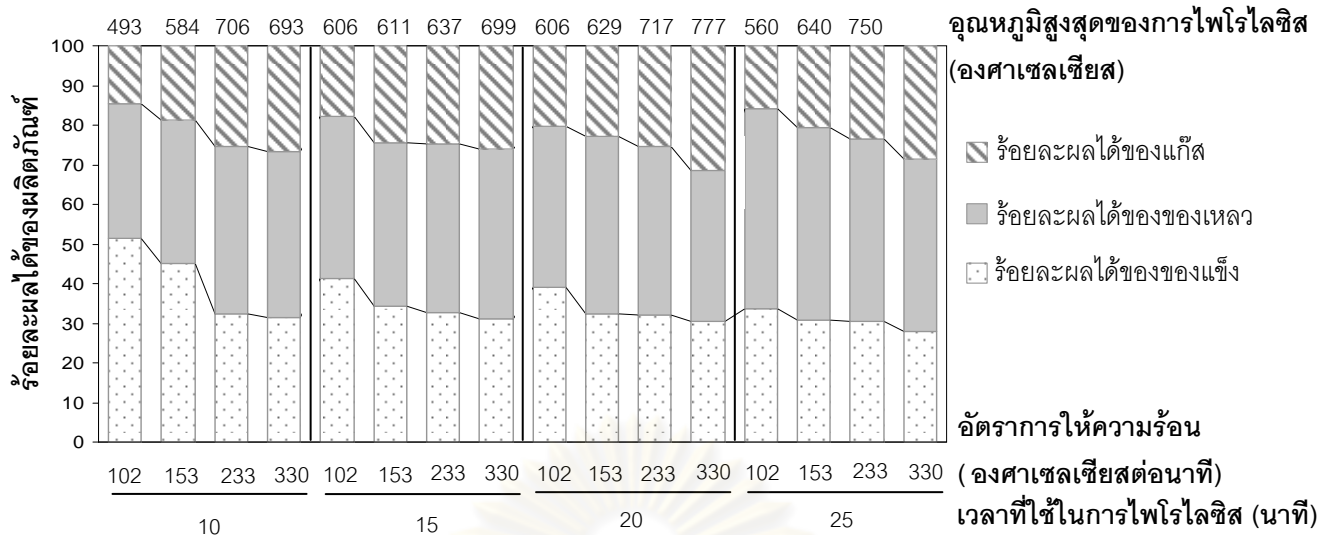
หมายเหตุ อัตราการให้ความร้อนคำนวณจากความชันสูงสุดของกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของยางรถยนต์ใช้แล้วภายใต้การให้รังสีไมโครเวฟที่อัตราการให้ความร้อนแตกต่างกัน (รูปที่ 4.2)

ปรากฏการณ์ที่กล่าวมานี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อปรับกำลังไฟฟ้าที่แสดงบนหน้าปิดของเครื่องไมโครเวฟให้สูงขึ้นตั้งแต่ 100 ถึง 700 วัตต์ ส่งผลให้อัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 46 ถึง 330 องศาเซลเซียสต่อนาที และอุณหภูมิของยางรถยนต์ใช้แล้วในหลอดรูปตัวยูสูงที่สุด แสดงดังตารางที่ 4.3 ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาการไพโรไลซิส คือ ที่อัตราการให้ความร้อนตั้งแต่ 102 ถึง 330 องศาเซลเซียสต่อนาที

4.3 ผลของอัตราการให้ความร้อนและเวลาในการไพโรไลซิส

4.3.1 ผลของอัตราการให้ความร้อนและเวลาในการไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

จากการไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้วปริมาณ 60 กรัม ด้วยไมโครเวฟที่อัตราการให้ความร้อนตั้งแต่ 102 ถึง 330 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 10 ถึง 25 นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 0.05 ลิตรต่อนาที โดยทำการวัดอุณหภูมิทุก ๆ 1 นาที พบว่าผลของอัตราการให้ความร้อนด้วยรังสีไมโครเวฟต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้ว แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลของอัตราการให้ความร้อนด้วยรังสีไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้ว

จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อให้เวลาในการไพโรไลซิสตั้งแต่ 10 ถึง 15 นาที ร้อยละผลได้ของของเหลวและแก๊สมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการให้ความร้อน จาก 233 ถึง 330 องศาเซลเซียสต่ออนาที และเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิสูงสุดของการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้ เนื่องจากเกิดการสลายตัวของสารระเหยง่าย (Volatilization) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่มากในยางรถยนต์ใช้แล้ว และเกิดการสลายตัวทางความร้อน (Thermal decomposition) ของสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งอยู่ในผลิตภัณฑ์ของของแข็ง (Shafizadeh และคณะ, 1982)

ดังนั้น ที่เวลาในการไพโรไลซิส 10 และ 15 นาที สามารถผลิตน้ำมันได้มากที่สุด ร้อยละ 42.2 ± 0.03 ที่อัตราการให้ความร้อน 233 องศาเซลเซียสต่ออนาที (อุณหภูมิสูงสุดของการไพโรไลซิส 706 องศาเซลเซียส) และ ร้อยละ 43.1 ± 0.02 ที่อัตราการให้ความร้อน 330 องศาเซลเซียสต่ออนาที (อุณหภูมิสูงสุดของการไพโรไลซิส 699 องศาเซลเซียส) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของทั้งเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส อัตราการให้ความร้อนด้วยรังสีไมโครเวฟ รวมทั้งอุณหภูมิสูงสุดของการไพโรไลซิส ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของของเหลวและผลิตภัณฑ์ของของแข็งลดลง ขณะที่ผลิตภัณฑ์แก๊สมีปริมาณเพิ่มขึ้น พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสที่ 20-25 นาที และใช้อัตราการให้ความร้อนด้วยรังสีไมโครเวฟที่ 330 องศาเซลเซียสต่ออนาที อุณหภูมิสูงสุดของการไพโรไลซิส 777 และ 768 องศาเซลเซียส มีปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สมากที่สุดคือร้อยละ 31.5 ± 0.06 และ ร้อยละ 28.5 ± 0.04 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากภาวะที่อุณหภูมิของการไพโรไลซิสมีค่าสูงนั้นจะส่งผลทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงภายในถ่านชาร์ รวมทั้ง

โมเลกุลของไฮสาร์ระเหยในผลิตภัณฑ์น้ำมันเกิดการสลายตัวไปกลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นที่เวลาในการไพโรไลซิส 20 นาที อัตราการให้ความร้อน 153 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิสูงสุดของการไพโรไลซิส 629 องศาเซลเซียส มีปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันมากที่สุดร้อยละ 44.7 ± 0.05 ดังนั้นจากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟที่เวลาในการไพโรไลซิสตั้งแต่ 10 ถึง 25 นาที อัตราการให้ความร้อนตั้งแต่ 102 ถึง 330 องศาเซลเซียสต่อนาที จึงสามารถสรุปได้ว่าภาวะของการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวให้ได้ในปริมาณมากที่สุด คือ ที่อัตราการให้ความร้อน 102 องศาเซลเซียสต่อนาที ระยะเวลาในการไพโรไลซิส 25 นาที และอุณหภูมิสูงสุดของการไพโรไลซิส 560 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเชื้อเพลิงเหลวสูงสุทธึร้อยละ 50.3 ± 0.03

4.3.2 ผลของอัตราการให้ความร้อนและเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยรังสีไมโครเวฟต่อค่าความร้อนและสมบัติของน้ำมันเบาและถ่านชาร์

ค่าความร้อนและการวิเคราะห์แบบประมาณของผลิตภัณฑ์ของแข็งหรือถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟแสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าที่เวลาของการไพโรไลซิส 10 นาที และอัตราการให้ความร้อน 102 และ 153 องศาเซลเซียสต่อนาที ส่งผลทำให้ได้ถ่านชาร์ที่มีสารระเหยง่าย (Volatile matter) ในปริมาณสูง ทำให้ค่าความร้อนของถ่านชาร์ที่ได้มีค่าสูงตามด้วย (31.1 กิโลจูลต่อกรัม) ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang และคณะ (2008) ซึ่งศึกษาการไพโรไลซิสฟางข้าวเหนียวนำด้วยไมโครเวฟ ถึงแม้ว่าถ่านชาร์ที่ได้จากภาวะนี้จะมีค่าความร้อนสูง และปริมาณเถ้าต่ำ แต่ปริมาณคาร์บอนคงตัวกลับมีปริมาณน้อย (ร้อยละ 35.6 โดยน้ำหนัก) ทำให้ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้พลังงานได้ในเวลาอันสั้นประกอบกับยังสามารถเกิดเขม่าควันได้เป็นจำนวนมากในระหว่างการเผาไหม้อีกด้วย เนื่องจากยังเกิดการไพโรไลซิสที่ยังไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราการให้ความร้อนโดยใช้เวลา 10 นาที ทำให้ปริมาณสารระเหยในถ่านชาร์ลดลงเหลือร้อยละ 6.60 และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นไปที่ร้อยละ 68.8

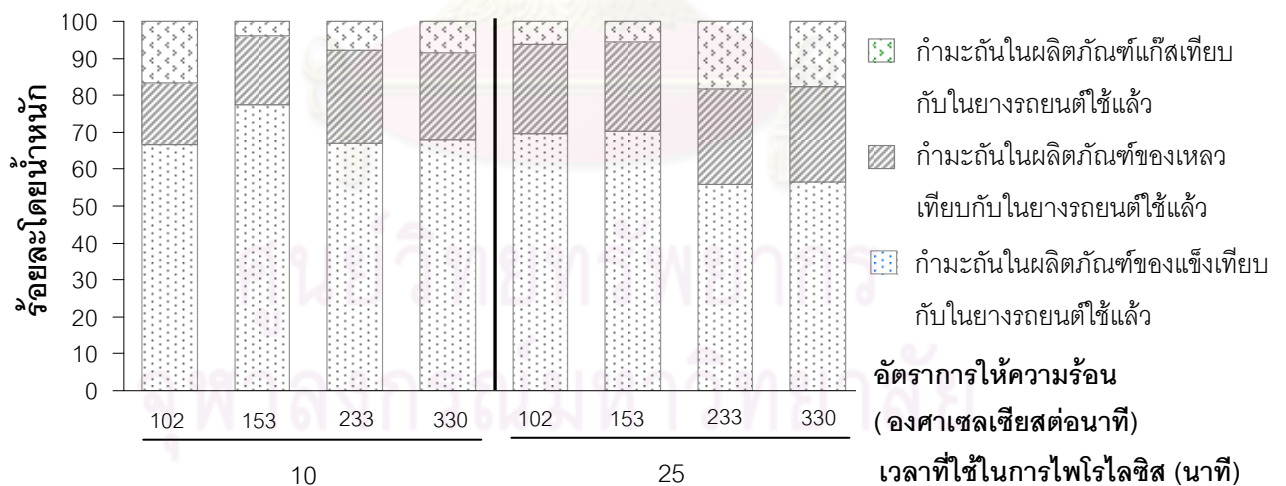
ตารางที่ 4.4 ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันเบาและของแข็ง และการวิเคราะห์แบบประมาณของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ

อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียสต่อนาที)	เวลา (นาที)	น้ำมันเบา		ถ่านชาร์		
		ค่าความร้อน (กิโลจูลต่อกรัม)	ค่าความร้อน (กิโลจูลต่อกรัม)	การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
				สารระเหย	เถ้า	คาร์บอนคงตัว
102	10	40.7	31.1	48.72	15.66	35.62
153		40.5	30.0	42.58	19.06	38.36
233		40.6	25.4	8.71	24.64	66.65
330		41.4	25.6	6.60	24.57	68.83
102	15	40.2	24.6	18.54	21.53	59.93
153		40.7	25.2	6.28	24.84	68.88
233		40.6	26.0	7.93	24.54	67.53
330		40.5	25.6	5.39	25.82	68.79
102	20	42.0	25.6	15.20	24.05	60.75
153		40.4	24.5	12.21	25.40	62.39
233		42.1	23.6	9.22	25.53	65.25
330		40.3	24.5	7.82	25.64	66.54
102	25	40.3	25.6	16.80	25.82	57.38
153		40.9	25.7	7.66	25.75	66.59
233		41.6	25.4	8.51	25.18	66.31
330		40.1	25.4	3.36	25.48	71.16

ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ อุบลรัตน์ ลิ้มประภาศิริกุล (2547) ซึ่งศึกษาการแยกแรงแจกผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสถ่านหินภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน พบว่าการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านชาร์เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 200 ถึง 900 องศาเซลเซียส คาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น เถ้ามีค่าคงที่ ส่วนสารระเหยมีค่าลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้สารระเหยที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในถ่านหินออกมามากขึ้น และเนื่องจากร้อยละคาร์บอนคงตัวมีค่ามากขึ้นจึงทำให้ถ่านหินมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งค่าคาร์บอนคงตัวมีค่าสูงสุดร้อยละ 73.4 โดยน้ำหนัก และมีค่าความร้อน 26.3 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อไพโรไลซิสถ่านหินที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส สำหรับภาวะที่ใช้ในการไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟในการผลิตถ่านชาร์ที่มีคาร์บอนคงตัวสูง คือ อัตราการให้ความร้อน 330 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นระยะเวลา 25 นาที จะได้ถ่านชาร์

ที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 71.2 โดยน้ำหนัก และมีค่าความร้อน 25.4 กิโลจูลต่อกรัม ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันเบาและถ่านซาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟแสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าค่าความร้อนของน้ำมันเบาและถ่านซาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสมีค่า 40 ถึง 42 กิโลจูลต่อกรัม และ 25 ถึง 26 กิโลจูลต่อกรัม ตามลำดับ เมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิของการไพโรไลซิส 15 ถึง 25 นาที

การแจกแจงปริมาณกำมะถันที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟเทียบกับปริมาณกำมะถันที่อยู่ในยางรถยนต์ใช้แล้ว ที่อัตราการให้ความร้อนตั้งแต่ 102 ถึง 330 องศาเซลเซียสต่ออนาที เวลาในการไพโรไลซิส 10 ถึง 25 นาที แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าส่วนใหญ่แล้วกำมะถันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในยางรถยนต์ใช้แล้วเมื่อผ่านการไพโรไลซิสทำให้ปริมาณกำมะถันจำนวนมากยังคงเหลืออยู่ในถ่านซาร์ประมาณร้อยละ 57 ถึง 77 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่ากำมะถันที่อยู่ในน้ำมันหรือไอที่ถูกควบแน่น เนื่องจากเกิดการแตกตัวของพันธะที่อ่อนแอที่สุดในเฟสของเหลว ส่งผลให้พันธะของกำมะถันจำนวนมากเกิดการแตกตัวและปล่อยแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ในรูปของแก๊สเฟส (Murena และคณะ, 2000) ดังนั้นปริมาณกำมะถันพบอยู่ในถ่านซาร์จึงมากกว่าในน้ำมัน



รูปที่ 4.4 ผลของอัตราการให้ความร้อนด้วยรังสีไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสต่อการกระจายตัวของกำมะถันในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วเทียบกับปริมาณกำมะถันในยางรถยนต์ใช้แล้วเริ่มต้น

นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับความสามารถในการดูดซับสารประกอบกำมะถันของถ่านชาร์ เนื่องจากถ่านชาร์มีสมบัติความเป็นรูพรุนอีกด้วย โดยพบว่าที่เวลาในการไพโรไลซิส 10 นาที อัตราการให้ความร้อน 153 องศาเซลเซียสต่อนาที มีร้อยละของปริมาณกำมะถันในถ่านชาร์มากที่สุด ร้อยละ 77.5 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสในภาวะนี้มีสมบัติความเป็นรูพรุนมาก จึงสามารถดูดซับสารประกอบกำมะถันที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสได้มากตามไปด้วย สมบัติความเป็นรูพรุนของถ่านชาร์แสดงดังตารางที่ 4.5 เมื่อเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 25 นาที ที่อัตราการให้ความร้อนเดียวกัน พบว่าปริมาณกำมะถันในถ่านชาร์ลดลง ขณะที่ปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้รังสีไมโครเวฟที่ให้กับยางรถยนต์ใช้แล้ว ทำลายโครงสร้างความเป็นรูพรุนของถ่านชาร์ทำให้ถ่านชาร์มีสมบัติความเป็นรูพรุนน้อยลง ความสามารถในการดูดซับโมเลกุลกำมะถันจึงลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้เวลาของการไพโรไลซิสที่เพิ่มขึ้น ทำให้ถ่านชาร์เกิดการสลายตัวและพันธะของกำมะถันในถ่านชาร์เกิดการแตกตัว ส่งผลทำให้โมเลกุลของกำมะถันเคลื่อนย้ายไปอยู่ในเฟสของของเหลวและแก๊สเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาณรูพรุนของตัวรองรับ ของถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ

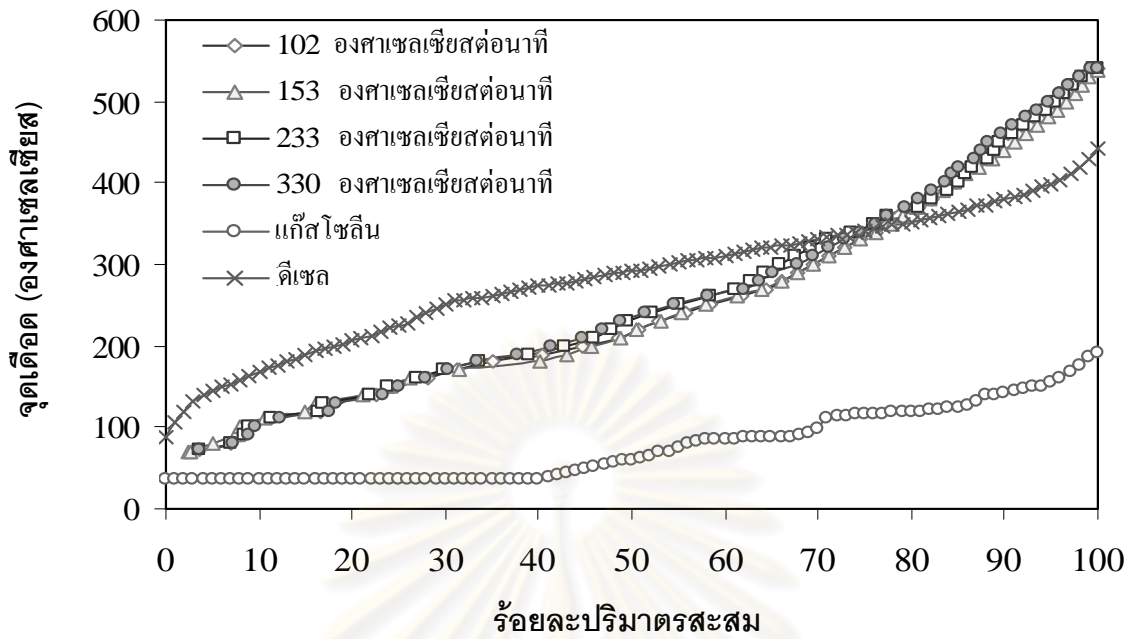
อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียสต่อนาที)	เวลา (นาที)	พื้นที่ผิว (ตารางเมตร/ กรัม)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)	ปริมาณรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/ กรัม)
153		76.2	139	0.26
233	10	70.7	158	0.28
330		52.3	133	0.17
153		62.5	133	0.21
233	20	62.3	134	0.21
330		58.3	139	0.20

4.4 เอกลักษณ์ของน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสของยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ

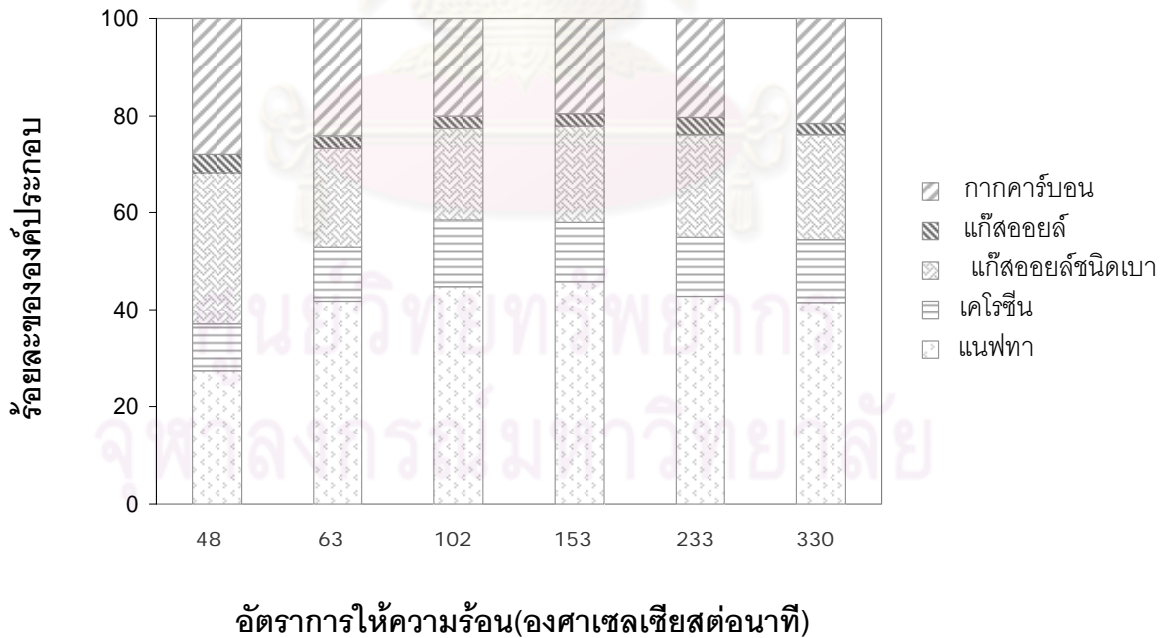
4.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามจุดเดือดด้วย Simulated distillation gas chromatography (GC-SIMDIS)

เมื่อนำน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสมาวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟีแบบจำลองการกลั่น โดยแบ่งชนิดของน้ำมันได้ตามช่วงจุดเดือดของสาร ดังนี้ ช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นถึงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นส่วนของแนฟทา (Naphtha) ช่วงอุณหภูมิ 200-250 องศาเซลเซียสเป็นส่วนของเคโรซีน (Kerosene) ช่วงอุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียสเป็นส่วนของแก๊สออยล์เบา (Gas light oil) ช่วงอุณหภูมิ 350-370 องศาเซลเซียสเป็นส่วนของแก๊สออยล์ (Gas oil) และช่วงอุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียสถึงอุณหภูมิสุดท้ายเป็นส่วนของกากคาร์บอน (Carbon residue) (กัมปนาค ปราศราคี, 2549) เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ ที่อัตราการให้ความร้อนต่าง ๆ กันเป็นเวลา 20 นาที มาเปรียบเทียบกับน้ำมันแก๊สโซลีนและน้ำมันดีเซล ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rofiqui และคณะ (2008) ซึ่งทำการไพโรไลซิสยางรถจักรยานภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนด้วยเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rodriguez และคณะ (2001) และ Ucar และคณะ (2005) ที่ทำการไพโรไลซิสยางรถจักรยานยนต์และรถบรรทุกภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน พบว่าน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟมีสมบัติการแจกแจงจุดเดือดอยู่ในช่วงของแก๊สโซลีน และน้ำมันดีเซล โดยน้ำมันเบาที่ได้สามารถนำไปกลั่นเป็นน้ำมันดีเซลและแก๊สโซลีนในปริมาณประมาณร้อยละ 42 และ 48 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.5

การกระจายตัวขององค์ประกอบภายในน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ ที่อัตราการให้ความร้อนต่าง ๆ โดยใช้เวลาในการไพโรไลซิส 20 นาที แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าปริมาณแนฟทาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 27.4 ถึง 45.7 โดยน้ำหนัก ตามอัตราการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้นจาก 48 ถึง 153 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งอาจเกิดจากการที่โมเลกุลเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนกลายเป็นอนุมูลอิสระมากขึ้นเมื่อมีอัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นขณะไพโรไลซิส และอาจเป็นไปได้ว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระทำให้เกิดการหยุดของสายโซ่ ทำให้ได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลขนาดเล็กหรือแนฟทาเพิ่มขึ้น (กัมปนาค ปราศราคี, 2549) ขณะที่กากคาร์บอนมีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก ไปเป็นประมาณร้อยละ 22 โดยน้ำหนัก ตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการให้ความร้อน



รูปที่ 4.5 ร้อยละปริมาตรสะสมและจุดเดือดของน้ำมันชนิดต่าง ๆ น้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ ที่เวลาของการไพโรไลซิส 20 นาที เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปิโตรเลียม

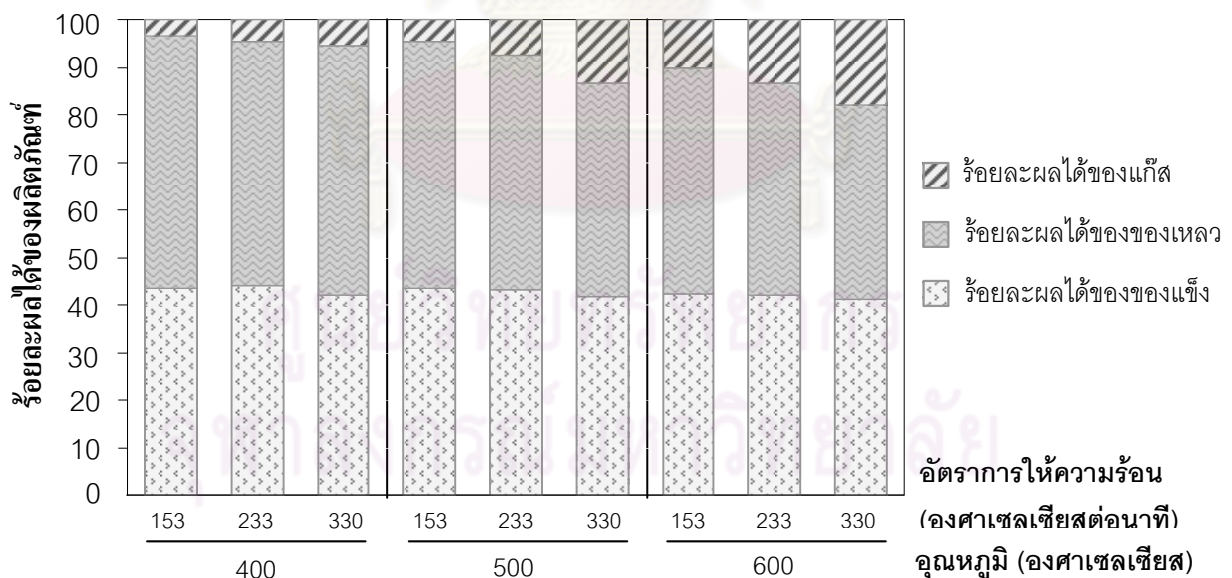


รูปที่ 4.6 ผลของอัตราการให้ความร้อนต่อร้อยละองค์ประกอบในน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟเป็นเวลา 20 นาที

4.5 ผลของอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิในการไพโรไลซิส

4.5.1 ผลของอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

เมื่อไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟโดยใช้อุณหภูมิคงที่ที่ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส และใช้อัตราการให้ความร้อนที่ 153 233 และ 330 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการไหลของแก๊สคือ 0.05 ลิตรต่อนาที พบว่าอุณหภูมิ และอัตราการให้ความร้อนส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bridgwater และคณะ (1990) โดยพบว่าเมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 153 ถึง 330 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่อุณหภูมิของการไพโรไลซิส 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการให้ความร้อนที่สูงขึ้นทำให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ลดลงและร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นเห็นอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิของการไพโรไลซิส 500 และ 600 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลของอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยรังสีไมโครเวฟต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ที่เวลาในการไพโรไลซิส 10 นาที

ผลการทดลองที่ได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Shafizadeh และคณะ (1982 และ 1985) ที่ศึกษาการไพโรไลซิสและการเผาไหม้ของไม้และชีวมวล เนื่องจากที่อัตราการให้ความร้อนสูงสุด (330 องศาเซลเซียสต่อนาที) นั้นอุณหภูมิของยางรถยนต์ภายในหลอดรูปตัวยูมีค่าสูงสุด (770 องศาเซลเซียส) ดังแสดงตามรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นภาวะที่ทำให้โมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงภายในถ่านชาร์และโมเลกุลของสารระเหยง่ายที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของน้ำมันเกิดการสลายตัวกลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันมากที่สุดร้อยละ 53.1 ที่อัตราการให้ความร้อน 153 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิของการไพโรไลซิส 400 องศาเซลเซียส

4.6 เปรียบเทียบวิธีการไพโรไลซิสระหว่างการใช้ความร้อนทั่วไปกับการใช้พลังงานไมโครเวฟ

4.6.1 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วโดยการให้ความร้อนแบบธรรมดาและแบบใช้พลังงานไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิในการไพโรไลซิส 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส จับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยเริ่มนับเวลาตั้งแต่อุณหภูมิถึงค่าที่กำหนดจนครบ 10 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยความร้อนแบบธรรมดานั้นเวลาที่ใช้สำหรับการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วนานกว่า เนื่องจากการให้ความร้อนแบบธรรมดานั้นต้องเสียเวลาในขั้นตอนการให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ คือ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งต้องใช้เวลา 18 26 และ 33 ตามลำดับ (อัตราการให้ความร้อน 14 องศาเซลเซียสต่อนาที) ซึ่งในขั้นตอนนี้ต้องสูญเสียพลังงานไฟฟ้าไปประมาณ 1.35 ถึง 2.47 ยูนิท เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานไมโครเวฟ ซึ่งใช้เวลาเพียง 1 2 และ 3 นาทีตามลำดับ (อัตราการให้ความร้อน 153 องศาเซลเซียสต่อนาที) เพราะการใช้พลังงานไมโครเวฟไม่ต้องเสียเวลาในขั้นตอนนี้ จึงมีผลทำให้การไพโรไลซิสด้วยการให้ความร้อนแบบธรรมดามีอัตราการเผาไหม้ของถ่านชาร์มาก และทำให้เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยพลังงานไมโครเวฟใช้นานน้อยกว่าจึงทำให้การเผาไหม้ของอนุภาคถ่านชาร์มีน้อยกว่า และผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นน้อยตามไปด้วย ส่วนปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ของทั้งสองวิธีการไพโรไลซิสมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่ามากที่สุดในการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันมากที่สุดร้อยละ 53.1

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบผลของวิธีการไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้ว

กระบวนการไพโรไลซิส	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียสต่อนาที)	เวลาของการไพโรไลซิส (นาที)	ร้อยละผลได้		
				น้ำมัน	ถ่านชาร์	แก๊ส
ความร้อนทั่วไป	400		28	51.3	42.0	6.7
	500	14	36	50.4	38.7	10.9
	600		43	47.8	37.4	14.8
ไมโครเวฟ	400		11	53.1	43.4	3.5
	500	153	12	51.8	43.5	4.8
	600		13	47.7	42.3	10.0

ดังนั้นจึงนำภาวะนี้ไปใช้ในการศึกษาการลดปริมาณกำมะถันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า निकเกิลโมลิบดีนัมที่มีอะลูมินาเป็นตัวรองรับ เทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นจากการนำถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อน 153 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที มาเตรียมเป็นตัวรองรับ निकเกิลโมลิบดีนัม รายละเอียดแสดงในหัวข้อ 4.7 ในด้านของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยความร้อนทั่วไปและด้วยไมโครเวฟ พบว่าการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสได้มากกว่าการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปถึง 33 เท่า

4.6.2 ค่าความร้อนในผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์และการกระจายตัวของกำมะถันในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้ว

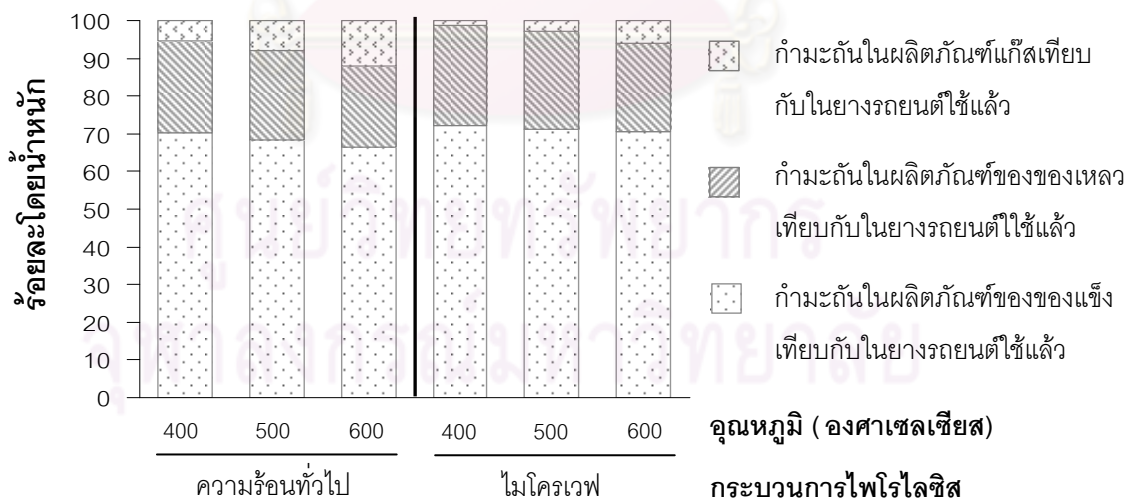
ผลิตภัณฑ์น้ำมันเบาและถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปและด้วยไมโครเวฟในหัวข้อ 4.6.1 นำไปวิเคราะห์ค่าความร้อนและปริมาณกำมะถันที่อยู่ในผลิตภัณฑ์แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟมีค่าความร้อนสูงกว่าการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยความร้อนทั่วไป เนื่องจากถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟมีองค์ประกอบของคาร์บอนคงตัวอยู่ในถ่านชาร์ในปริมาณที่สูงกว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไป การวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยความร้อนทั่วไปและด้วยไมโครเวฟ แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านซาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้ว ด้วยความร้อนทั่วไปและด้วยไมโครเวฟ

กระบวนการไพโรไลซิส	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการใช้		การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
		ความร้อน (องศาเซลเซียส ต่อนาที)	ค่าความร้อน (กิโลจูลต่อกรัม)	สารระเหย	เถ้า	คาร์บอนคงตัว
ความร้อนทั่วไป	400		22.4	8.03	26.09	65.88
	500	14	22.1	7.94	25.57	66.49
	600		22.8	7.86	25.19	66.95
ไมโครเวฟ	400		25.0	7.38	24.70	67.92
	500	153	24.6	7.34	24.86	67.80
	600		24.9	7.45	24.74	67.81

การแจกแจงปริมาณกำมะถันที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยความร้อนทั่วไป และด้วยไมโครเวฟเทียบกับปริมาณกำมะถันที่อยู่ในยางรถยนต์ใช้แล้ว ที่อุณหภูมิของการไพโรไลซิส 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.8 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Leung และคณะ (2002) ที่ศึกษาการไพโรไลซิสยางรถยนต์ที่อุณหภูมิ 500 ถึง 1000 องศาเซลเซียส พบว่ากำมะถันที่เป็นองค์ประกอบในยางรถยนต์ประมาณร้อยละ 57 ยังคงเป็นองค์ประกอบอยู่ในผลิตภัณฑ์ถ่านซาร์ และอยู่ในผลิตภัณฑ์แก๊สประมาณร้อยละ 6 ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกับผลที่ได้จากการศึกษาร้อยละกำมะถันของกระบวนการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปและด้วยไมโครเวฟ พบว่าปริมาณกำมะถันจำนวนมากยังคงเหลืออยู่ในถ่านซาร์มากกว่ากำมะถันที่อยู่ในน้ำมันหรือไอที่ถูกควบแน่น เนื่องจากเกิดการแตกตัวของพันธะที่อ่อนแอที่สุดในเฟสของเหลว ส่งผลให้พันธะของกำมะถันจำนวนมากเกิดการแตกตัวและปล่อยแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ในรูปของแก๊สเฟส (Murena และคณะ, 2000) เมื่อพิจารณาภายใต้อุณหภูมิของการไพโรไลซิสเดียวกันของการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปและด้วยไมโครเวฟ พบว่า การไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปมีปริมาณกำมะถันที่การกระจายตัวอยู่ในเฟสของแข็งและน้ำมันน้อยกว่าจากการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ แต่การกระจายตัวของกำมะถันในผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปกลับมีปริมาณกำมะถันที่สูงกว่าการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากภายใต้อุณหภูมิจากการไพโรไลซิสเดียวกัน การไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปใช้เวลาในการให้ความ

ร้อนแก่เตาปฏิกรณ์ที่นานกว่าการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ ดังนั้นระยะเวลาของการไพโรไลซิสจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่อาจส่งผลทำให้ถ่านชาร์เผาไหม้เกิดการสลายตัวได้มากขึ้น และเกิดการแตกตัวของพันธะที่อ่อนแอในเฟสของเหลวเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้พันธะของกำมะถันที่อยู่ในถ่านชาร์และน้ำมันเกิดการแตกตัวและปล่อยแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ในรูปของแก๊สเฟส ในขณะที่อุณหภูมิของการไพโรไลซิสเพิ่มสูงขึ้นจาก 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส ทั้งในการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปและด้วยไมโครเวฟ พบว่าการกระจายตัวของกำมะถันทั้งในถ่านชาร์และน้ำมันมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนของยางรถยนต์ใช้แล้วมีสองขั้นตอนซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ โดยขั้นแรกยางรถยนต์เกิด depolymerize ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนนี้เกิดการสลายตัวของยางรถยนต์อย่างรวดเร็ว และเกิดการแตกตัวของพันธะที่อ่อนแอที่สุด ขั้นที่สองยางเกิด devolatilize ที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส ในขั้นนี้เกิดการปล่อยสารประกอบที่ระเหยเป็นไอรวมทั้งสารประกอบกำมะถันที่อยู่ในน้ำมัน อย่างไรก็ตามกำมะถันส่วนมากยังคงอยู่ในถ่านชาร์และอยู่ในน้ำมันมากที่สุดที่อุณหภูมิต่ำ ขณะที่ปฏิกิริยา post-cracking reaction ส่งผลทำให้สารประกอบกำมะถันในน้ำมันมีปริมาณลดลงเมื่ออุณหภูมิของการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น (Cypress และคณะ, 1989)

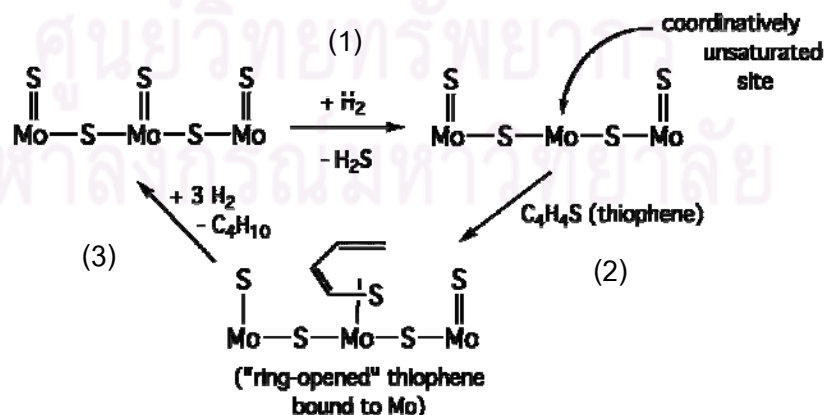


รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบผลของวิธีการไพโรไลซิสต่อการกระจายตัวของกำมะถันในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วเทียบกับปริมาณกำมะถันในยางรถยนต์ใช้แล้วเริ่มต้น

4.7 การลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสของรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟโดยใช้ถ่านชาร์จากระบวนการไพโรไลซิส

4.7.1 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อการลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันเบา

ตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมซัลไฟด์ (Molybdenum sulfide, MoS_2) มีตัวรองรับเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และถูกโปรโมทด้วยโคบอลต์ (Co) และ/หรือ นิกเกิล (Ni) ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการไฮโดรดีซัลฟิเดชัน (Hydrodesulfurization, HDS) ของสารประกอบกำมะถันที่มีอยู่ในน้ำมันปิโตรเลียม (Koizumi และคณะ, 2010) กระบวนการไฮโดรดีซัลฟิเดชันโดยทั่วไปทำภายใต้อุณหภูมิประมาณ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส และความดันประมาณ 30 ถึง 130 บรรยากาศร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยากลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลฟิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 4.9 (Daage และคณะ, 1994) ชั้นแรกกำมะถันที่อยู่บนตำแหน่งของ MoS_2 จะทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนกลายเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งทำให้พื้นผิวของโมลิบดีนัมไม่เสถียรจึงสามารถไปเกิดพันธะกับสารประกอบกำมะถันในน้ำมัน เช่น ไทโอเฟน เบนโซไทโอเฟน เป็นต้น ดังแสดงในขั้นที่ 2 และขั้นที่ 3 แก๊สไฮโดรเจนในปฏิกิริยาจะทำการแตกพันธะและการเติมพันธะทำให้ปริมาณกำมะถันในน้ำมันลดลง โดยส่วนของกำมะถันในโมเลกุลของสารประกอบกำมะถันที่อยู่ในน้ำมันจะเกิดพันธะกับตำแหน่งเดิมของกำมะถันบนโมลิบดีนัม ทำให้โมลิบดีนัมมีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลฟิเดชันต่อไปโดยผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน



รูปที่ 4.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลฟิเดชันของไทโอเฟนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา MoS_2 (Daage และ Chianelli, 1994)

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละการกำจัดกำมะถันในน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสของรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 153 องศาเซลเซียสต่ออนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการไหล 0.05 ลิตรต่ออนาที โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับกำจัดกำมะถันในน้ำมันเบา ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า निकเกิล-โมลิบดีนัมที่มีอะลูมินาเป็นตัวรองรับ (NiMo/Al₂O₃ commercial) ตัวเร่งที่เตรียมขึ้น ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-โมลิบดีนัมที่มีผงเขม่าดำเป็นตัวรองรับ (NiMo/Carbon black) และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-โมลิบดีนัมที่มีถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสของรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟที่อัตราการให้ความร้อน 153 องศาเซลเซียส เวลาในการไพโรไลซิส 10 นาที เป็นตัวรองรับ (NiMo/Char) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rodriguez (1995) และ Radovic และคณะ (1997) ที่กล่าวว่าคาร์บอนสามารถทำหน้าที่เป็นตัวรองรับที่เหมาะสม โดยถ่านชาร์ที่นำมาเป็นตัวรองรับนั้นมีพื้นที่ผิว 76.2 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุน 139 อังสตรอม และปริมาตรรูพรุน 0.26 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุนของตัวรองรับ และความหนาแน่นรวมของตัวเร่ง ปฏิกิริยาทางการค้า และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น โดยมีนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และโมลิบดีนัมร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก

ชนิดของตัวรองรับ และตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิว (ตารางเมตร/กรัม)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์ เซนติเมตร/กรัม)	ความหนาแน่นรวม (กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร)
ถ่านชาร์	76.2	139	0.26	-
ผงเขม่าดำ	37.8	108	0.17	-
นิกเกิล-โมลิบดีนัม/อะลูมินา (NiMo/Al ₂ O ₃)	244.9	84	0.51	0.75
นิกเกิล-โมลิบดีนัม/ถ่านชาร์ (NiMo/Char)	62.5	96	0.19	0.54
นิกเกิล-โมลิบดีนัม/ผงเขม่าดำ (NiMo/CB)	20.3	66	0.10	0.85

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดกำมะถัน คือ 4 และ 10 กรัม โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น คือ NiMo/Carbon black และ NiMo/Char และตัวเร่งปฏิกิริยา (NiMo/Al₂O₃ commercial) ประกอบด้วยโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 และโมลิบดีนัมร้อยละ 16 กระบวนการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ลดปริมาณกำมะถันในขั้นตอนกระบวนการไพโรไลซิส โดยนำผงยางรถยนต์ และตัวเร่งปฏิกิริยาใส่ลงในควอซ์ตลับตัวยูใส่ลงในเครื่องไมโครเวฟ โดยตำแหน่งในการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่สูงจากระดับของยางรถยนต์ที่ใส่ในควอซ์เป็นระยะ 3 เซนติเมตร ทำการไพโรไลซิสที่ภาวะอัตราการให้ความร้อน 153 องศาเซลเซียสต่อ นาที อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการไหล 0.05 ลิตรต่อนาที ไอลของสารระเหยที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุอยู่ในหลอดรูปตัวยู และไอที่เกิดขึ้นถูกควบแน่นได้เป็นน้ำมันเบาที่ผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยานำไปวิเคราะห์หาปริมาณกำมะถันรวม และปริมาณกำมะถันที่มีอยู่ในน้ำมันเบาที่ผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับปริมาณกำมะถันที่อยู่ในน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสเริ่มต้นภายใต้ภาวะในการไพโรไลซิสแบบเดียวกัน ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.9

เมื่อพิจารณาร้อยละการกำจัดกำมะถันในน้ำมันเบาเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Char เพิ่มขึ้นจาก 4 กรัมเป็น 10 กรัม แสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่าร้อยละการกำจัดกำมะถันในน้ำมันเบาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Char มีองค์ประกอบของโมเลกุลกำมะถันอยู่ภายในโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่แล้ว เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Char สัมผัสกับแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นภายในระบบการไพโรไลซิส โมเลกุลของกำมะถันเหล่านั้นจึงอาจจะถูกกระตุ้นจากแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันซึ่งคล้ายกับปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันตามกลไกที่แสดงในงานวิจัยของ Daage และ Chianelli (1994) ดังนั้นปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Char ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดกำมะถันในน้ำมันเบาเพิ่มขึ้นตามปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

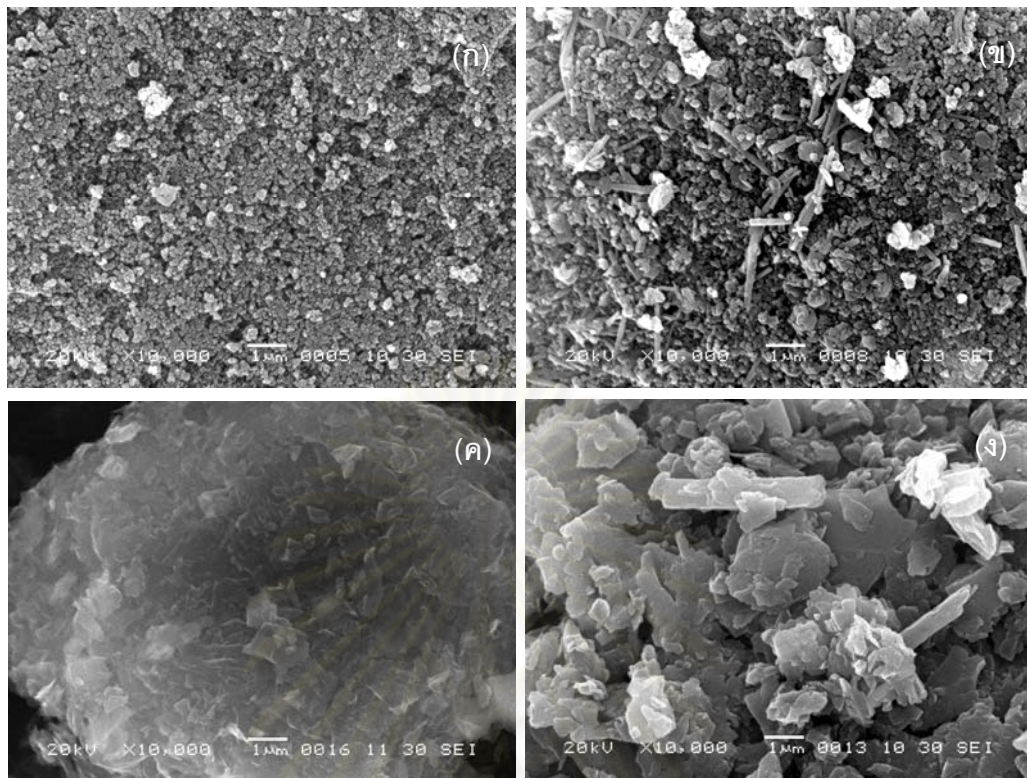
ตารางที่ 4.9 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า NiMo/Al₂O₃ ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Char และตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Carbon black ต่อการลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันเบาที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)	ร้อยละโดยน้ำหนักของการกำจัดกำมะถันในน้ำมันเบา		
	NiMo/Al ₂ O ₃	NiMo/Char	NiMo/CB
4.0	20.6	14.5	8.4
10.0	31.9	16.2	3.9

ภาวะที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส : 153 องศาเซลเซียสต่อนาที 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการไหลของแก๊ส 0.05 ลิตรต่อนาที

4.7.2 สัณฐานวิทยาของถ่านชาร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

จากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านชาร์ ผงเขม่าดำ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังรูปที่ 4.10 พบว่าหลังจากนำถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ (รูปที่ 4.10 ก) มาเตรียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะสังเกตเห็นมีผลลักษณะเป็นแท่งยาวกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของถ่านชาร์ คือ โลหะนิกเกิลและโมลิบดีนัม (รูปที่ 4.10 ข) ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวที่ได้จากการวัดการดูดซับ-การคายแก๊สไนโตรเจนด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน แสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่าเมื่อนำถ่านชาร์มาเตรียมเป็นตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ตัวเร่งที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาณรูพรุนน้อยกว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิส ผลที่ได้คล้ายคลึงกับการนำผงเขม่าดำ (รูปที่ 4.10 ค) มาเตรียมเป็นตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม (รูปที่ 4.10 ง) แต่เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของถ่านชาร์เทียบกับผงเขม่าดำ จากภาพเห็นได้ว่าผงเขม่าดำมีลักษณะพื้นผิวมีความเป็นรูพรุนที่น้อยกว่าถ่านชาร์ผลที่ได้สอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวที่ได้จากการวัดการดูดซับ-การคายแก๊สไนโตรเจนด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน แสดงในตารางที่ 4.8 ดังนั้นเมื่อนำผงเขม่าดำมาเตรียมเป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมทำให้ความสามารถในการกำจัดกำมะถันในน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนถ่านชาร์



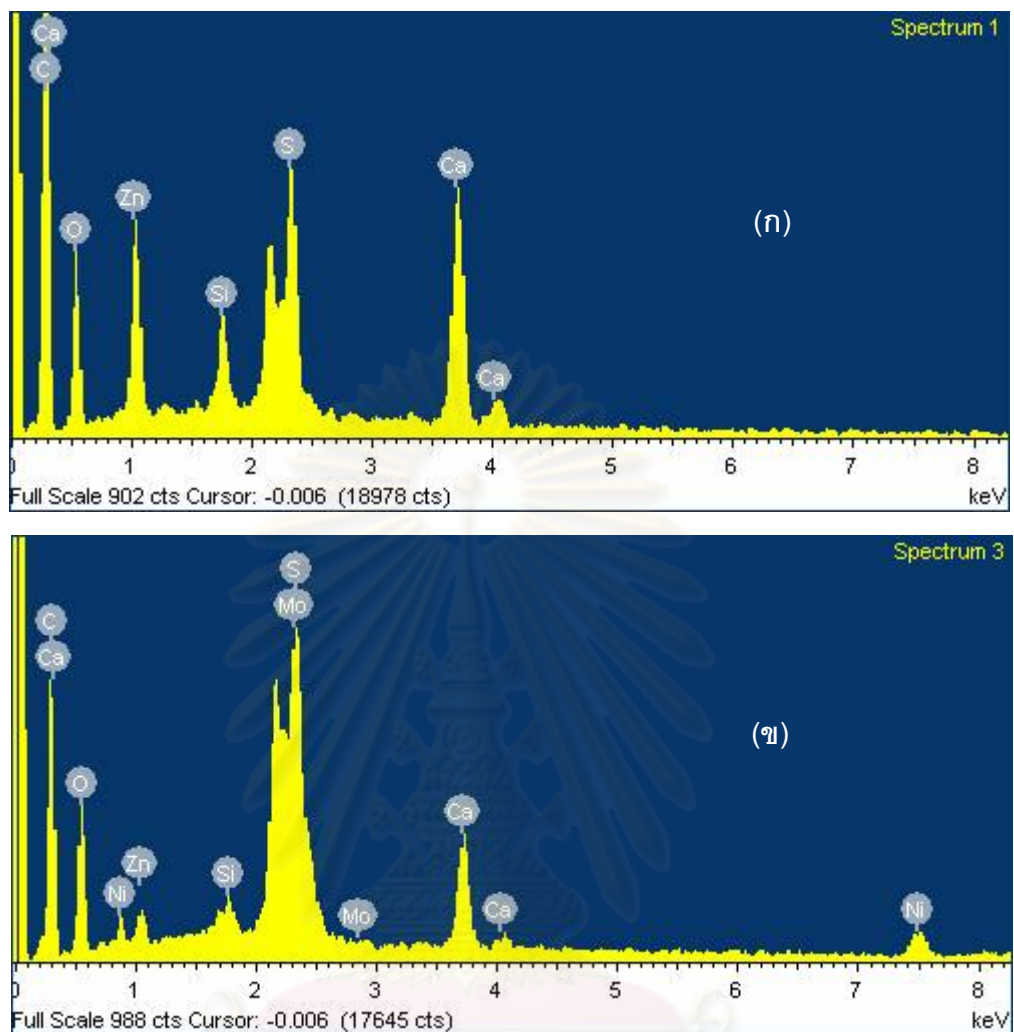
รูปที่ 4.10 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของ (ก) ถ่านชาร์ (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-โมลิบดีนัมบนถ่านชาร์ (ค) ผงเขม่าดำ (ง) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-โมลิบดีนัมบนผงเขม่าดำ

ตารางที่ 4.10 ร้อยละโดยน้ำหนัก และร้อยละโดยอะตอมของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมนิกเกิลและโมลิบดีนัมที่เตรียมโดยมีตัวรองรับที่เป็นถ่านชาร์และผงเขม่าดำ

ชนิดของ ตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วนโลหะ ผสม Ni : Mo (โดยน้ำหนัก)	การวิเคราะห์ EDS		
		ร้อยละโดย น้ำหนักของ Ni : Mo	ร้อยละโดย อะตอมของ Ni : Mo	ร้อยละของ โลหะผสม
นิกเกิล-โมลิบดีนัม/ถ่านชาร์	5 : 16	5.71 : 14.66	1.46 : 2.62	20.37
นิกเกิล-โมลิบดีนัม/ผงเขม่าดำ		4.28 : 15.36	1.00 : 2.73	19.64

จากตารางที่ 4.10 เมื่อพิจารณาร้อยละโดยน้ำหนักของโลหะผสมบนตัวรองรับคาร์บอนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียม คือ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนถ่านชาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนผงเขม่าดำ ที่อัตราส่วนระหว่างนิกเกิลและโมลิบดีนัมร้อยละ 5:16 โดยน้ำหนัก พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมทั้งสองชนิดได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนถ่านชาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนผงเขม่าดำ มีร้อยละโดยน้ำหนักของปริมาณโลหะผสมบนตัวรองรับเท่ากับ 20.37 และ 19.45 ตามลำดับ ซึ่งค่าจริงที่ควรเตรียมได้ คือ ร้อยละ 21 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเกิดการสูญเสียร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาไปในขั้นของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDS) ของถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนถ่านชาร์ สเปกตรัมแสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟที่นำมาเป็นตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยามีองค์ประกอบของธาตุ ได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน ซิลิกอน กำมะถัน แคลเซียม และสังกะสี (รูปที่ 4.11 (ก)) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ San และคณะ, 1998 ที่ซึ่งพบว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วประกอบไปด้วยผงเขม่าดำ และสารผสมของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบของยาง เช่น พอลิเมอร์ยางถูกเปลี่ยนโดยใช้ความร้อนกลายเป็นคาร์บอน และไฮโดรคาร์บอนที่ไม่สามารถระเหยได้แล้ว และมีปริมาณของสารเติมแต่งที่ถูกเติมในยางรถยนต์ค่อนข้างน้อย เช่น สังกะสี กำมะถัน ดินเหนียว และซิลิกา หรือโลหะออกไซด์ เนื่องจากในยางรถยนต์ใช้แล้วที่นำมาไพโรไลซิสประกอบไปด้วยวัสดุคาร์บอนซึ่งมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ และองค์ประกอบอื่น ๆ ได้แก่ ผงเขม่าดำ น้ำมันเอ็กเทนเดอร์ ซึ่งเป็นสารผสมของอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน กำมะถัน และตัวเร่ง สารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ และกรดเสตีียริก (Cypres และคณะ, 1989 Williams และคณะ, 1995 และ Williams, 2005) และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยมีถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสมาเป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม (รูปที่ 4.11 (ข)) พบว่าสเปกตรัม EDS ปრაกฏฟิคของนิกเกิล และโมลิบดีนัม จึงสามารถยืนยันได้ว่าในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมมีองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมอยู่จริง และค่าร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนถ่านชาร์ที่เตรียมขึ้นแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.11 สเปกตรัม EDS ของ (ก) ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟที่อัตราการให้ความร้อน 153 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในการไพโรไลซิส 10 นาที และ (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนถ่านชาร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติยางรถยนต์

ยางรถยนต์ที่ใช้แล้วประกอบด้วยสารระเหยร้อยละ 64 และมีความชื้นต่ำ ร้อยละ 0.34 ยางรถยนต์ที่ใช้แล้วมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด คือ 383 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติโดยยางรถยนต์ที่ใช้แล้วมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีค่าความร้อนสูงประมาณ 35 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

5.1.2 ศึกษาผลของการปรับระดับกำลังไฟฟ้าหน้าเครื่องไมโครเวฟต่ออุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนของกระบวนการไพโรไลซิส

ระดับพลังงานไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิสูงสุดของยางรถยนต์ที่ใช้แล้วในหลอดรูปตัวยูเพิ่มขึ้นตามด้วย ดังนั้นจึงเลือกภาวะที่ใช้ในการไพโรไลซิสยางรถยนต์ที่ใช้แล้วที่มีอุณหภูมิสูงสุดที่สูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว คือ กำลังไฟฟ้าหน้าเครื่องไมโครเวฟ 450 – 700 วัตต์ และภาวะที่ให้อัตราการให้ความร้อนที่สูง คือ อัตราการให้ความร้อนอยู่ในช่วง 102 – 330 องศาเซลเซียส

5.1.3 ศึกษาผลของอัตราการให้ความร้อนและเวลาในการไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

เมื่อทำการไพโรไลซิสยางรถยนต์ที่ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟที่อัตราการให้ความร้อนตั้งแต่ 102 ถึง 330 องศาเซลเซียสต่อเวลาที่ เป็นเวลา 10 ถึง 25 นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหลของแก๊สคือ 0.05 ลิตรต่อ นาที พบว่าภาวะของการไพโรไลซิสยางรถยนต์ที่ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ของของเหลวให้ได้ในปริมาณมากที่สุดร้อยละ 50 คือ

ที่อัตราการให้ความร้อน 102 องศาเซลเซียสต่อนาที ระยะเวลาในการไพโรไลซิส 25 นาที

- 5.1.4 ศึกษาผลของอัตราการให้ความร้อนและเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยรังสีไมโครเวฟต่อค่าความร้อนและสมบัติของน้ำมันเบาและถ่านชาร์

ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่อยู่ในถ่านชาร์ที่อัตราการให้ความร้อน ตั้งแต่ 102 ถึง 330 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 10 ถึง 25 นาที พบว่าเวลาของการไพโรไลซิสสั้น ๆ และอัตราการให้ความร้อนต่ำ ผลิตภัณฑ์ของของแข็งที่มีสารระเหยง่าย (Volatile matter) ในปริมาณสูง (ร้อยละ 48.72) คาร์บอนคงตัว และเถ้าต่ำ (ร้อยละ 35.62 และ 15.66 ตามลำดับ) ส่งผลให้ถ่านชาร์มีค่าความร้อนสูง (31.1 กิโลจูลต่อกรัม) และที่อัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นแต่เวลาของการไพโรไลซิสสั้น ๆ ค่าความร้อนของถ่านชาร์มีค่าลดลง (25.4 กิโลจูลต่อกรัม) ส่วนค่าความร้อนของน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟมีค่าประมาณ 41 กิโลจูลต่อกรัม

- 5.1.5 เอลักษณะของน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสของยางรถยนต์ที่ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ

เมื่อแบ่งองค์ประกอบของน้ำมันตามจุดเดือด พบว่าน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟมีสมบัติการแจกแจงจุดเดือดอยู่ในช่วงของน้ำมันแก๊สโซลีน และน้ำมันดีเซล โดยน้ำมันเบาที่ได้สามารถนำไปกลั่นเป็นน้ำมันดีเซลและแก๊สโซลีนในปริมาณร้อยละ 42 และ 48 โดยน้ำหนักตามลำดับ ส่วนการกระจายตัวขององค์ประกอบที่อยู่ในน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ พบว่าจำนวนของแนฟทาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 27.4 ถึง 45.7 โดยน้ำหนัก ตามอัตราการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้นจาก 48 ถึง 153 องศาเซลเซียส ขณะที่กากคาร์บอนมีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก ไปเป็นประมาณร้อยละ 22 โดยน้ำหนัก ตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการให้ความร้อน

5.1.6 ศึกษาผลของอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

เมื่อทำการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟภายใต้อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 153 233 และ 330 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศในโตรเจนที่อัตราการไหลของแก๊ส คือ 0.05 ลิตรต่อนาที พบว่าที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง ส่วนร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น อย่างเห็นได้ชัดในขณะที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สไม่แตกต่างกันมากนัก และพบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันมากที่สุดร้อยละ 53.1 ที่อัตราการให้ความร้อน 153 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิของการไพโรไลซิส 400 องศาเซลเซียส

5.1.7 ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟเปรียบเทียบกับการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

การไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วโดยการให้ความร้อนแบบธรรมดากับการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วโดยการให้ความร้อนโดยพลังงานไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิในการไพโรไลซิส 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อไพโรไลซิสด้วยความร้อนแบบธรรมดานั้น ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ต่ำกว่ากว่าการใช้พลังงานไมโครเวฟ เนื่องจากการให้ความร้อนแบบธรรมดานั้นเวลาที่ใช้สำหรับการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วนานกว่าเพราะต้องเสียเวลาในขั้นตอนการให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ แต่ในการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟนั้นไม่ต้องเสียเวลาในขั้นตอนนี้ การไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยพลังงานไมโครเวฟ ภาวะที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันมากที่สุด คือ ที่อุณหภูมิของการไพโรไลซิส 400 องศาเซลเซียส ร้อยละ 53.1 นอกจากนี้ยังพบว่าการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟสามารถประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้มากถึง 33 เท่าเมื่อเทียบกับการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไป

- 5.1.8 ศึกษาวิธีการไพโรไลซิสต่อค่าความร้อนในผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์และการกระจายตัวของกำมะถันในผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปและด้วยไมโครเวฟ พบว่าค่าความร้อนของถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปน้อยกว่าถ่านชาร์ที่ได้จากไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ และพบว่าการไพโรไลซิสด้วยความร้อนทั่วไปมีการกระจายตัวของกำมะถันในถ่านชาร์และน้ำมันน้อยกว่าการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ แต่มีการกระจายตัวของกำมะถันในผลิตภัณฑ์แก๊สมากกว่าการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ

- 5.1.9 ศึกษาการลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยไมโครเวฟโดยใช้ถ่านชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิส

ถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์อีกชนิดหนึ่งที่ได้จากการไพโรไลซิสถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการลดปริมาณกำมะถัน โดยการเตรียมเป็นตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ภาวะที่ใช้ คือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 153 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Char 10 กรัม สามารถกำจัดกำมะถันในน้ำมันเบาที่ได้จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วร้อยละ 16.2

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ยังมีปริมาณกำมะถันที่สูงกว่ามาตรฐาน ดังนั้นจึงต้องเพิ่มกระบวนการอื่นในการลดปริมาณกำมะถัน เช่น การปรับปรุงสมบัติพื้นฐานของตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ได้แก่ ถ่านชาร์ โดยการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดไนตริกหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อให้ประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันดีขึ้น
- 5.2.2 ส่วนของผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์อาจนำมาเพิ่มคุณค่าโดยทำเป็นถ่านกัมมันต์ หรือใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป
- 5.2.3 ส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สอาจนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ แต่ต้องกำจัดแก๊สไฮโดรซัลไฟด์หรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สที่มีผลเสียกับกระบวนการและสิ่งแวดล้อมก่อน

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กัมปนาถ ปราศราคี. **เชื้อเพลิงสะอาดจากยางรถยนต์ใช้แล้วโดยวิธีดำเนินการสองขั้น: ไฮโดรดิซัลเฟอไรเซชันและไพโรไลซิส.** วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- กฤติยา เสือสีนาค. **การดูดซับแก๊สโพรเพนด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์.** วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
- จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. **การเร่งปฏิกิริยา พื้นฐานและการประยุกต์.** กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.
- ชูศักดิ์ โภคะนุทรานนท์. **การคาร์บอนไนซ์แกลป์ในฟลูอิดเบด.** วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
- บุญรักษ์ กาญจนวรรณิชย์. **ยางรถยนต์.** ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2547.
- ปรโมทย์ ไชยเวช และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. **ปิโตรเลียมเทคโนโลยี.** พิมพ์ครั้งที่ 1, 2543.
- ปรโมทย์ ไชยเวช. **ปิโตรเลียมเทคโนโลยี.** พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. **พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ.** พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. **สารเคมียาง.** พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), 2548.
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. **ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน.** พิมพ์ครั้งที่ 2. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), 2548.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. **สารเคมีสำหรับยาง.** คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2528.
- มณฑิไล แห่งทรัพย์เจริญ. **จลนพลศาสตร์การขจัดกำมะถันในถ่านหินด้วยกระบวนการเมเยอร์.** วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
- แมน อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2535.

เขาวนาฏ ยกรัตน์. การลดสารกำมะถันในน้ำมันดีเซลโดยกระบวนการออกซิเดชันและสกัดด้วยตัวทำละลาย. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2544.

รัชดา ไสภาคะยัง. การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการทำความร้อนยาง.

(Application of Microwave Energy for Rubber Heating) [Online].

Available from: <http://e-nett.sut.ac.th/download/AE/AE21.pdf> [2005, May.11-13].

รงค์พะงา ศรีวรรณ. ไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันของสารกลุ่มเบนโซไทโอพีน เร่งปฏิกิริยาด้วยไมลิตินัม/โคบอลต์/รูทีเนียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

สำนักเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. การผลิตยางนอกสำหรับยานยนต์. กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548.

เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร. เทคโนโลยีของยาง. พิมพ์ครั้งที่ 1, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

ศิริรัตน์ จิตการคำ. การนำยางรถยนต์ที่ใช้แล้วมาเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ตั้งต้นที่มีคุณค่าโดยกระบวนการไพโรไลซิส. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

พลังงาน, กระทรวง. กรมธุรกิจพลังงาน. สำนักนโยบายและแผนพลังงาน. มาตรฐานคุณภาพน้ำมันดีเซล. กระทรวงพลังงาน, 2550.

พลังงาน, กระทรวง. กรมธุรกิจพลังงาน. สำนักนโยบายและแผนพลังงาน. มาตรฐานคุณภาพน้ำมันเบนซิน. กระทรวงพลังงาน, 2551.

พลังงาน, กระทรวง. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) [ออนไลน์].

แหล่งที่มา: <http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=331>. [2552, พฤษภาคม 21].

วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. คะตะไลซิสแบบเฮเทอโรจีเนียส: หลักทฤษฎีและการประยุกต์.

กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.

อุบลรัตน์ ลิ้มประภาศิริกุล. การแจกแจงผลิตภัณฑ์และพฤติกรรมของกำมะถันระหว่างการไพโรไลซิส. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

ภาษาอังกฤษ

Acikgoz, C., Onay, O. and Kockar, O.M. Journal of Analysis Application Pyrolysis 71 (2004): 417.

Alliger, G. and Sjothun, I.J. Vulcanization of Elastomer. Reinhold Publishing Co. (1963).

- Ariyadejwanich, P., Tanthapanichakoon, W., Nakagawa, K., Mukai, S. R., Tamon, H. Preparation and characterization of mesoporous activated carbon from waste tires. **Carbon** 41 (2003): 157-164.
- Babich, I. V. and Moulijn, J.A. Science and Technology of Novel Process for Deep Desulfurization of Oil Refinery Stream: a Review, **Fuel** 82 (2003): 607–631.
- Ben, C.M., Lallemand, M. and Mokhlisee, A. Pyrolysis of Timahdit, Morocco, oil shales under microwave field. **Fuel** 73(10) (2000): 1643-9.
- Bilali, L., Benchanaa, M., El harfi, K., Mokhlisse, A. and Outzourhit, A. A detailed study of the microwave pyrolysis of the Moroccan(Youssoufia) rock phosphate. **Journal of Analysis Application Pyrolysis** 73 (2005): 1-15.
- Bridgwater, A.V., Grassi, G., Gosse, G. and Santos, G. Biomass pyrolysis technologies. **Biomass for Energy and Industry**. Elsevier Applied Science, London (1990).
- Bridgwater, A.V., Meier, D., and Radlein, D., *Org. Geochem.* 30 (1999): 1479.
- Chang, Y. M. On pyrolysis of waste tire: degradation rate and product yields. **Resource, Conversion and Recycling** 17 (1996): 125-139.
- Chang, S. H., and Paul, R. R. **Practical Advances in Petroleum Processing**. Vol.1. USA: Springer Science and Business Media, Inc. (2006).
- Charles, N. S. **Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice**. New York: McGraw – Hill, (1991).
- Cristol, S., Paul, J.F., Payen, E., Bougeard, D., Hafner, J. and Hutschka, F. Theoretical study of benzothiophene hydrodesulfurization on MoS₂. *Stud. Surface Science Catalalyst*. 127 (1999): 327-334.
- Cunliffe, A.M.; Williams, P.T., Influence of process conditions on the rate of activation of chars derived from the pyrolysis of used tyres. **Energy & Fuels** 13 (1999): 166-175.
- Cypress, R., Bettens, B. Production of benzoles and active carbon from waste rubber and plastic materials by means of pyrolysis with simultaneous port-cracking. In: Ferrero, G.L., Maniatis, K., Buekens, A., Bridgwater, AV., editors. **Pyrolysis and gasification**. London: Elsevier Applied Science. (1989): 209-29.
- Daage, M., Chianelli, R. R. Structure-function relations in molybdenum sulfide catalysts - the "Rim-Edge" model. **Journal of Catalysis** 149 (1994): 414-427.

- Dielectric Constants Chart. [Online]. Available from :
<http://www.asinstr.com/technical/Dielectric%20Constants.htm> [2010, Mar. 14]
- Dominguez, A., Menendez, J.A., Inguanzo, M. And Pis, J.J. Investigations into the characteristics of oils produced from microwave pyrolysis of sewage sludge. **Fuel Processing Technology** 86 (2005): 1007-1020.
- Dominguez, A., Menendez, J.A., Inguanzo, M. and Pis, J.J. Production of bio-fuels by high temperature pyrolysis of sewage sludge using conventional and microwave heating, **Bioresource Technology** 97 (2006) 1185-1193.
- Dominguez, A., Menendez, J.A., Fernandez, Y., Pis, J.J., Valente Nabais, J.M., Carrott, P.J.M. Carrott. and Ribeiro Carrott, M.M.L. Conventional and microwave induced pyrolysis of coffee hulls for the production of a hydrogen rich fuel gal. **Journal of Analysis Pyrolysis** 79 (2007): 128-135.
- Farag, H., Whitehurst, D.D., Sakanishi, K. and Mochida, I. Carbon versus alumina as a support for Co±Mo catalysts reactivity towards HDS of dibenzothiophenes and diesel fuel, **Catalysis Today** 50 (1999): 9-17.
- Fukumori, K., Mutsushita, M., Odamoto, H., Sato, N., Suzuki, Y. and Takeuchi, K. Recycling Technology of Tire Rubber. *JSAE Review*, 23 (2003): 259-264.
- Gissy, H. and Bartsch, R. **Journal Catalayst** 65(1), (1980):158-165.
- Grange, P. **Catal. Rev-Sci. Eng.** 21 (1980): 135
- Hagen, J. **Industrial Catalysis**. New York: Wiley – VCH (1999).
- Harold, H. S. **The Chemistry of Hydrocarbon Fuel**. New York. (1991).
- El harfi, K., Mokhlisse, A., Chanaa, M.B. and Outzourhit, A. Pyrolysis of the Moroccan (Tarfaya) oil shales under microwave irradiation, **Fuel** 79 (2000): 733-742.
- Hills, D.A. **Heat Transfer and Vulcanisation of Rubber**, Elsevier Publishing Co.Ltd., New York, (1971).
- Holland, K.M. Patent US 5387321, February 7 (1995)
- Huang Y.F., Kuan, W.H., Lo, S.L. and Lin, C.F. Total recovery of resource and energy from rice straw using microwave-induced pyrolysis. **Bioresource Technology** 99 (2008): 8252-8248.
- James, E.M., Burak, E. and Frederick, R.E. **Science and Technology of Rubber**. Academic Pree Inc. (1994).

- Ji-lu, Z. Bio-oil from fast pyrolysis of rice husk: Yields and related properties and improvement of the pyrolysis system. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 80 (2007): 30-35.
- Jones, D.A., Lelyveld, T.P., Mavrofidis, S.D. and Kingman, S.W. Microwave heating applications in environmental engineering a review, **Resources, Conservation and Recycling** 34 (2002): 75–90.
- Kabe, T., Ishihara, A., Qian, W. Hydrodesulfurization and Hydrodenitrogenation, Tokyo+ Wiley-VCH, (1999): 34-35.
- Kaminsky, W., Rossler, H. Olefins from wastes. *Chemtech* (1992) : 108.
- Kohan, S. M. and Barkhordor, P.M. Mission. Analysis for Federal Fuels Biomass Program. **Thermochemical Conversion of Biomass to Fuels and Chemistry. Production of Oil and Char Pyrolysis of Wood. Vol.4.** January (1979).
- Koizumi, N., Jung, S., Hamabe, Y. and Suzuki, H. Investigation of Surface Site of Ni Species on NiMo/Al₂O₃ Hydrodesulfurization Catalyst Sulfided at High-Pressure by Means of DRIFTS Combined With Low-Temperature NO Adsorption. **Department of Applied Chemistry, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Aoba 6-6-07, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan, (2010)**
- Kogan, V.M., Roahdestvenskaya, N.N. and Korshevets, I.K. Radioisotopic study of CoMo/Al₂O₃ sulfide catalyst for HDS. Part I. Active site monitoring. **Appl. Catal. A-Gen.**, 234 (2002): 207-219.
- Kogan, V.M., and Rozhdestvenskaya, N.N. 35S Tracer Study of the Effect of Support on the Nature of the Active Sites of Co(Ni)Mo Sulphide Catalysts Supported on Al₂O₃ and Activated Carbon. **Oil & Gas Science and Technology-Rev.IFP, Vol 61** (2006): 547-559.
- Kriegerbrockett, B. Microwave pyrolysis of biomass. **Res Chem Intermed** 20(1) (1994): 20-7.
- Landau, M. V. Deep hydrotreating of middle distillates from crude and shale oils. **Catalysis Today** 36 (1997): 393–429.
- Laresgoiti, M. F., Caballero, B.M., Marco, I. Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 71 (2004): 917-934.

- Leon, C. A. and Radovic, L. R. Interfacial Chemistry and Electrochemistry of Carbon Surfaces. **Chemistry and Physics of Carbon**. Vol 24. (1994): 213-310.
- Leung, D.Y.C., Yin, X.L., Zhao, Z.L., Xu, B.Y. and Chen, Y. Pyrolysis of tire powder: influence of operation variables on the composition and yields of gaseous product. **Fuel Process Technol** 79,(2) (2002): 141-55.
- Li, S., Xu, S., Liu, S., Yang, C. And Lu, Q. **Fuel Process. Technol.** 85 (2004): 1201-1211.
- Ludlow-Palafox, C. and Chase, H.A. Microwave Pyrolysis of Plastic Wastes, Department of Chemical Engineering. University of Cambridge, New Museums Site, Pembroke Street, Cambridge CB2 3RA, UK ,(2001): 570-594.
- Lwasaki, W. **Int. J. Hydrogen Energy** 28 (2003): 939-944.
- Ma, X. L., Sakamishi, K., Mochida, I. Hydrodesulfurization Reactivities of Various Sulfur Compounds in Vacuum Gas Oil. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 35 (1996): 2487.
- Mackillop, D. A., Myhre, M. Rubber recycling, **Rubber Chemistry and Technology** 75 (2002): 429-474.
- Marek, A.W., Michael, A.S. Pyrolysis of scrap tires. **Chemtech** Vol.26 (1996): 48.
- Marek, A.W. The Manufacture of Carbon Black from Oils Derived from Scrap Tires. EPA 68D98117.
- Mark, H. F. **Encyclopedia of polymer science and technology**, 3rd ed. USA: Wiley&Sons, 2004.
- Matlson, J. S. and Mark, V. B. **Active Carbon Surface Chemistry and Adsorption from Solution**, New York: Marcel Dekker, 1971.
- Mei, H., Mei, B. W., Yen, T. F. A new method for obtaining ultra-low sulfur diesel fuel via ultrasound assisted oxidative desulfurization. **Fuel** 82 (2003): 405.
- Menendez, J.A., Inguanzo, M. And Pis, J.J. Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge. **Water Research** 36. (2002): 3261-3264.
- Menendez, J.A., Dominguez, A., Inguanzo, M. and Pis, J.J. Microwave pyrolysis of sewage sludge: analysis of the gas fraction. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 71 (2004): 657-667.

- Menendez, J.A., Dominguez, A., Inguanzo, M. and Pis, J.J. Microwave-induced drying, pyrolysis and gasification (MWDPG) of sewage sludge: Vitrification of the solid residue. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 74 (2005): 406-412.
- Merrick, D. **Coal Combustion and Conversion Technology**. London: Macmillan Publishers Ltd., (1984).
- Michael, B. **Scrap Tires Fuel U.S. Cement Industry**. Jul 1, (2004).
- Miura, M., Kage, V., Sakurai, A., Kakuchi, T., Takahashi, K. Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating, **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 71 (2004): 187-199.
- Moon, J. and Ihm, S.K. **Applied Catalyst** 42(2). (1988): 307-324
- Monsef-Mirzai, P., Ravindran, M., McWhinnie, W.R., Burchill, P. Rapid microwave pyrolysis of coal. **Fuel** 74(1) (1995): 20-7.
- Morita, K., and Sano, N. in: **Proceedings of the Global Symposium on Recycling. Waste Treatment and Clean Technology**, Vol.2 (1999): 1583.
- Mourao, M.B., I.P. de Carvalho Jr., Et.C. Takano, ISIJ Int. 41 (2001).
- Murena, F. Kinetics of sulphur compounds in waste tyres pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 56 (2000): 195-205.
- Murillo, R., Aylon, E., Navarro, M.V., Callen, M.S., Aranda, A. and Mastral, A.M. The application of thermal processes to valorize waste tyre. **Fuel Processing Technology** 87 (2006): 143-147.
- Nema, S.K. and Ganeshprasad, K.S. Plasma pyrolysis of medical waste. **Current Science**, Vol. 83 (10) (2002):271-278.
- Obemberger, I. **Biomass Bioenergy** 14 (1998): 33.
- Prins, R., in: Ertl, G., Knozinger, H., and Weitkamp, J. **Handbook of Heterogenous Catalysis**, VCH, Weinheim (1997): 1908.
- Radovic, L. R., Rodriguez-Reinoso, F., Thrower, P. A. **Chemistry and Physics of Carbon**, Vol. 25, Marcel Dekker, New York, (1997): 243.
- Radovic, L. R. and Sudhakar, C. Introduction to Carbon Technologies, ed. H. Marsh, E.A. Heintz and F. Rodriguez-Reinoso. Secretariado de Publicaciones, University of Alicante, Alicante, Spain, (1997): 107.

- Raseev, S. *Thermal and Catalytic Processes in Petroleum Refining*. New York: Marcel Dekker. (2003)
- Robinson, W.R.A.M., Van Veen, J.A.R., De Beer, V.H.J., Van Santen, R.A. Development of deep hydrodesulfurization catalysts CoMo and NiMo catalysts tested with (substituted) dibenzothiophene, *Fuel Processing Technology* 61 (1999): 89–10.
- Rodriguez-Reinoso, F. Porosity in Carbon: Characterization and Applications, ed. J. W. de Patrick. Edward Arnold, London, (1995): 253.
- Rodriguez-Reinoso, F., Marsh, H. and Heintz, E. A. Introduction to Carbon Technologies. Secretariado de Publicaciones, University of Alicante, Alicante, Spain, (1997): 35.
- Rodriguez-Reinoso, F. The role of carbon materials in heterogeneous catalysis. *Carbon* 36 (1998): 159-175.
- Rodriguez, I.M., Laresgoiti, M.F., Cabrero, M.A., Torres, A., Chomon, M.J. and Cabalero, B. Pyrolysis of scrap tyres. *Fuel Processing Technology* 72 (2001): 9-22.
- Rofiqul, M.R., Tushar, M.S.H.K., Tushar and Haniu, H. Production of liquid fuel and chemicals from pyrolysis of Bangladeshi bicycle/rickshaw tire waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 82 (2008): 96-109.
- Sakanishi, K., Nagamatsu, T., Mochida, I., Whitehurst, D.D, *Journal of Catalyst Chemical* 155 (2000): 101.
- San Miguel, G., Fouler, G.D. and Sollans, C.J. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 37 (1998): 2430-2435.
- Satterfield, C. N. *Heterogenous Catalysis in Practice*. McGraw-Hill, New York, (1980).
- Sakanishi, K., Nagamatsu, T., Mochida, I. And Whitehurst, D.D. Hydrodesulfurization kinetics and mechanism of 4,6-dimethyldibenzothiophene over NiMo catalyst supported on carbon. *Journal of Melecular Catalysis A: Chemical* 155 (2000): 101-109.
- Sakanishi, K., Farag, H., Kouzu, M., Sugimoto, Y. and Saito, I. Design of Novel Carbon-Supported NiMo and Non-Supported Mo Sulfide Catalysts for Ultra-Deep Hydrodesulfurization of Gas oil, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Ibaraki 305-8569, Japan

- Savova, D., Apak, E., Ekinci, E., Yardim, F., Petrov, N. and Razigorova, M. **Biomass Bioenergy** 21 (2001): 133.
- Schweiger, H., Raybaud., P., Kresse, G. and Toulhoat, H. Shape and edge sites modifications of MoS₂ catalytic nanoparticles induced by working conditions: A theoretical study. **Journal of Catalyst** 207 (2002): 76-87.
- Schweiger, H., Raybaud., P. and Toulhoat, H. Promoter sensitive shapes of Co(Ni)MoS nanocatalysts in sulfo-reductive conditions. **Journal of Catalalyst** 212 (2002): 33-38.
- Seader, J. D. and Ernest, J. H. **Separation Process Principles**. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. (1998).
- Shafizadeh, F., Sarkanen, K.V., Tillman, D.A. and Jahn, E.C. Chemistry of pyrolysis and combustion of wood. **Progress in Biomass Conversion**, Academic Press, London (1982).
- Shafizadeh, F., Sarkanen, K. V., Tilman D. A. and Jahn, E. C. **Progress in Biomass Conversion**. (1982).
- Shafizadeh, F., Overend, R.P., Milne, T.A. and Mudge, L.K. Pyrolytic reactions and products of biomass. **Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion**. Elsevier Applied Science, London (1985)
- Sumbogo Murti, S.D., Choi, K., Sakanishi, K., Okuma, O., Korai, Y., Mochida, I. Analysis and removal of heteroatom containing species in coal liquid distillate over NiMo catalysts. **Fuel** 84 (2005): 135-142.
- Shafizadeh, F., Sarkanen, K. V., Tilman D. A. and Jahn, E. C. **Progress in Biomass Conversion**. (1982).
- Shell. Energy in profile. The shell briefing service. No. 2 (1995).
- Te, M., Fairbridge, C., Ring, Z. Oxidation reactivities of dibenzothiophenes in polyoxometalate/H₂O₂ and formic acid/H₂O₂ systems. **Applied Catalysis. A: General** 219 (2001): 267–280.
- Tamara, S. and Mike, Bypass capacitors are critical passive components in electronic circuits. Understand how to choose, use, and apply them in a variety of realistic applications. Intersil Corp. (2007).

- Toshiaki, K., Atsushi, I. and Weihua, Q. **Hydrodesulfurization and Hydrodenitrogenation**. United States of America: Wiley-VCH, 1999.
- Tsai, W.T., Lee, M.K. and Chang, Y.M. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 76 (2006): 230.
- Ucar, S., Karagoz, S., Yanick, J., Saglam, M., Yuksel, M. Copyrolysis of scrap tires with waste lubricant oil. **Fuel Processing Technology** 87 (2005): 53-58.
- Unapumnuk, K., Keener, T.C., Lu, M. and Liang, F. Investigation into the removal of sulfur from tire derived fuel by pyrolysis. **Fuel** 87 (2008): 951-956.
- Vladimir, P.F., Jolanta, C., Roel, P. And Thomas, W. Supported molybdenum-sulfur cluster compounds as precursors for HDS catalysts. **Applied catalysis A: General** 213 (2001): 123-132.
- Wang, Y. and Yang, R.T. Desulfurization of liquid fuels by adsorption on carbon-based sorbents and ultrasound-assisted sorbent regeneration. **Langmuir** 23 (2007): 3825-3831.
- Wang, H., Prins, R. Hydrodesulfurization of dibenzothiophene and its hydrogenated intermediates over sulfided $\text{Mo}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. **Journal of Catalysis** 258 (2008): 153-164.
- Williams, P.T. and Besler S. **Fuel** 74(9) :1277-83.
- Williams, P. T. and Bottrill, R. P. Sulfur-polycyclic aromatic hydrocarbons in tyre pyrolysis oil. **Fuel** 74(5) (1995): 736-742.
- Williams, P.T., Brindle, A.J. Aromatic chemicals from the catalytic pyrolysis of scrap tyres. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 67 (2003): 143-164.
- Williams, P.T., Waste treatment and disposal. Wnd ed. London: Wiley and Sons (2005).
- Yang, T. R. **Adsorbents: Fundamentals and Applications**. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. (2003).
- Yan, R., Yang, H., Chin, T., Liang, D. T., Chen, H., Zheng, C. Influence of temperature on the distribution of gaseous products from pyrolyzing palm oil wastes. **Combustion and Flame** 142 (2005): 24-32



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า

ตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลโมลิบดีนัม

ตาราง ก1 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลโมลิบดีนัมทางการค้า

Composition	NiO/MoO ₃ on alumina oxide carrier
- Ni (W/W)	<=5
- Mo (W/W)	<=16
Form	Extrudates 2.5 mm diameter
Operating Temperature	180 – 450 °C (350 – 840 °F)
Temperature Resistance	Up to 520 °C (970 °F)
Colour	Greenish
Odour	Odourless
pH value	Approx. 6
Bulk density	Approx. 750 kg/m ³
Solubility in water	Sparingly soluble
Regeneration	Can be regenerated in situ with a steam/air mixture
Life	Up to 5 years and more depending on the application
Storage	Should be stored in a cool and dry
Handing	Avoid the contact with skin, eyes and clothing and avoid breathing the dust during filing the catalyst
LD 50	> 2000 mg/kg
LC 50	> 5000 mg/L

ภาคผนวก ข

สมบัติของผงเขม่าดำ

องค์ประกอบของผงเขม่าดำ (Carbon black)

- ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 11.9 ไมโครเมตร
- ความหนาแน่น 1.00 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ ข1 การวิเคราะห์แบบประมาณ

การวิเคราะห์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
<u>การวิเคราะห์แบบประมาณ</u>	
ความชื้น	0.03
เถ้า	0.14
สารระเหย	4.74
คาร์บอนคงตัว	95.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์หีสสมบัติของแข็ง

1. การวิเคราะห์ของแข็งแบบประมาณ (Proximate Analysis: ASTM D 3173-D 3175)

1.1 ปริมาณความชื้นในตัวอย่างของแข็ง (Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke: ASTM D 3173)

หลักการ

นำตัวอย่างของแข็งที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไอน้ำระเหยจากของแข็ง ค่าความชื้นคำนวณได้จากน้ำหนักของของแข็งที่หายไป

เครื่องมือ

1. ตู้อบ
2. ถ้วยกระเบื้อง (Porcelain Crucible) พร้อมฝาปิด
3. โถดูดความชื้น (Desiccator)

วิธีการทดลอง

1. อบถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในตู้อบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ประมาณ 15 นาที ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างของแข็งประมาณ 1 กรัม ใส่ถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาทันที บันทึกน้ำหนักตัวอย่างของแข็ง
3. นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 105-110 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง (จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างของแข็งคงที่) ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. ชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องที่มีตัวอย่างของแข็งที่อบแล้วพร้อมฝาปิด บันทึกผล

การคำนวณ

$$M = \frac{(W_1 - W_2)}{W} \times 100$$

เมื่อ M = ร้อยละของปริมาณความชื้น

W_1 = น้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดรวมน้ำหนักของแข็งเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของธาตุอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดรวมน้ำหนักของแข็งเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่างของแข็ง (กรัม)

1.2 ปริมาณเถ้าในตัวอย่างของแข็ง (Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal : ASTM D 3174)

หลักการ

นำตัวอย่างของแข็งที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ ร้อยละปริมาณเถ้าคำนวณจากน้ำหนักที่เหลืออยู่หลังจากเผา

เครื่องมือ

1. เตาเผา
2. ถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา
3. โถดูดความชื้น

วิธีการทดลอง

1. ปิดฝา และเผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างของแข็งประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาทันที บันทึกน้ำหนักตัวอย่างของแข็ง (หรืออาจใช้ตัวอย่างของแข็งที่ผ่านการอบหาความชื้นแล้ว)
3. นำถ้วยกระเบื้องที่มีตัวอย่างของแข็งพร้อมฝา เข้าเตาเผาที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องปิดฝา ค่อย ๆ ให้ความร้อนด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ทำให้อุณหภูมิของเตาเผาถึง 400-500 องศาเซลเซียส ภายใน 1 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิถึง 750 องศาเซลเซียส เมาของแข็งจนกระทั่งน้ำหนักคงที่
4. นำถ้วยกระเบื้องและฝาดูออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

การคำนวณ

$$A = \frac{(W_3 - W_4)}{W} \times 100$$

เมื่อ

A	=	ร้อยละของเถ้า
W_3	=	น้ำหนักของครุชิลเบลพร้อมฝาและเถ้า (กรัม)
W_4	=	น้ำหนักของครุชิลเบลพร้อมฝา (กรัม)
W	=	น้ำหนักของตัวอย่างของแข็ง (กรัม)

1.3 ปริมาณสารระเหยในตัวอย่างของแข็ง (Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke : ASTM D 3175)

หลักการ

นำตัวอย่างของแข็งที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร ให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อ (Tubular Furnace) ปริมาณสารระเหยคำนวณได้จากน้ำหนักของตัวอย่างของแข็งที่หายไป

เครื่องมือ

1. เตาเผาแบบท่อ
2. ครุชิลเบลทำจากนิเกิลพร้อมฝา
3. โถดูดความชื้น

วิธีการทดลอง

1. เเผาครุชิลเบลพร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
2. นำออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จนถึงอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักของครุชิลเบลพร้อมฝา บันทึกผล
3. ชั่งตัวอย่างของแข็งประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยนิเกิลที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาให้สนิทบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
4. นำถ้วยนิเกิลพร้อมตัวอย่างของแข็งเผาในเตาเผาแบบท่อ ให้ความร้อนแก่ของแข็งที่บริเวณด้านบนของเตาเผาแบบท่อนาน 3 นาที และบริเวณกลางเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส อีก 7 นาที ตามลำดับ
5. นำถ้วยนิเกิลออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักของถ้วยนิเกิลพร้อมฝาและของแข็งที่เหลือ บันทึกผล

การคำนวณ

$$V = \left(\frac{W_5 - W_6}{W} \times 100 \right) - M$$

เมื่อ	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	M	=	ร้อยละของความชื้น
	W ₅	=	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาและน้ำหนักของของแข็ง ก่อนเผา (กรัม)
	W ₆	=	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาและน้ำหนักของของแข็ง หลังเผา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักตัวอย่างของแข็งเริ่มต้น (กรัม)

1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างของแข็ง

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = \text{ร้อยละความชื้น} - \text{ร้อยละเถ้า} - \text{ร้อยละสารระเหย}$$

2. การหาค่าความร้อนของของแข็ง (Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by Adiabatic Bomb Calorimeter : ASTM D2015)

หลักการ

เผาตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สออกซิเจน ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ภายในบอมบ์จะถ่ายเทให้กับน้ำที่อยู่รอบ ๆ ค่าความร้อนคำนวณได้จากผลคูณของความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำ (ก่อนและหลังจุดระเบิด) กับค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ ซึ่งหาได้จากการเผากรดเบนโซอิก (Benzoic acid) ภายใต้ภาวะเดียวกัน

เครื่องมือ

1. Oxygen Bomb Calorimeter

สารเคมี

1. น้ำกลั่น

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

การวิเคราะห์

การหาค่าความจุความร้อนมาตรฐานของบอมบ์แคลอริมิเตอร์

1. ชั่งกรดเบนโซอิกประมาณ 1 กรัม ให้มีความละเอียดถึง 0.0001 กรัม ใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่างของเครื่อง
2. ตัดลวด (Fuse Wire) ความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ผูกที่ปลายทั้งสองข้างของส่วนจุดระเบิด ให้ลวดแตะผิวตัวอย่างของแข็งในถ้วย
3. ล้างภายในบอมบ์ให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น และเติมน้ำกลั่นลงในบอมบ์ 1 มิลลิลิตร
4. ประกอบบอมบ์ ปิดฝาให้แน่น อัดแก๊สออกซิเจนมีความดัน 30 บรรยากาศ และต้องเท่ากันทุกครั้ง ระวังอย่าให้ตัวอย่างกระจายจากถ้วยใส่ตัวอย่าง
5. นำบอมบ์ที่อัดแก๊สออกซิเจนแล้ววางลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิ ต่อชั่วโมงสำหรับจุดระเบิด
6. เติมน้ำกลั่นลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิประมาณ 2000 มิลลิลิตร ปรับอุณหภูมิของน้ำโดยการกวนให้อุณหภูมิคงที่และต่ำกว่าอุณหภูมิของห้องประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส
7. ทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้อุณหภูมิคงที่
8. เมื่ออุณหภูมิคงที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น (T_i) กดปุ่มจุดระเบิด
9. จับเวลาทุก ๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิสุดท้าย (T_f)
10. ปิดเครื่องและนำบอมบ์ออกจากเครื่อง ค่อย ๆ ลดความดัน ถ้าภายในมีเขม่าหรือเผาไหม้ไม่หมดให้ทำใหม่
11. ล้างภายในบอมบ์ทุกส่วนด้วยน้ำล้างบอมบ์ที่เตรียมไว้ จนหมดความเป็นกรดและมีปริมาตรประมาณ 250 มิลลิลิตร ไตเตรตน้ำล้างด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต บันทึกปริมาตรที่ใช้

12. วัดความยาวลวดที่เหลือ บันทึกผล

การคำนวณ

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

เมื่อ

- E = ค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ (จูลต่อองศาเซลเซียส)
H = ความร้อนของการเผาไหม้ของกรดเบนโซอิก (จูลต่อกรัม)
g = น้ำหนักกรดเบนโซอิกที่ใช้ (กรัม)
e₁ = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) โดย 1 มิลลิลิตร เทียบเท่ากับ 10 บีที่ยู
e₂ = ความยาวลวดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร) × ค่าความร้อนของลวด (บีที่ยูต่อเซนติเมตร)
T = T_f - T_i ผลต่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ทำการทดลองเหมือนที่กล่าวมาทุกประการตั้งแต่ข้อ 1-12 โดยเปลี่ยนจากกรดเบนโซอิกเป็นของแข็งแล้วคำนวณค่าความร้อนได้จากสมการต่อไปนี้

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

- เมื่อ Q_v(gross) = ค่าความร้อนของของแข็ง (จูลต่อกรัม)
T = T_f - T_i (องศาเซลเซียส)
e₁ = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) โดย 1 มิลลิลิตร เทียบเท่ากับ 10 จูล
e₂ = ความยาวลวดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร) × ค่าความร้อนของลวด (จูลต่อเซนติเมตร)
e₃ = 25×10³ (จูล) × ร้อยละกำมะถัน × น้ำหนักของแข็งที่ใช้ (กรัม)

3. การวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันรวม (Standard Test Method for Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke : ASTM D3172 Method B : Bomb Washing Method)

หลักการ

กำมะถันจากน้ำที่ได้จากการล้างบอมบ์ จะถูกทำให้อยู่ในรูปตะกอนแบเรียมซัลเฟต (BaSO_4)

เครื่องมือ

1. เตาเผา (Muffle Furnace)
2. ถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด
3. โถดูดความชื้น

สารเคมี

2. น้ำกลั่น
3. แอมโมเนียไฮดรอกไซด์เข้มข้น (conc. NH_4OH) ความถ่วงจำเพาะ 0.90
4. สารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์เจือจาง (1+10) โดยผสมแอมโมเนียไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 ส่วนกับน้ำกลั่น 10 ส่วนโดยปริมาตร
5. กรดไฮโดรคลอริก (1+1) โดยผสมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 ส่วนกับน้ำกลั่น 1 ส่วนโดยปริมาตร
6. สารละลายแบเรียมคลอไรด์ (BaCl_2) ละลายแบเรียมคลอไรด์ 100 กรัมในน้ำกลั่นและเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร
7. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.43 กรัมในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรสารละลายให้เป็น 100 มิลลิลิตร
8. กระดาษกรองเบอร์ 1 และเบอร์ 42

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำที่ได้จากการล้างบอมบ์และไตเตรตแล้วมาปรับให้เป็นกลางด้วยสารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์เจือจาง (จาก pH = 5.5 เป็น pH = 7.0)
2. นำไปต้มจนเดือดแล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างกระดาษกรองให้ทั่วด้วยน้ำร้อน 5-6 ครั้ง

3. เติมกรดไฮโดรคลอริกที่เตรียมไว้ 1 มิลลิลิตร นำไปต้มและเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ 10 มิลลิลิตรทีละน้อยด้วยปิเปต คนให้ทั่วตลอดเวลา ต้มต่อให้เดือดอีก 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ค้างคืนหรืออย่างน้อย 2 ชั่วโมง
4. กรองตะกอนแบเรียมซัลเฟตด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดแบเรียมคลอไรด์ (ทดสอบได้ด้วยการหยดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตลงในน้ำล้างตะกอน 8-10 มิลลิลิตรแล้วน้ำไม่ขุ่น)
5. นำกระดาษกรองที่มีตะกอนแบเรียมซัลเฟตใส่ถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ห่อกระดาษหุ้ม ๆ เพื่อป้องกันตะกอนกระเด็นออกจากถ้วย
6. เผาที่อุณหภูมิ 800-850 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ นำออกจากเตาเผา ปิดฝาและทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
7. ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละกำมะถันรวม} = 13.738 \times (A - B)/C$$

เมื่อ	A	=	น้ำหนักรวมของตะกอนแบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) จากตัวอย่างและครุซีเบิล (กรัม)
	B	=	น้ำหนักของครุซีเบิล (กรัม)
	C	=	น้ำหนักของแข็งเริ่มต้น (กรัม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

การคำนวณและข้อมูลการทดลอง

การคำนวณ

1. การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนรวม

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการเปลี่ยนของยางรถยนต์} \\ \text{(Dry ash free basis, Daf)} \end{aligned} = 100 \times \left[\frac{(W_{Daf} - W_R)}{W_{Daf}} \right]$$

2. การคำนวณร้อยละผลได้ของเหลว

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

3. การคำนวณร้อยละผลได้ของแข็ง

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

4. การคำนวณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (Daf)} \\ = 100 - \text{ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลว} - \text{ร้อยละ} \\ \text{ผลิตภัณฑ์ของแข็ง} \end{aligned}$$

โดย

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

$$W_R = \text{น้ำหนักกากของแข็งที่ปราศจากความชื้นและเถ้าหลังล้างด้วยเตตระไฮโดรฟูแรน}$$

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

ตัวอย่างการคำนวณ

ภาวะของการทดลอง

อัตราการให้ความร้อน 102 องศาเซลเซียสต่อนาที

เวลา 25 นาที

อัตราการไหลของแก๊ส N_2 0.05 ลิตรต่อนาที

การคำนวณ

น้ำหนักยางเริ่มต้น = 60.29 กรัม

น้ำหนักของยางรถยนต์ที่ปราศจากความชื้นและเถ้า (Dry ash free basis) = 53.58

น้ำหนักน้ำมันเบา = 17.63 กรัม

น้ำหนักน้ำมันหนัก = 9.31 กรัม

น้ำหนักของเหลว = 26.94 กรัม

น้ำหนักกากของแข็ง = 24.27 กรัม

น้ำหนักกากของแข็งที่ปราศจากความชื้นและเถ้า (Dry ash free basis) = 18.07 กรัม

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนรวม} = \frac{100 \times [53.58 - 18.07]}{53.58} = 66.27$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของเหลว} = 100 \times \left[\frac{26.94}{53.58} \right] = 50.27$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของแข็ง} = 100 \times \left[\frac{18.07}{53.58} \right] = 33.73$$

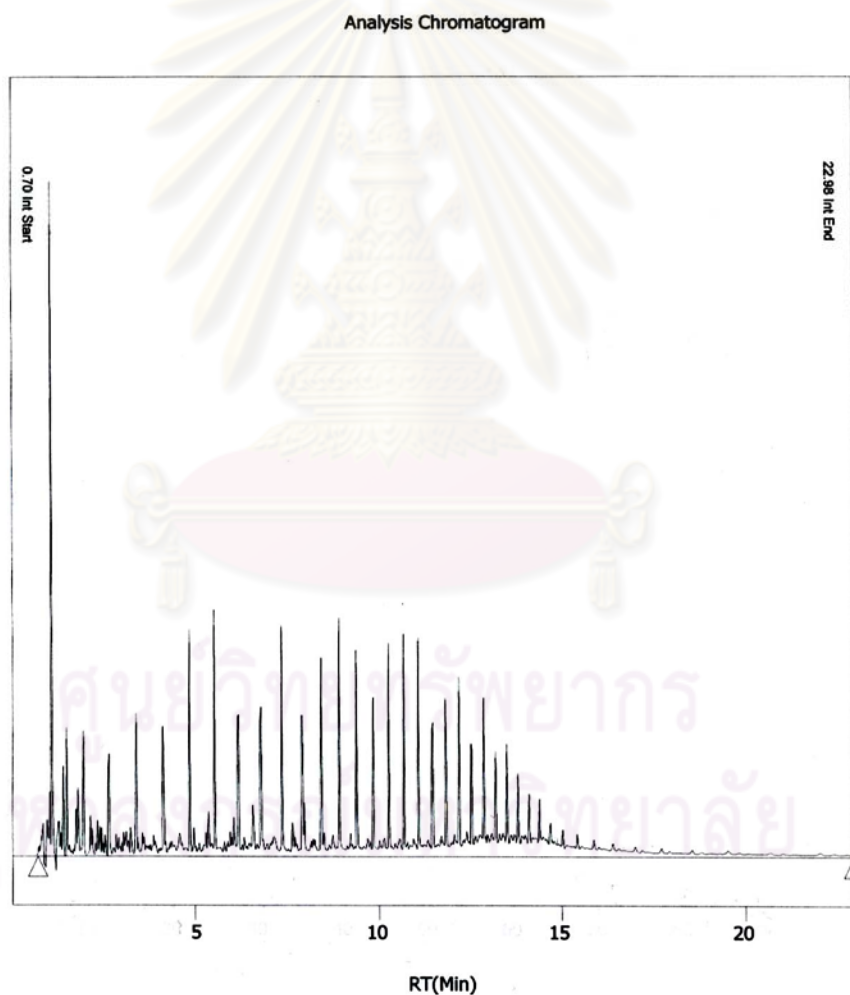
$$\text{ร้อยละผลได้แก๊ส} = 100 - 50.27 - 33.73 = 16.0$$

ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว

1. ตัวอย่างโครมาโตแกรมแสดงผลการแยกผลิตภัณฑ์ของเหลว

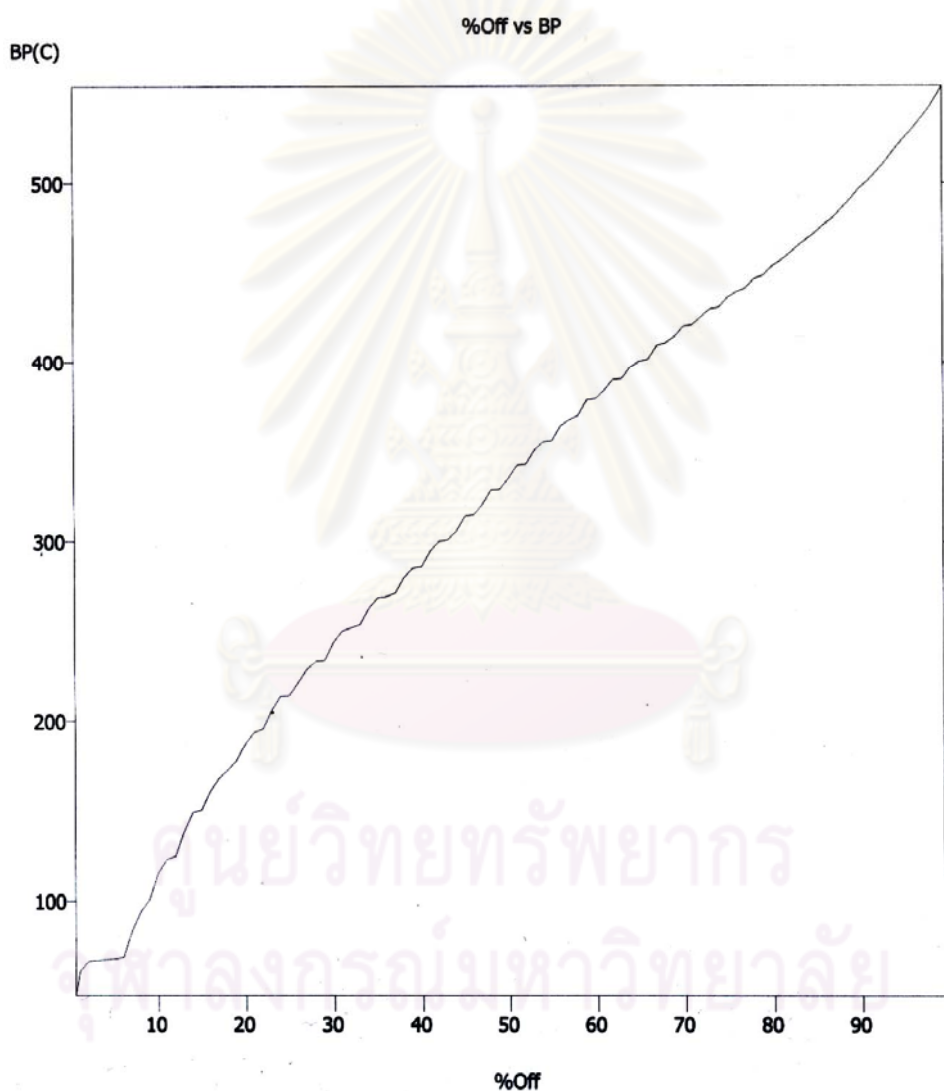
ผลิตภัณฑ์ของเหลวจะถูกนำมาละลายด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 100 โดยปริมาตร วิเคราะห์หึ่งค์ประกอบโดยใช้ Simulated distillation gas chromatograph ตามมาตรฐาน ASTM D 2887 จะได้โครมาโตแกรมดังแสดงในรูปที่ จ1



รูปที่ จ1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมการวิเคราะห์น้ำมันดิบจาก Simulated distillation gas chromatograph

2. ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือด

โครมาโทแกรมที่ได้จากการแยกสารด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี จะนำไปเปลี่ยนเป็นกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือดด้วยโปรแกรม Simulated distillation โดยจะทำการเทียบกับกราฟโครมาโทแกรมของสารผสมมาตรฐานตาม ASTM D2887 และโครมาโทแกรมเมื่อไม่มีการฉีดสารใด ๆ (Blank) ดังแสดงในรูปที่ ๑2 จากนั้นจึงทำการแบ่งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามช่วงจุดเดือด ตามที่ได้อธิบายในบทที่ 3



รูปที่ ๑2 กราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือดของน้ำมันดิบจาก Simulated distillation gas chromatograph

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภัทรานิษฐ์ รัศมีดารา เกิดวันที่ 23 กรกฎาคม 2528 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย