

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การนำกลับดีแอลโอมินิจากระบวนกรไฟโรไลซิชยารถยนต์ใช้แล้ว



T104104



นางสาวฉวีวรรณ ตนภู
นางสาวมานิตา ประสงค์เจริญ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 104104
วัน,เดือน,ปี 30 ต.ค. 2552

b. 12103445
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PRODUCTION OF DL-LIMONENE BY PYROLYSIS OF USED TYRES

MISS MANEEWAN TONPOO
MISS MANITA PRASONGJAROEN



**A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

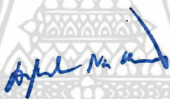
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การนำกลับดีแอลไอโม่เงินจากกระบวนการไพโรไลซิส
ยางรถยนต์ใช้แล้ว


จัดทำโดย นางสาวฉวีวรรณ ตนภู รหัสนักศึกษา 48010698
นางสาวมานิตา ประสงค์เจริญ รหัสนักศึกษา 48010706
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ดวงกมล ฦ ระนอง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รศ.ดร.ดวงกมล ฦ ระนอง)


..... กรรมการ
(ผศ.ดร.อภิรัตน์ นัมคณิสร์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ศิริพันธ์ มุรธาชัยกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรินุญญาณิพนธ์ เรื่อง การนำกลับดีแอลไลโมเนินจากกระบวนการไพโรไลซิส
 ยางรถยนต์ใช้แล้ว
 โดย นางสาวมณีวรรณ ตนภู รหัสนักศึกษ 48010698
 นางสาวมานิตา ประสงค์เจริญ รหัสนักศึกษ 48010706
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง
 ปรินุญญาณิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่ง
 ต่อเนื่อง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับดีแอลไลโมเนินจากกระบวนการไพโรไลซิสยาง
 รถยนต์ใช้แล้ว ในการทดลองใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง ยางรถยนต์ขนาด 0.833-1.168 mm
 ภายใต้สภาวะปฏิบัติงาน คือ อุณหภูมิ 350–600 °C ความดัน 0.2 และ 1.0 atm อัตราการป้อนแก๊ส
 ในโตรเจน 25–200 cm³/min เวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส 60–1800 min ศึกษาอิทธิพลของตัวเร่ง
 ปฏิริยาซีโอไลท์ชนิดมอร์ดไนต์ (H-Mordenite) จากการศึกษาค้นคว้าสภาวะในกระบวนการ
 ไพโรไลซิสยางรถยนต์ คือ อุณหภูมิ 450 °C ความดัน 1 atm อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจนเท่ากับ
 50 cm³/min เวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส 120 min ทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว 59.58
 %wt และเมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจากการไพโรไลซิสมาวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง
 แก๊สโครมาโตกราฟแบบ FID พบว่าในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีไลโมเนินมากที่สุดคือ 26.25 %C
 นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมตัวเร่งปฏิริยาซีโอไลท์ชนิดมอร์ดไนต์จะทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็น
 ของเหลวลดลงแต่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเพิ่มขึ้นและไม่ส่งผลต่อดีแอลไลโมเนินในผลิตภัณฑ์
 ของเหลว การเติมตัวเร่งปฏิริยาซีโอไลท์ชนิดมอร์ดไนต์จึงไม่ส่งผลดีต่อกระบวนการไพโรไลซิส
 ยางรถยนต์ใช้แล้ว ดังนั้นที่สภาวะ คือ อุณหภูมิ 450 °C ความดัน 1 atm อัตราการป้อนแก๊ส
 ในโตรเจนเท่ากับ 50 cm³/min เวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส 120 min จึงเหมาะสมในการสังเคราะห์
 เพื่อนำสารประกอบไลโมเนินไปใช้ประโยชน์

Report Title Production of DL-limonene by pyrolysis of used tyres

By Miss. Maneewan Tonpoo ID.NO. 48010698

 Miss. Manita Prasongjaroen ID.NO. 48010706

Adviser Assoc. Prof. Dr. Duangkamol Na-Ranong

Report for Bachelor Degree of Engineering (Chemical Engineering)

 Department of Chemical Engineering

 Faculty of Engineering

 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

In this study, production of DL-limonene by pyrolysis of used tyres has been investigated using a semi-batch reactor to determine the optimal condition for the production of DL-limonene. The preliminary experiments were conducted in a semi-batch reactor using tyres with particle sizes of 0.833-1.168 mm, temperature from 350 to 600 °C, the pressure 0.21 and 1.00 atm, the flow rate of nitrogen gas from 25 to 200 cm³/min, the effect of catalyst per tyre ratio of Zeolite Mordenite. The condition were operated at the temperature of 450 °C, pressure of 1.00 atm, the flow rate of nitrogen gas of 50 cm³/min and the pyrolysis time of 120 min. The liquid in product of 59.58 %wt was observed. The composition of liquid was analyzed by a gas chromatography with FID detector and found DL-limonene 26.25 %C. Moreover, this work investigated the effect of catalyst per tyre ratio of Zeolite Mordenite. It showed that an increase of catalyst per tyre ratio resulted in high yield of gas at the expense of the oil yield and it will not notably influence the DL-limonene in pyrolytic oil. So that effect of catalyst per tyre ratio of Zeolite Mordenite not used for production of DL-limonene by pyrolysis of used tyres. The optimal condition of production of DL-limonene and useful DL-limonene from pyrolytic oil were operated at the temperature of 450 °C, pressure of 1.00 atm, the flow rate of nitrogen gas of 50 cm³/min and the pyrolysis time of 120 min.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง ซึ่งเป็นอาจารย์ควบคุมงานวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณรัตนากร ขวงสวัสดิ์ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือต่าง ๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่าง ๆ

ขอขอบคุณ คุณพิมพ์ใจ ภูษนะกิจ ที่ช่วยเหลือการประสานงานนอกสถานที่ การเงิน และคำแนะนำต่าง ๆ เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณเศรษฐการ พรหมศิริ ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่าง ๆ

สุดท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกครอบครัวของคณะผู้วิจัยที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง ทำให้สามารถทำปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาโทฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัย ณ ที่นี้

มณีวรรณ ตนภู
มานิตา ประสงค์เจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของยางรถยนต์.....	3
2.1.1 โครงสร้างของยางรถยนต์.....	3
2.1.2 องค์ประกอบที่สำคัญของยางรถยนต์.....	3
2.2 กระบวนการแปรรูปยางรถยนต์เก่า.....	5
2.3 กระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์.....	5
2.4 สารประกอบไลโมนีน.....	6
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	13
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	13
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	13
3.3 วิธีการทดลอง	13
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	16
4.1 สภาวะมาตรฐานที่ใช้ในการทดลอง.....	16
4.2 อิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการไพโรไลซิส.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

4.2.1 อิทธิพลของอัตราการไหลของไนโตรเจนที่มีต่อการกระจาย ของผลิตภัณฑ์	18
4.2.2 อิทธิพลของระยะเวลาในการไฟโรไลซิสที่มีต่อการกระจาย ของผลิตภัณฑ์.....	20
4.2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์.....	22
4.2.4 อิทธิพลของความดันที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์.....	25
4.2.5 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์.....	26
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	28
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	28
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	28
เอกสารอ้างอิง.....	29
ภาคผนวก.....	31



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบของดีแอลไฮโมเนินที่มีเนฟทาเป็นองค์ประกอบหลัก.....	12
ตารางที่ 4.1	ร้อยละของคาร์บอนนํากลับในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว.....	17
ตารางที่ 4.2	ร้อยละของคาร์บอนนํากลับในผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส.....	17
ตารางที่ 4.3	สัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองเทียบกับงานวิจัยของ Xinghua และคณะ.....	22
ตารางที่ 4.2.1	อิทธิพลของความดันที่มีผลต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์.....	25
ตารางที่ 4.2.2	ร้อยละของคาร์บอนนํากลับในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว.....	25
ตาราง ก	ข้อมูลการทดลองที่สภาวะต่างๆด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง.....	31
ตาราง ข	ร้อยละของคาร์บอนนํากลับในผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว ก๊าซ.....	32
ตาราง ค	ร้อยละของคาร์บอนนํากลับในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว.....	33
ตาราง ง	สัดส่วนขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เหลว.....	34
ตาราง จ	ร้อยละของคาร์บอนนํากลับในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	35
ตาราง ฉ	สัดส่วนขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	36
ตาราง ฉ.1	ผลการคำนวณหาร้อยละของคาร์บอนนํากลับในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว	50
ตาราง ฉ.2	ตัวอย่างการคำนวณผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สจาก GC-TCD.....	52
ตาราง ฉ.3	ตัวอย่างผลการคำนวณที่เป็นแก๊สจาก GC-FID.....	53

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างของยางรถยนต์.....3
รูปที่ 2.2	องค์ประกอบที่สำคัญของยางรถยนต์.....3
รูปที่ 2.3	ปฏิกิริยาการเกิด butyl rubber.....5
รูปที่ 2.4	โครงสร้างของสารประกอบไลโมเนน6
รูปที่ 2.5	กลไกการสลายตัวของยางธรรมชาติ 8
รูปที่ 2.6	กลไกการสลายตัวของไลโมเนนไปเป็นสารประกอบอะโรมาติก9
รูปที่ 3.1	ชุดการทดลองไฟโรไลซิสแบบกึ่งต่อเนื่องที่ความดันบรรยากาศ14
รูปที่ 3.2	ชุดการทดลองไฟโรไลซิสแบบกึ่งต่อเนื่องที่ความดัน 0.21 บรรยากาศ.....15
รูปที่ 4.1.1	สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ (%wt) ที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 25, 50, 100 และ 200 ml/min16
รูปที่ 4.1.2	โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว16
รูปที่ 4.1.3	โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส.....16
รูปที่ 4.2.1	อิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน.....1
รูปที่ 4.2.2	อิทธิพลของระยะเวลาในการไฟโรไลซิส.....21
รูปที่ 4.2.3	อิทธิพลของอุณหภูมิในการไฟโรไลซิส.....24
รูปที่ 4.2.4	อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดมอร์ดีไนต์.....27
รูปที่ ข.1	โครมาโทแกรมของแก๊สที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 25 cm ³ /min.....37
รูปที่ ข.2	โครมาโทแกรมของแก๊สที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm ³ /min.....38
รูปที่ ข.3	โครมาโทแกรมของแก๊สที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 100 cm ³ /min.....38
รูปที่ ข.4	โครมาโทแกรมของแก๊สที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 200 cm ³ /min39
รูปที่ ข.5	โครมาโทแกรมของแก๊สที่เวลา 60 นาที.....39
รูปที่ ข.6	โครมาโทแกรมของแก๊สที่เวลา 180 นาที.....40
รูปที่ ข.7	โครมาโทแกรมของแก๊สที่ 350 °C40
รูปที่ ข.8	โครมาโทแกรมของแก๊สที่ 400 °C41
รูปที่ ข.9	โครมาโทแกรมของแก๊สที่ 450 °C41
รูปที่ ข.10	โครมาโทแกรมของแก๊สที่ 550 °C41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ ซ.11 โครมาโทแกรมของแก๊สที่ 600 °C	42
รูปที่ ซ.12 โครมาโทแกรมของแก๊สเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 กรัม	43
รูปที่ ซ.13 โครมาโทแกรมของแก๊สเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัม	43
รูปที่ ซ.1 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 25 cm ³ /min	44
รูปที่ ซ.2 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm ³ /min.....	44
รูปที่ ซ.3 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 100 cm ³ /min	45
รูปที่ ซ.4 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 200 cm ³ /min	45
รูปที่ ซ.5 โครมาโทแกรมของของเหลว ที่เวลา 60 นาที	45
รูปที่ ซ.6 โครมาโทแกรมของของเหลว ที่เวลา 180 นาที	46
รูปที่ ซ.7 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อุณหภูมิ 350 °C	46
รูปที่ ซ.8 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อุณหภูมิ 400 °C	46
รูปที่ ซ.9 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อุณหภูมิ 450 °C	47
รูปที่ ซ.10 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อุณหภูมิ 550 °C	47
รูปที่ ซ.11 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อุณหภูมิ 600 °C	47
รูปที่ ซ.12 โครมาโทแกรมของของเหลวที่ความดัน 0.21 atm	47
รูปที่ ซ.13 โครมาโทแกรมของของเหลวเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 กรัม	48
รูปที่ ซ.14 โครมาโทแกรมของของเหลวเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัม	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาขยะจากยางรถยนต์ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันเป็นอย่างมาก ทั้งพื้นที่ในการจัดเก็บซึ่งอาจทำให้เกิดแหล่งเพาะพันธุ์ยุงและสัตว์มีพิษที่เป็นสาเหตุของโรคต่าง ๆ นอกจากนี้ยางรถยนต์ยังเป็นวัสดุที่ติดไฟได้ง่ายอาจทำให้เกิดอัคคีภัยและยังเกิดเป็นเขม่ารวมทั้งแก๊สเสียจำนวนมากเมื่อนำไปเผาพร้อมกับขยะทั่วไป การนำยางรถยนต์ที่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อนำกลับดีเซลโลโมเนิน จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่เกิดประโยชน์โดยตรงในการลดปริมาณขยะจากยางรถยนต์และสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุที่ใช้แล้ว โดยเปลี่ยนมุมมองจากเศษยางรถยนต์เก่าเป็นขยะกลายเป็นดีเซลโลโมเนินที่นำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

ยางรถยนต์เป็นสารประกอบพอลิเมอร์เมื่อนำยางรถยนต์เก่ามาผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนโดยปราศจากออกซิเจนหรือที่เรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) จะเกิดการสลายโมเลกุลให้มีขนาดเล็กลงโดยองค์ประกอบหลักที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์คือดีเซลโลโมเนินซึ่งเป็นสารประกอบที่มีมูลค่าสูงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในวงการอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นตัวทำละลายในกระบวนการต่าง ๆ เช่น การผลิตเรซิน ผลิตกาวและเป็นตัวกระจายในสีย้อม เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารให้กลิ่นหอมชนิดต่าง ๆ และเป็นสารตั้งต้นการผลิตสารคาร์บอน (I-Carvon) ซึ่งเมื่อนำไปสังเคราะห์จะได้สารที่มีรสเปี่ยมินที่ใช้เป็นส่วนประกอบในยาสีฟันและน้ำยาบ้วนปาก เป็นต้น

ดีเซลโลโมเนินสามารถสกัดได้จากเปลือกองุ่นและเปลือกมะนาวซึ่งเป็นผลไม้ตามฤดูกาล จึงทำให้ราคาไม่แน่นอนและมีราคาแพงในช่วงที่ไม่ใช่ฤดูเพาะปลูก ทำให้ต้นทุนในการผลิตดีเซลโลโมเนินสูงขึ้นและไม่คงที่ กระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วเพื่อนำกลับดีเซลโลโมเนินจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของแหล่งสารเคมีทดแทนที่กำลังได้รับความสนใจเพราะดีเซลโลโมเนินที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วสามารถนำมาใช้กับภาคอุตสาหกรรมได้ เช่นเดียวกับดีเซลโลโมเนินที่ได้จากการสกัดจากผิวผลไม้ ที่ผ่านมาสถานะและปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ยังไม่แน่ชัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองเพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้วเพื่อให้ได้ดีเซลโลโมเนินซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเชิงพาณิชย์สูงรวมถึงเป็นข้อมูลในการพัฒนากระบวนการไพโรไลซิสให้มีความคุ้มค่าและเกิดประโยชน์ต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

หาสภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับดีแอลโม่ไนน์จากการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้ว

1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะซึ่งทำงานแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยมีปัจจัยที่เลือกพิจารณาคือ อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน เวลาในการไพโรไลซิส อุณหภูมิในการไพโรไลซิส อิทธิพลของความดัน และอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลท์ชนิดมอร์ดินต์ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกวิเคราะห์สัดส่วนของกากของแข็ง ของเหลวและแก๊สที่เกิดขึ้น จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊สมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.4.1 ค้นหาและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับยางรถยนต์
- 1.4.2 ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์
- 1.4.3 ทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ เพื่อได้ดีแอลโม่ไนน์ในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากที่สุด
- 1.4.4 วิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์
- 1.5.2 ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสยางรถยนต์ เพื่อให้ได้ดีแอลโม่ไนน์ในผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุด

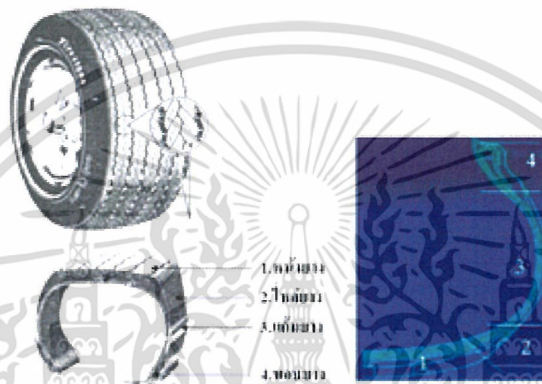
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของยางรถยนต์

2.1.1 โครงสร้างของยางรถยนต์

โครงสร้างของยางรถยนต์โดยทั่วไปประกอบไปด้วย 4 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.1

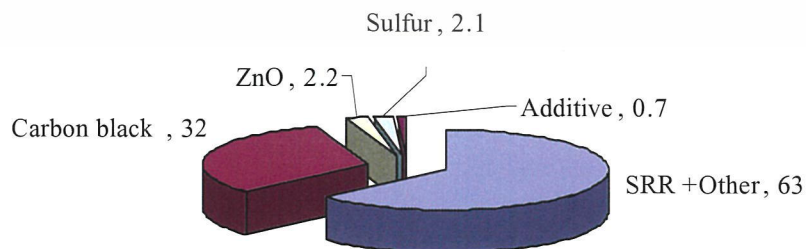


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของยางรถยนต์

1. หน้ายาง เป็นส่วนที่สัมผัสกับถนน แบ่งเป็น ดอกยาง ร่องยางและร่องเล็กบนดอกยาง
2. ไทลด์ยาง ทำหน้าที่ในการระบายความร้อน
3. แก้มยาง ทำหน้าที่เพิ่มความยืดหยุ่นและให้เกิดความนุ่มนวล
4. ขอบยาง ทำหน้าที่รัดยางกับกระทะล้อ

2.1.2 องค์ประกอบที่สำคัญของยางรถยนต์

ยางรถยนต์ประกอบด้วย ยางเอสบีอาร์ ยางธรรมชาติ กำมะถัน เหม้าดำ และสารเติมแต่ง เป็นต้น โดยสัดส่วนขององค์ประกอบแสดงดังในรูปที่ 2.2

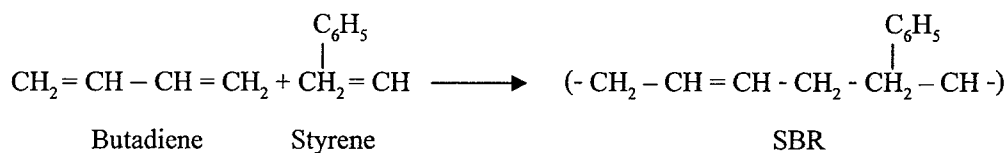


รูปที่ 2.2 องค์ประกอบที่สำคัญของยางรถยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ยางเอสบีอาร์ (SBR)

SBR หรือ ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน (Styrene-butadiene) ซึ่งเป็นยางสังเคราะห์ประเภท โคพอลิเมอร์เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของโมโนเมอร์ 2 ชนิด คือ บิวทาไดอีนและสไตรีน

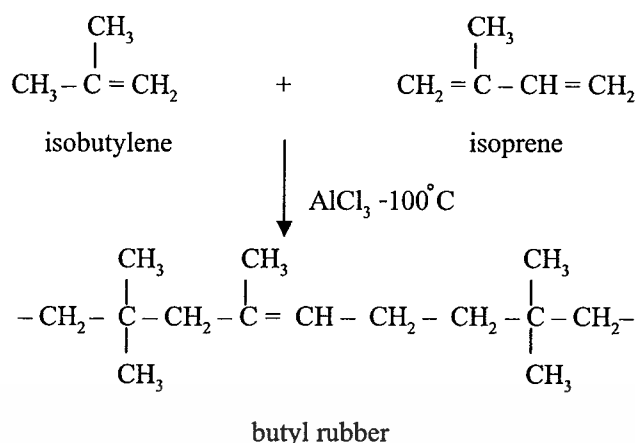


ในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันนี้ใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้าใช้ อุณหภูมิต่างกันจะทำให้ได้ยางสังเคราะห์ที่มีการจัดเรียง โครงสร้างที่แตกต่างกัน ยาง SBR เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ จะมีคุณภาพสม่ำเสมอกว่า การนำไปใช้งานและสมบัติของยางคงรูป และสม่ำเสมอ นอกจากนั้นยังมีสิ่งเจือปนน้อยกว่า ที่สำคัญคือไม่ต้องบดยางให้หืน (mastication) ก่อนการผสมสารเคมีในระหว่างกระบวนการผลิต เพราะยางชนิดนี้ถูกสังเคราะห์มาให้มีน้ำหนัก โมเลกุลที่ไม่สูงมากนัก จึงมีความหนืดเหมาะสมที่ทำให้สารเคมีกระจายตัวได้อย่างดีและการไหล ของยางง่ายในระหว่างที่มีการขึ้นรูปในแบบต่างๆ อย่างไรก็ตามเนื่องจากยาง SBR มีพันธะคู่อยู่ใน โมเลกุล ดังนั้นจึงเสื่อมสภาพเร็วในสภาวะที่มีออกซิเจน โอโซนหรือแสงแดดเช่นเดียวกับยาง ธรรมชาติ แต่ความยืดหยุ่นของยาง SBR จะต่ำกว่าในขณะที่ความทนทานต่อน้ำมันใกล้เคียงกัน ยาง SBR ที่เสริมแรงด้วยสารเสริมแรง เช่น เขม่าดำ จะมีความทนต่อการขัดสีได้ดีกว่ายางธรรมชาติแต่จะ มีความทนต่อการฉีกขาดต่ำกว่า

ยาง SBR ทนต่อการขูดและเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ยากกว่ายางธรรมชาติ และมีความ ยืดหยุ่นต่ำส่วนใหญ่ใช้ทำยางรถยนต์ ถ้าเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่อุณหภูมิต่ำเรียกว่า Cold rubber ใช้สำหรับทำยางที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับงานหนัก เช่น ส้นรองเท้า ยางปูพื้น ถุงเท้ายาง เป็นต้น ยางชนิดนี้ส่วนมากจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยางของยานพาหนะขนาดเล็กโดยการผสม กับยางชนิดอื่น ๆ เช่น ยางบิวทาไดอีน (BR) และยางธรรมชาติ (NR)

2. Butyl rubber

เป็นโคพอลิเมอร์ของไอโซบิวทิลีนกับ ไอโซพรีนโดยปฏิกิริยาแสดงดังในรูปที่ 2.3 จะได้ ยางสังเคราะห์ที่ใช้ทำยางรถยนต์ซึ่งมีสมบัติเก็บแก๊สได้ดี



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการเกิด butyl rubber

3. เขม่าดำ (Carbon black)

เป็นของแข็งมีสีดำไม่มีกลิ่นอาจอยู่ในรูปผงคาร์บอนเป็นก้อนหรืออาจเป็นยางเหนียวข้น (paste) มีจุดเดือด $6,332^\circ\text{C}$ จุดหลอมเหลว $3,550^\circ\text{C}$ ไม่ละลายน้ำและไม่ละลายในสารทำละลายอินทรีย์ไม่กักความร้อนถึงไม่เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน แต่สลายตัวให้ออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์เมื่อเกิดการเผาไหม้หรือสัมผัสกับความร้อน

2.2 กระบวนการแปรรูปยางรถยนต์เก่า

กระบวนการที่ใช้แปรรูปยางรถยนต์เก่าแบ่งได้เป็น 3 กระบวนการดังนี้

1. กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) คือการย่อยสลายโมเลกุลด้วยความร้อนในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน เพื่อผลิตแก๊สและน้ำมัน
2. กระบวนการย่อยสลายโมเลกุลด้วยความร้อน (Gasification) เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ (ไฮโดรเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์)
3. การย่อยสลายโมเลกุลด้วยความร้อนร่วมกับใช้ตัวทำละลาย (Liquefaction) เพื่อผลิตน้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ตัวทำละลายอาจเป็นของเหลวที่ไม่ใช่ น้ำ

ทั้ง 3 กระบวนการได้ถูกเรียกรวมกันว่า "PGL Process" ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่มีการใช้มากที่สุดในโลกเนื่องจากมีความยุ่งยากน้อยกว่ากระบวนการอื่น ๆ

2.3 กระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการย่อยสลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ด้วยความร้อนในสถานะที่ปราศจากออกซิเจนเป็นกระบวนการทางเคมีแบบผันกลับไม่ได้ พันธะภายในโมเลกุลของสารอินทรีย์จะแตกตัวเนื่องจากได้รับความร้อนเข้าไป องค์กรประกอบที่ระเหยได้ส่วนที่มีโมเลกุลใหญ่จะควบแน่นเป็นของเหลว ส่วนที่มีโมเลกุลเล็กไม่ควบแน่นจะเป็นแก๊ส ส่วนองค์กรประกอบที่ผ่านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระเหยไม่ได้จะกลายเป็นของแข็ง การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดของวัตถุดิบ ขนาดของวัตถุดิบ เวลาในการทำไพโรไลซิส อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น

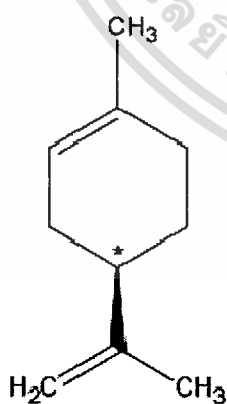
2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัยดังนี้

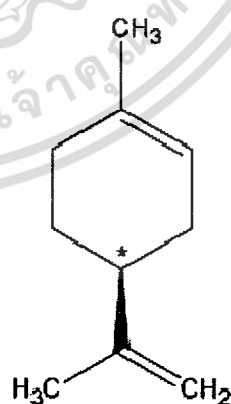
1. องค์ประกอบของวัสดุ เป็นสิ่งที่จะกำหนดผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น
2. อุณหภูมิ เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลกระทบต่อส่วนประกอบรวมถึงปริมาณของผลิตภัณฑ์
3. ความดัน เมื่อลดความดันจะทำให้ยางรถยนต์สลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำลง
4. อัตราการให้ความร้อน ปริมาณของของเหลวที่ได้จะลดลงเมื่อมีการเพิ่มอัตราการให้ความร้อน
5. ขนาดของวัตถุดิบ วัสดุขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวน้อยการให้ความร้อนจะช้ากว่าในวัสดุที่มีขนาดเล็กและการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยก็จะต่ำกว่าในวัสดุที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่า ทำให้วัสดุขนาดใหญ่มีปริมาณสารที่ระเหยน้อยกว่าในวัสดุขนาดเล็ก
6. ตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสจะช่วยให้มีค่าการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากขึ้น

2.4 สารประกอบไลโมนีน

ไลโมนีนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในน้ำมันซีดรัส สกัดได้จากเปลือกองุ่น ส้มและมะนาว โดยทั่วไปจะมี 2 ไอโซเมอร์ คือ ดีแอลไลโมนีน และแอลไลโมนีน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



ดีแอลไลโมนีน



แอลไลโมนีน

รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสารประกอบไลโมนีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไลโมนีนมีจุดเดือดประมาณ 175.5–176.5 °C มีความหนาแน่น 0.8402 kg/m³ ไม่ละลายในน้ำแต่ละลายในแอลกอฮอล์ ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในวงการอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง [1] ใช้เป็นตัวทำละลายในกระบวนการต่าง ๆ เช่น การผลิตเรซิน การผลิตกาวและเป็นตัวกระจายในสีย้อม ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อาหารและยา ใช้เป็นสารประกอบในผลิตภัณฑ์เพื่อไล่แมลงและสัตว์รบกวนทั้งกับคนและสัตว์ เช่น ยากันยุง ผลิตภัณฑ์กำจัดเห็บหมัด ใช้ในการกำจัดน้ำมันจากชิ้นส่วนเครื่องจักรและใช้ลอกสีจากไม้ ใช้เป็นสารทำความสะอาด ใช้เป็นสารตั้งต้นในการเพิ่มกลิ่นหอมในผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ เช่น ทำสบู่ แชมพู น้ำหอม นอกจากนี้ยังเป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมี เช่น 1-Carvon เป็นตัวอย่างสารที่สังเคราะห์ได้จากไลโมนีน เมื่อนำไปสังเคราะห์ต่อจะได้สารที่มีรสสเปียมินท์ ใช้เป็นส่วนประกอบในยาสีฟันและน้ำยาขี้วนปาก นอกจากนี้ยังเป็นสารต้านผลกระทบจากโรคมะเร็ง โดยจะไปเพิ่มเอนไซม์ในตับและล้างพิษจากโรคมะเร็ง รวมถึงเป็นตัวส่งเสริมระบบ GTS (The Glutathione Stransferase) ในตับ ตูลงลม ซึ่งเป็นระบบขจัดพิษจากโรคมะเร็งจึงลดอันตรายจากโรคมะเร็ง และยังพบว่าลดเนื้องอกในเต้านมและเป็นสารไม่มีพิษ

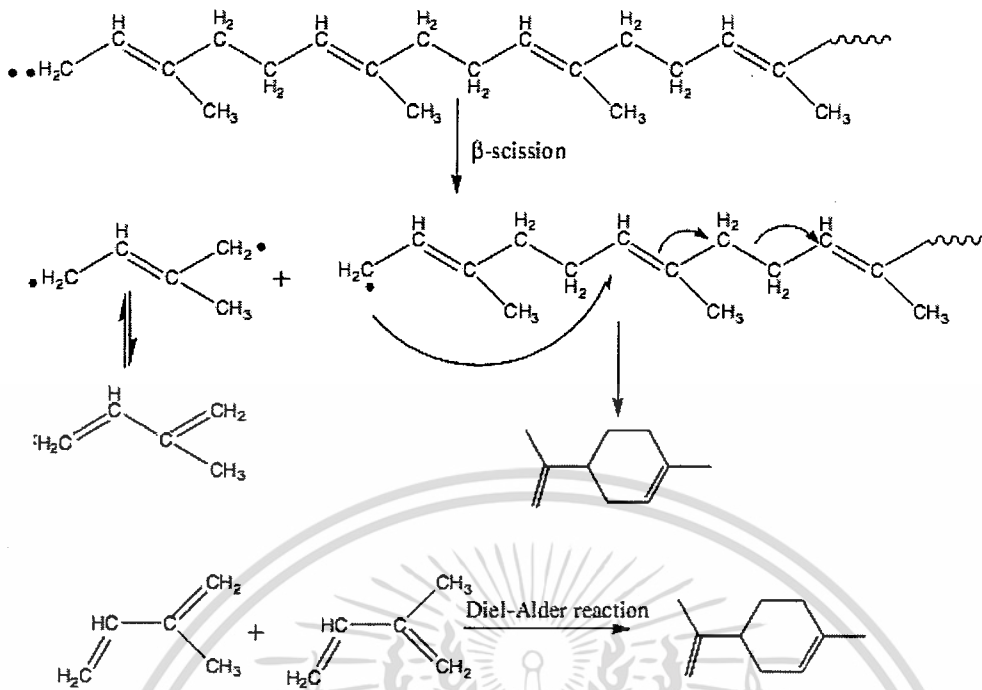
พีไซมิน (p-cymene) [2] เป็นสารที่มีมูลค่าใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพรีซอล (p-cresol) โดยทั่วไปพีไซมินได้จากกระบวนการแอลคิลเลชันของอนุพันธ์ปิโตรเลียม คือ เบนซีนและโทลูอิน แต่ในกระบวนการนี้จะมีค่าการเลือกเกิดต่ำและสารที่ใช้ยังเป็นสารอันตราย นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารผสมระหว่างโอไซมิน (o-cymene) และพีไซมิน (p-cymene) โดยจะต้องมีการนำมาผ่านกระบวนการแยกทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นในการผลิตพีไซมินจากปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันของไลโมนีนถือเป็นทางเลือกใหม่ที่จะหลีกเลี่ยงสารที่อันตรายและเพิ่มความคุ้มค่าในการผลิต เพราะไลโมนีนมีการเลือกเกิดเป็นพีไซมินสูงและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย โดยมีรายงานความเป็นพิษและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเกี่ยวกับสารที่ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำยาทำความสะอาด จึงยังเป็นการกระตุ้นความสนใจให้หันมาใช้ไลโมนีนในกรรมวิธีการผลิต

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กลไกการสลายโมเลกุลของยางรถยนต์ในกระบวนการไพโรไลซิส

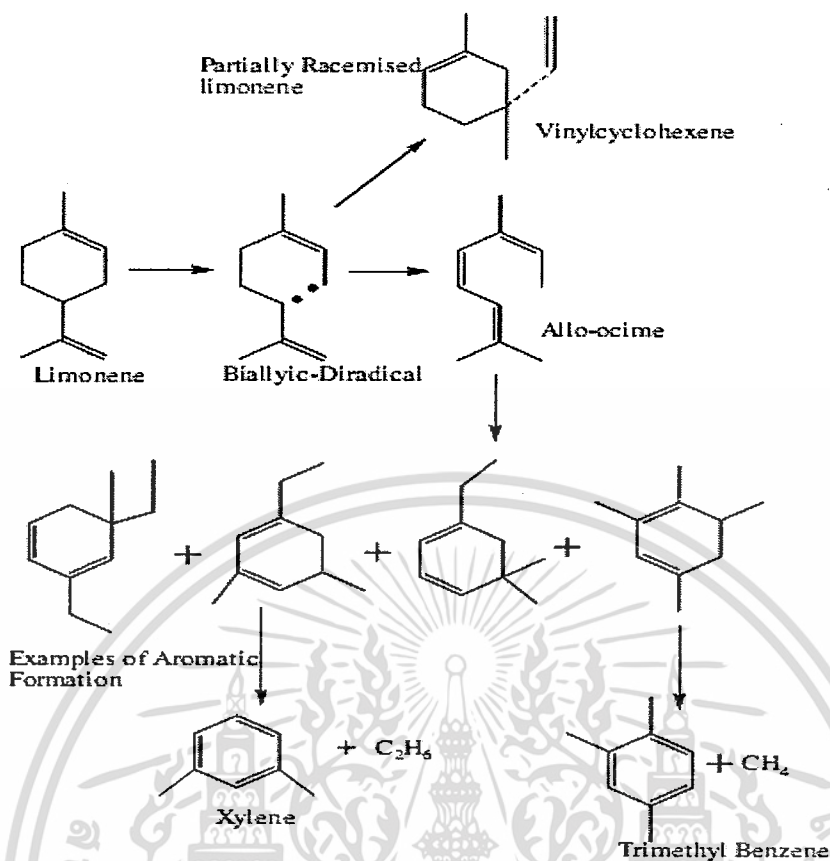
Xinghua และคณะ [3] ศึกษากลไกการสลายโมเลกุลของยางรถยนต์ พบว่าเมื่อยางรถยนต์ได้รับความร้อนจากกระบวนการไพโรไลซิสจะเกิดการสลายโมเลกุลได้ผลิตภัณฑ์หลัก 2 ชนิด คือ โมโนเมอร์ไอโซพรีน (monomer isoprene) และไดเมอร์ไลโมนีน (dimerlimonene) ทั้งสองโครงสร้างมีฟรีแรดิคัล (free radical) ทำให้ไม่เสถียร โดยไดเมอร์ไลโมนีน (dimerlimonene) เกิดปฏิกิริยาเรียกว่า Intramolecular cyclization ส่วน โมโนเมอร์ไอโซพรีน (monomer isoprene) เกิดปฏิกิริยา Diels-Alder โดยทั้งสองปฏิกิริยาเกิดเป็นไลโมนีน กลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังในรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กลไกการสลายตัวของยางธรรมชาติ [3]

เมื่อทำการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูง โลโมนินที่ได้จะเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation reaction) หรือปฏิกิริยารีคอมบิเนชัน (recombination reaction) ซึ่งจะทำให้โลโมนินเกิดการสลายตัวขึ้นหุติยภูมิกลายเป็นสารประกอบอะโรมาติก (aromatic) ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง เช่น เบนซีน โทลูอินและไซลีน เป็นต้น กลไกการสลายตัวขึ้นหุติยภูมิของโลโมนินแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กลไกการสลายตัวของไลโมเนน ไปเป็นสารประกอบอะโรมาติก [3]

สถานะที่เหมาะสมในการเกิดน้ำมันเชื้อเพลิง

1. อิทธิพลของอุณหภูมิ

Laresgoiti และคณะ [4] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส โดยทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 300-700°C พบว่า เมื่อไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500, 600 และ 700°C ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว 38.0, 38.2 และ 38.5 %wt ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง 44.8, 44.2 และ 43.7 %wt ตามลำดับ และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส 17.2, 17.5 และ 17.8 %wt ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 500°C ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ค่อนข้างคงที่ งานวิจัยนี้จึงสรุปว่าอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวคืออุณหภูมิ 500°C

Marco และคณะ [5] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส พบว่าในการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 300 และ 400°C การไพโรไลซิสยังเกิดไม่สมบูรณ์ เนื่องจากมีผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งอยู่มากคือ 87.6 และ 55.9 %wt ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิ 500 -700°C จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA (41.2 %wt) หรือกล่าวได้ว่าที่อุณหภูมินี้เกิดการสลายตัวของยางรถยนต์อย่างสมบูรณ์ และอุณหภูมิ 500°C เป็นอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการทดลองนี้เพราะเป็นอุณหภูมิแรกที่มีการสลายตัวของยางรถยนต์เกิด

เอทิลีนและเอทิลีนไดออกไซด์ที่วิ่งไปทางอื่นเพื่อใช้ในการผลิตเอทิลีน เมื่อผู้ผลิตเห็นประโยชน์ของการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างสมบูรณ์ ถึงแม้ว่าจะเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิสให้มีความมากขึ้นแต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีค่าคงที่

2. อิทธิพลของความดัน

Xinghua และคณะ [3] ศึกษาอิทธิพลของความดันที่มีต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส โดยทดลองที่อุณหภูมิ 500 °C ความดัน 3.5-4.0 และ 10 kPa พบว่าปริมาณรวมของเบนซิน โทลูอีนและไซลีนที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่ความดัน 10 kPa มีค่ามากกว่าที่ความดัน 3.5-4.0 kPa เนื่องจากที่ความดันต่ำไอระเหยที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะถูกดึงออกจากระบบโดยปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) จึงทำให้มีระยะเวลาได้รับความร้อนอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สั้นลง ไอระเหยจึงไม่เกิดการสลายตัวไปเป็นสารประกอบที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง

3. อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา

Wei และคณะ [6] ศึกษาการเปรียบเทียบผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงในกระบวนการไพโรไลซิสพบว่า เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ZSM-5 จะไปเพิ่มอัตราการไพโรไลซิสให้มากขึ้นเพียงเล็กน้อยและผลิตภัณฑ์ที่ได้จะคล้ายกับเมื่อไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา แต่เมื่อมีการเติมซีโอไลต์ ZSM-5 และ Lubricant base oil (LBO) ลงในกระบวนการไพโรไลซิสจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเพิ่มมากขึ้นจาก 33.3 เป็น 48 %wt แต่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สจะลดลงจาก 17.7 เป็น 9.3 %wt เมื่อนำผลิตภัณฑ์ของเหลวมากลั่นพบว่าปริมาณขององค์ประกอบหนัก (Heavy component) ลดลงแต่ปริมาณของน้ำมันเบา (light oil) ที่มีจำนวนคาร์บอนน้อยกว่า 12 อะตอมจะเพิ่มขึ้นจาก 77.8 เป็น 83.1%wt

Pakdel และคณะ [7] ศึกษาอิทธิพลของความดันที่มีต่อกระบวนการ Catalytic copyrolysis พบว่าเมื่อลดความดันในการไพโรไลซิส Resident time จะลดลงทำให้ไอระเหยจากการไพโรไลซิสไม่เกิดการสลายตัวขึ้นทฤษฎีปริมาณของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสูง

Xinghua และคณะ [3] ศึกษาผลกระทบของการเติม Basic additives ต่อการไพโรไลซิส คือ โซเดียมคาร์บอเนตและ โซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการไม่เติม Basic additives เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 450-600 °C ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและคงที่โดยมีค่ามากที่สุดประมาณ 48 %wt ที่อุณหภูมิ 550 °C แต่ในกรณีที่มีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในกระบวนการไพโรไลซิสพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีค่ามากที่สุดประมาณ 50 %wt ที่อุณหภูมิ 480 °C ที่เป็นเช่นนี้เพราะโซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วยให้เกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ของยางรถยนต์ไปเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวต่ำลง

Boxiong และคณะ [8] ศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด USY และ ZSM-5 โดยทำการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง พบว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และ USY ทำให้ได้ความเข้มข้นรวมของเบนซีนโทลูอีนไซลีนเพิ่มขึ้น 10% และปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ของยางรถยนต์ในการค้าไม่ต่างกันใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเบนซีน โทลูอินและไซลีนประมาณ 10 และ 22 %wt ตามลำดับ และทดลองเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของซีโอไลต์ USY ต่ออย่างรวดเร็ว พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วจาก 0.25 เป็น 1.0 จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเพิ่มขึ้นจาก 30.5 เป็น 49.9 %wt ขณะที่ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวลดลงจาก 31.6 เป็น 12.7 %wt และพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วทำให้ปริมาณของแนฟทาเบา (light naphtha) ซึ่งมีจุดเดือดต่ำกว่า 160°C เพิ่มขึ้น

สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดไลโมนีน

1. อิทธิพลของอุณหภูมิ

Napoli และคณะ [9] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดไลโมนีนพบว่าไลโมนีนเป็นองค์ประกอบหลักที่ได้จากการนำแก๊สขางมาไพโรไลซิสภายใต้การไหลของไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 450°C โดยปริมาณของไลโมนีนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 550°C และที่อุณหภูมิสูงกว่า 550°C ปริมาณของไลโมนีนจะคงที่

Bhowmick และคณะ [10] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในช่วง 250-510°C พบว่าไลโมนีนเกิดในช่วงอุณหภูมิ 350-450 °C และเมื่อไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงกว่า 480 °C ไลโมนีนจะเกิดการสลายตัวขึ้นหุติยภูมิเกิดเป็นไตรเมทิลเบนซีน (trimethylbenzene) และเอ็มไซมีน (m-xylene)

2. อิทธิพลของความดัน

Roy และคณะ [11] ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดไลโมนีน พบว่าปริมาณไลโมนีนจะเพิ่มขึ้นประมาณ 30-40 %wt เมื่อมีการลดความดันในเครื่องปฏิกรณ์จาก 28 เป็น 0.8 kPa

Xinghua และคณะ [3] ศึกษาปริมาณของไลโมนีนในแนฟทาที่ความดัน 3.5-10 kPa โดยนำแนฟทาที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่ความดัน 10 kPa และ 3.5-4.0 kPa มาวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่าไลโมนีนเพิ่มขึ้นจาก 7.8 เป็น 11.73 %wt

Pakdel และคณะ [7] ศึกษาอิทธิพลของความดันต่อการเกิดดีแอลไลโมนีนโดยทำการทดลองที่ความดัน 12 kPa อุณหภูมิ 500°C และใช้ข่างรถยนต์ 153 kg พบว่าสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ของเหลวและของแข็งเป็น 11.9, 57.5 และ 30.6 %wt ตามลำดับ และเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวพบว่ามีแนฟทา 11.9 %wt ดีแอลไลโมนีนที่มีแนฟทาเป็นองค์ประกอบหลัก 2.6 %wt เมื่อนำดีแอลไลโมนีนที่มีแนฟทาเป็นองค์ประกอบหลักมาวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่ามีสารประกอบอื่น ๆ ที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกับดีแอลไลโมนีนซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.1 ทำให้ไม่สามารถแยกดีแอลไลโมนีนให้บริสุทธิ์ได้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของดีแอลไลโมนีนที่มีเนฟทาเป็นองค์ประกอบหลัก

Composition	Boiling point(°C)	Concentration (wt%)
2,7,7-trimethylbicyclo(2,2,1)heptane	168	2
4-methyl-1-isopropylcyclohexene	170	3
1-methyl-3-isopropylbenzene	176	2
dl-limonene	175-176	92
Buthylbenzene	183	0.5
4-ethyl-1,2-dimethylbenzene	169	0.5
3-tert-butylthiophene	169	Trace
2,5-diethylthiophene	181	Trace

3. อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา

Wei และคณะ [6] ได้เปรียบเทียบผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสพบว่า เมื่อเติมซีโอไลต์ ZSM-5 และ Lubricant base oil (LBO) ลงในกระบวนการไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว จะเพิ่มปริมาณของสารประกอบที่มีจำนวนคาร์บอน 10 อะตอมและทำให้ปริมาณไลโมนีนเพิ่มขึ้นจาก 7.54 เป็น 13.58 %wt

Martin และคณะ [12] ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดคือ HZSM-5 Zeolite และ HY-Zeolite พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดนี้ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณไลโมนีนลดลง เนื่องจากเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการสลายโมเลกุลของไลโมนีนเป็นสารประกอบอะโรมาติกซึ่งมีขนาดโมเลกุลที่เล็ก ปริมาณไลโมนีนที่ได้จึงลดลง

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ ทดลองเกี่ยวกับกระบวนการไฟโรไลซิสยางรถยนต์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลท์ชนิดมอร์ดีไนต์ ระยะเวลาที่ใช้ไฟโรไลซิส โดยวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและของเหลว เพื่อหาสถานะที่เกิดดีแอลไอโมเนินมากที่สุด

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังในรูปที่ 3.1 โดยหลักการทำงานคือยางรถยนต์จะถูกบรรจุอยู่ที่ส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์ โดยเครื่องปฏิกรณ์ได้รับความร้อนจากเตาเผา อุณหภูมิของเตาเผาควบคุมได้จากอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และมีการป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าทางด้านข้าง เพื่อพาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฟโรไลซิสออกจากเครื่องปฏิกรณ์โดยอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนจะถูกควบคุมด้วยวาล์วควบคุมแก๊ส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกพาออกจากเครื่องปฏิกรณ์เข้าสู่เครื่องควบแน่นที่อุณหภูมิ -20°C กลายเป็นของเหลว ส่วนแก๊สที่ไม่ควบแน่นจะถูกเก็บในถุงเก็บแก๊ส และจะมีของแข็งที่เหลือจากการไฟโรไลซิสอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์

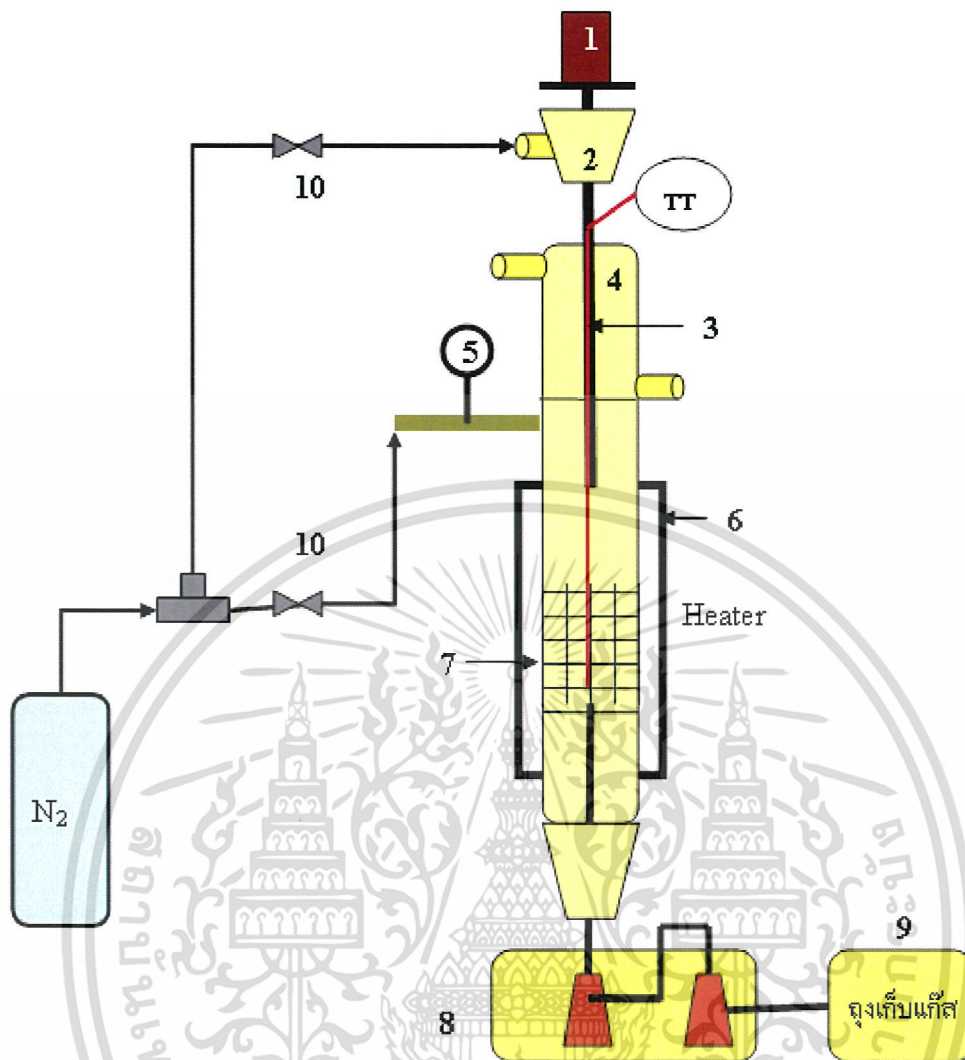
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ ยางรถยนต์ แก๊สไนโตรเจน และน้ำแข็ง

3.3 วิธีการทดลอง

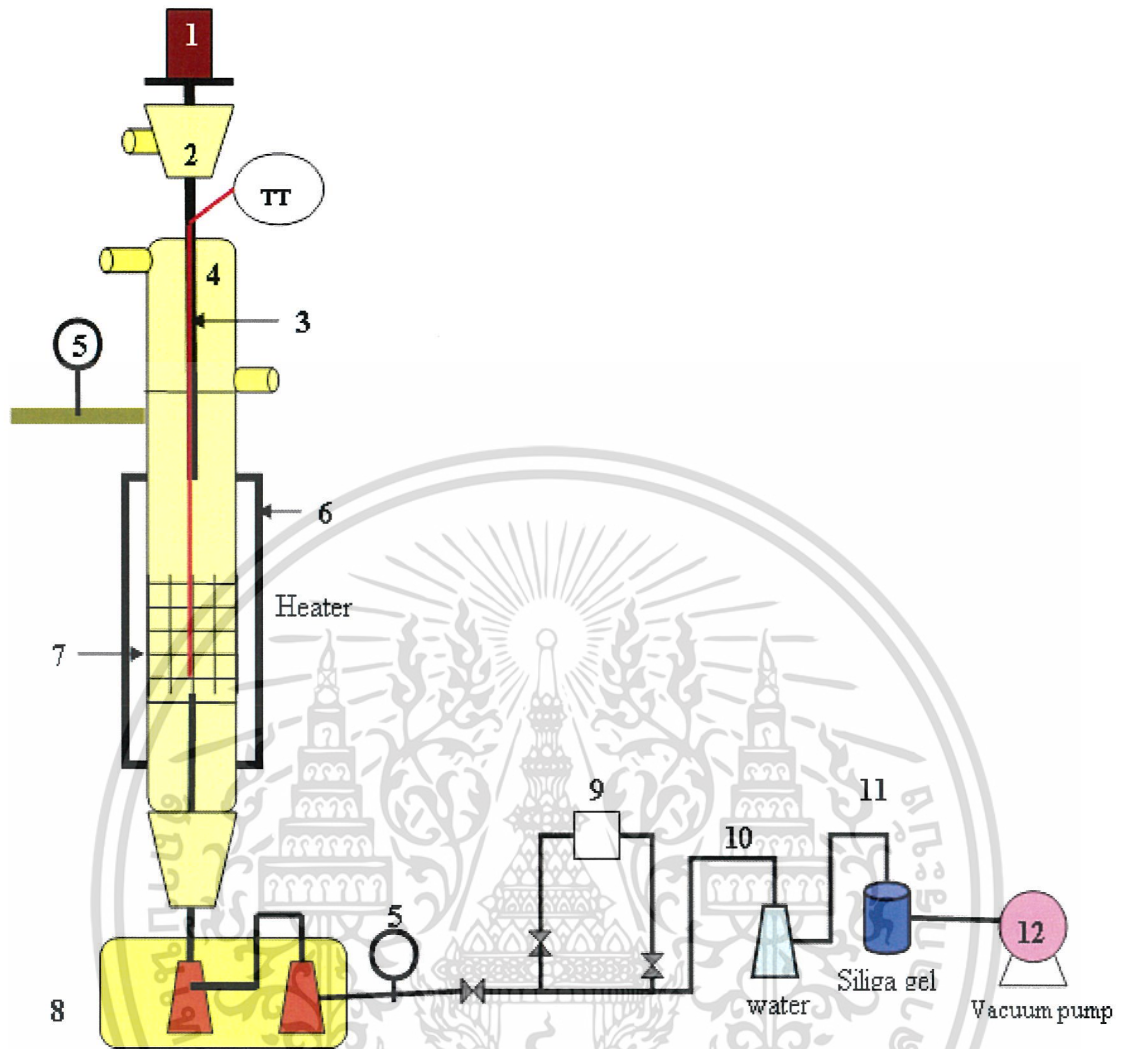
1. เตรียมยางรถยนต์ขนาด 0.833-1.168 mm โดยการร่อนตะแกรงเพื่อคัดขนาด
2. ชั่งน้ำหนักยางรถยนต์แล้วนำไปใส่ในส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์
3. จัดอุปกรณ์การทดลองให้พร้อมแล้วเปิดวาล์วควบคุมการไหลของไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์
4. ให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์จนได้อุณหภูมิที่ต้องการศึกษา แล้วปล่อยให้ยางรถยนต์ลงมาในเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้สกรูที่อยู่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์
5. เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดแล้วนำผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นแก๊สและของเหลวไปวิเคราะห์องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ชุดการทดลองไพโรไลซิสแบบกึ่งต่อเนื่อง 1. สกรูสำหรับส่งยางรถยนต์ 2. ที่บรรจุยาง 3. ท่อส่งยาง 4. ส่วนหล่อเย็น 5. อุปกรณ์วัดความดัน 6. เตาเผา 7. ตะแกรงบรรจุยาง 8. เครื่องควบคุมแรงดัน 9. ถังเก็บแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ชุดการทดลองไพโรไลซิสแบบกึ่งต่อเนื่องที่ความดัน 0.21 บรรยากาศ

1. สกรูสำหรับส่ง ยางรถยนต์ 2. ที่บรรจุยาง 3. ท่อส่งยาง 4. ส่วนหล่อเย็น
5. อุปกรณ์วัดความดัน 6. เต้าเผา 7. ตะแกรงบรรจุยาง 8. เครื่องควบแน่น
9. จุดเก็บตัวอย่างแก๊ส 10. น้ำกลั่น 11. ซิลิกาเจล 12. ปั๊มสุญญากาศ

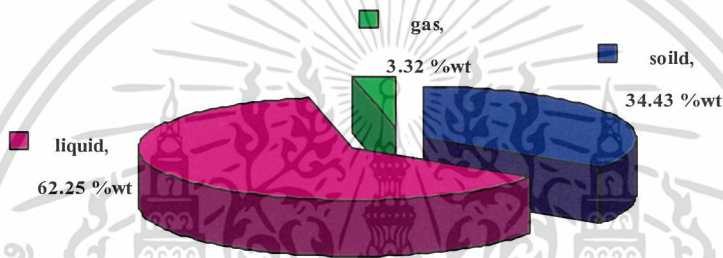
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

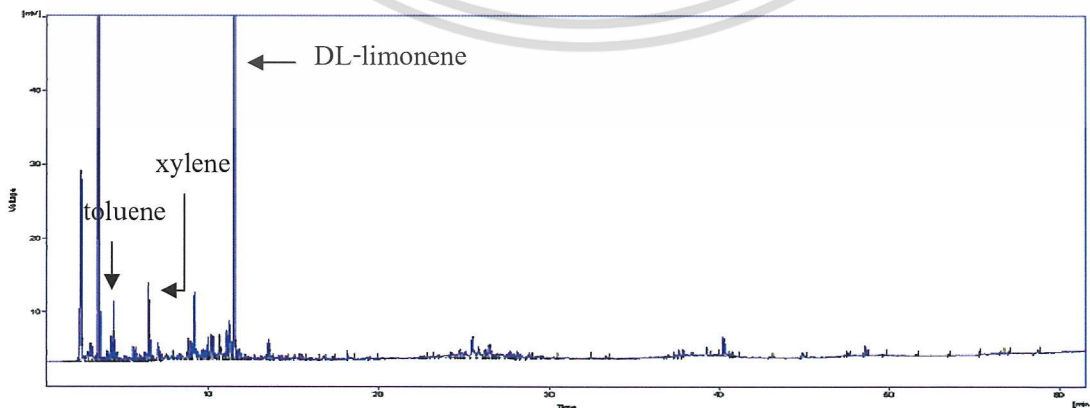
4.1 สภาวะมาตรฐานที่ใช้ในการทดลอง

สภาวะมาตรฐานที่ใช้ในการทดลอง คือ การไพโรไลซิสที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min ระยะเวลาในการไพโรไลซิส 120 min อุณหภูมิ 500°C ความดัน 1 atm พบว่าที่สภาวะนี้ทำให้ได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง 34.43 %wt ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว 62.25 %wt และผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส 3.32 %wt ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.1.1



รูปที่ 4.1.1 สัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC-FID) พบว่าในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวประกอบด้วย สารประกอบอัลเคน อัลคีนและ สารประกอบอะโรมาติก องค์ประกอบหลักในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวคือ ดีแอลไลโมนีน เมื่อคำนวณร้อยละของคาร์บอนน้ำหนักกลับของดีแอลไลโมนีนจะได้เท่ากับ 6.64 ซึ่งแสดงโครมาโทแกรมของของเหลวได้ดังรูปที่ 4.1.2 และร้อยละคาร์บอนน้ำหนักกลับในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวแสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1.2 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

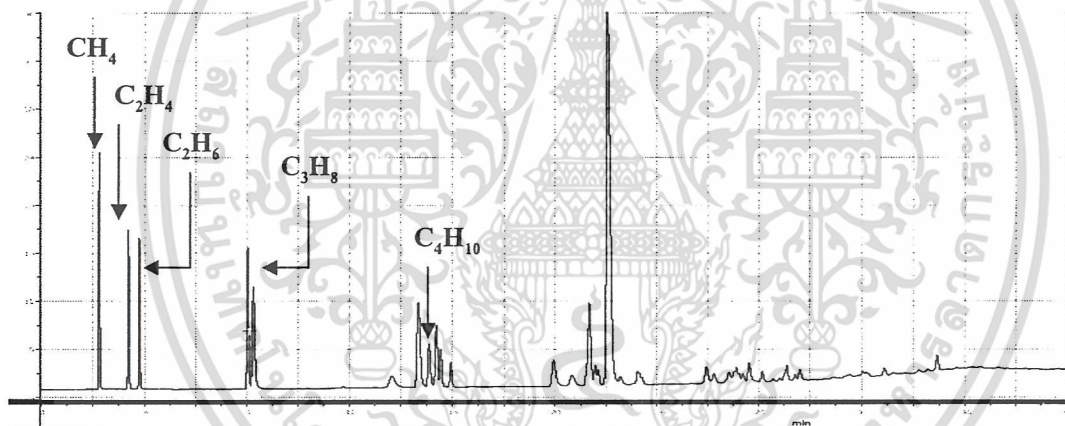
(ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิ 500°C, ระยะเวลา 120 min, อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min) ในการคำนวณร้อยละของคาร์บอนน้ำหนักกลับของดีแอลไลโมนีนในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวได้ดังตารางที่ 4.1.2

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ร้อยละคาร์บอนนำกลับในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

องค์ประกอบ	%C recovery (%)
เบนซิน	0.24
โทลูอีน	0.52
ไซลีน	0.59
ไลโมนีน	6.64
อื่นๆ	17.05

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC-FID) พบว่าในผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สจะมีองค์ประกอบดังนี้คือ CO, CO₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₆, C₄H₁₀ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ ซึ่งโครมาโทแกรมของแก๊สแสดงได้ดังรูปที่ 4.1.3 และร้อยละนำกลับขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สแสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.1.3 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

(ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิ 500°C, ระยะเวลา 120 min, อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 ml/min)

ตารางที่ 4.2 ร้อยละคาร์บอนนำกลับในผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

องค์ประกอบ	%C recovery (%)	องค์ประกอบ	%C recovery (%)
CO	0.00	C ₂ H ₆	0.03
CO ₂	0.03	C ₃ H ₆	0.04
CH ₄	0.03	C ₄ H ₁₀	0.02
C ₂ H ₄	0.03	อื่นๆ	0.09

4.2 อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการไพโรไลซิส

จากการปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส คือ อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจน ระยะเวลาการไพโรไลซิส อุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลท์ชนิดมอร์เดนไนต์ ตัวอย่างรถยนต์ ซึ่งแสดงรายละเอียดของแต่ละปัจจัยดังต่อไปนี้

4.2.1 อิทธิพลของอัตราการไหลของไนโตรเจน

สภาวะมาตรฐานที่ใช้ในการทดลองคือ ยางรถยนต์ขนาด 0.833-1.168 mm จำนวน 5 g ระยะเวลาในการไพโรไลซิส 120 min ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500°C ความดัน 1 atm

รูปที่ 4.2.1 (ก) แสดงอิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนที่มีต่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ พบว่า อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊สเท่านั้น แต่ไม่ส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ที่อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจน 50 cm³/min ทำให้ได้สัดส่วนผลิตภัณฑ์เหลวสูงที่สุดคือ 62.25 %wt และเมื่อลดอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนลงเป็น 25 cm³/min พบว่า สัดส่วนของผลิตภัณฑ์เหลวลดลงเหลือ 42.27 %wt ในขณะที่สัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนลดลงจะทำให้ไอระเหยที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมีระยะเวลาในการได้รับความร้อนอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้น จึงเกิดการสลายตัวขั้นทุติยภูมิทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สจึงเพิ่มขึ้น

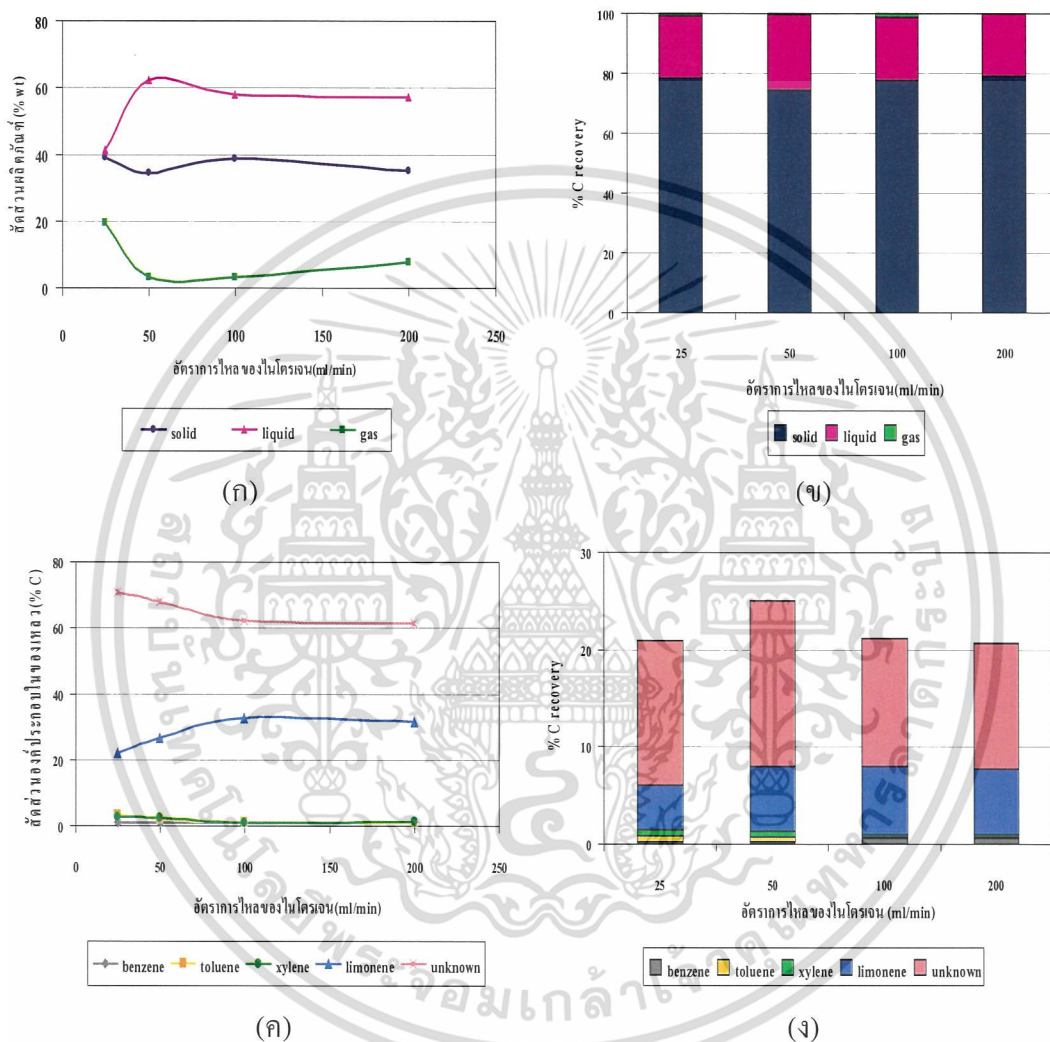
จากรูปที่ 4.2.1 (ข) พบว่าร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับในผลิตภัณฑ์ของแข็งมีมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊ส ที่อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจน 50 cm³/min ทำให้ได้ร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับในผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดคือ 25.05

รูปที่ 4.2.1 (ค) แสดงสัดส่วนขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เหลว พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนจาก 25 เป็น 100 cm³/min จะทำให้สัดส่วนของดีแอลไอโมเนีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 21.98 เป็น 32.82 %C ในขณะที่สัดส่วนของเบนซิน โทลูอินและไซลีนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมาวิเคราะห์หาร้อยละของคาร์บอนนำกลับในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนจาก 25 เป็น 50 cm³/min ทำให้ร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับในดีแอลไอโมเนีนเพิ่มขึ้นจาก 4.60 เป็น 6.64 (0.58 เป็น 0.64 mol/l) เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนทำให้ไอระเหยจากกระบวนการไพโรไลซิสมีระยะเวลาในการได้รับความร้อนอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง จึงไม่เกิดการสลายตัวขั้นทุติยภูมิของดีแอลไอโมเนีนไปเป็นสารประกอบที่มีขนาดโมเลกุลเล็กเช่น เบนซิน โทลูอินและไซลีน เป็นต้น นอกจากนี้เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนจาก 100 เป็น 200 cm³/min พบว่าแนวโน้มของดีแอลไอโมเนีนค่อนข้างคงที่ดังแสดงในรูปที่ 4.2.1 (ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมาวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่ามีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน อีเทน เอทิลีน โพรพิลีน บิวเทนและแก๊สอื่นๆ เป็นองค์ประกอบ เมื่อคำนวณหาร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับในผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สพบว่า การเพิ่มระยะเวลาในการไพโรไลซิสมีผลให้ร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับในแก๊สลดลงเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.2.1 อิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อ

ก) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ (%wt)

ข) %C recovery ของผลิตภัณฑ์

ค) สัดส่วนขององค์ประกอบในของเหลว (%C)

ง) %C recovery ขององค์ประกอบในของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 อิทธิพลของระยะเวลาในการไพโรไลซิส

สภาวะมาตรฐานที่ใช้ในการทดลอง คือ ยางรถยนต์ขนาด 0.833-1.168 mm จำนวน 5 g อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน $50 \text{ cm}^3/\text{min}$ ไพโรไลซิสที่ความดัน 1 atm อุณหภูมิ 400°C เหตุผลที่เลือกใช้อุณหภูมิ 400°C เป็นสภาวะมาตรฐานเพราะทำให้ทราบว่าที่อุณหภูมินี้ยางรถยนต์สลายตัวสมบูรณ์ด้วยระยะเวลาการไพโรไลซิสนานเท่าไร เพื่อในการศึกษาปัจจัยอื่น ๆ จะได้ใช้ระยะเวลาที่ยางรถยนต์สลายตัวได้อย่างสมบูรณ์ และเพื่อแน่ใจว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 400°C ยางรถยนต์จะสลายตัวอย่างสมบูรณ์เมื่อใช้ระยะเวลาที่อุณหภูมิ 400°C สลายตัวอย่างสมบูรณ์

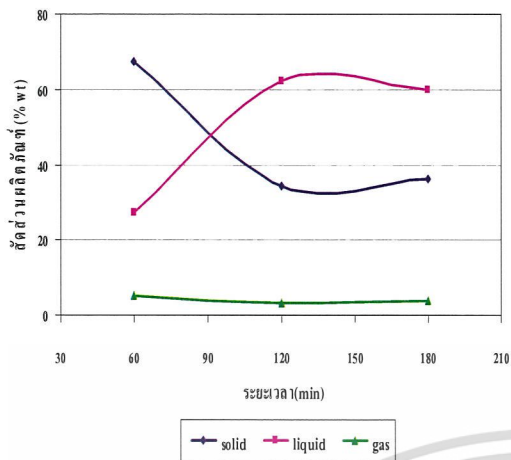
รูปที่ 4.2.2 (ก) แสดงอิทธิพลของระยะเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสที่มีผลต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการไพโรไลซิสจาก 60 เป็น 120 min สัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 37.23 เป็น 62.25 %wt ตรงข้ามกับสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งที่มีแนวโน้มลดลงจาก 56.47 เป็น 27.33 %wt ในขณะที่สัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สก่อนข้างคองที่เนื่องจากระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสเพียง 60 min ไม่เพียงพอที่จะทำให้ยางรถยนต์เกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสจาก 120 เป็น 180 min พบว่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลวและแก๊สก่อนข้างคองที่ แสดงให้เห็นว่าที่ระยะเวลาในการไพโรไลซิส 120 min ทำให้เกิดการสลายตัวของยางรถยนต์อย่างสมบูรณ์

จากรูปที่ 4.2.2 (ข) พบว่าร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับในผลิตภัณฑ์ของแข็งมีมากที่สุดเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊ส โดยการเพิ่มระยะเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสจาก 60 เป็น 120 min ทำให้ร้อยละของคาร์บอนนำกลับในผลิตภัณฑ์เหลวเพิ่มขึ้นจาก 10.32 เป็น 22.94 และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการไพโรไลซิสจาก 120 เป็น 180 min พบว่าร้อยละของคาร์บอนนำกลับในผลิตภัณฑ์ของแข็งและของเหลวก่อนข้างคองที่

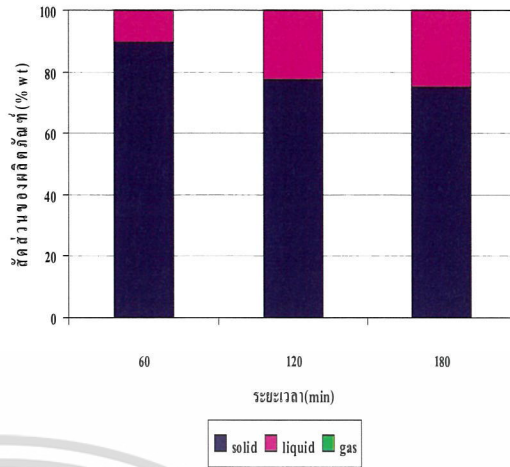
รูปที่ 4.2.2 (ค) แสดงสัดส่วนขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว โดยพบว่าองค์ประกอบต่าง ๆ มีแนวโน้มก่อนข้างคองที่ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้ระยะเวลาในการไพโรไลซิส 120 min

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมาวิเคราะห์หาร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับ พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการไพโรไลซิสจาก 60 เป็น 120 min ทำให้ร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับในของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 2.72 เป็น 5.70 (0.40 เป็น 0.58 mol/l) เมื่อเพิ่มระยะเวลาเป็น 180 min ทำให้ร้อยละของคาร์บอนนำกลับของไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 6.17 (0.60 mol/l) ดังแสดงในรูปที่ 4.2.2 (ง)

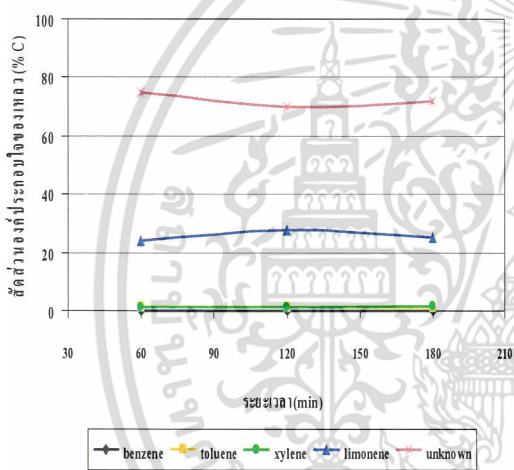
เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมาวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน เอทิลีน อีเทน โพรเพน บิวเทนและแก๊สอื่นๆ เป็นองค์ประกอบ เมื่อคำนวณหาหรร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับในแก๊สพบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการไพโรไลซิสจะทำให้ร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับในแก๊สลดลงเพียงเล็กน้อย



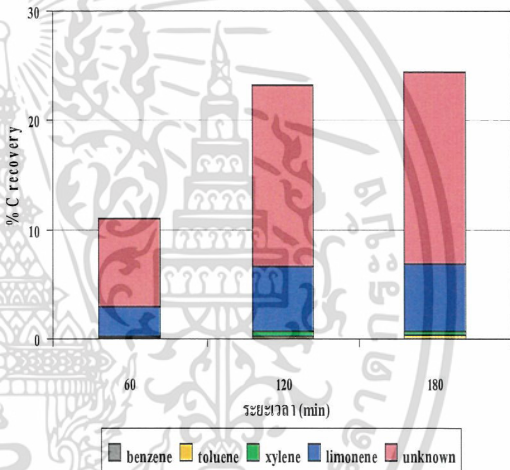
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.2.2 อิทธิพลของระยะเวลาในการไพโรไลซิสที่มีต่อ

- ก) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ (%wt)
- ข) %C recovery ของผลิตภัณฑ์
- ค) สัดส่วนขององค์ประกอบในของเหลือ (%C)
- ง) %C recovery ขององค์ประกอบในของเหลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิส

จากรูปที่ 4.2.3 (ก) แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสมีอิทธิพลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ทั้งของแข็ง ของเหลวและแก๊ส โดยที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นอุณหภูมิที่ทำให้ได้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุดคือ 62.25 %wt ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Laresgoiti และคณะ [4] และงานวิจัยของ Marco และคณะ [5] ซึ่งพบว่าอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการเกิดผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวคือ 500°C

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Xinghua และคณะ [3] ที่ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในช่วง 450 จนถึง 600°C ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.3 สัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองเทียบกับงานวิจัยของ Xinghua และคณะ [3]

อุณหภูมิ (°C)	ของเหลว (%wt)		ของแข็ง (%wt)		แก๊ส (%wt)	
	Xinghua และคณะ	งานวิจัยนี้	Xinghua และคณะ	งานวิจัยนี้	Xinghua และคณะ	งานวิจัยนี้
450	32.9	59.58	51.7	33.51	15.4	6.91
500	42.1	62.25	36.1	34.43	21.8	3.32
550	47.1	56.30	36.9	35.29	16.0	8.41
600	48.8	55.62	34.8	35.19	16.3	9.18

การลดอุณหภูมิจาก 500 เป็น 350°C จะทำให้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งเพิ่มขึ้นจาก 33.43 เป็น 55.80 %wt สัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีแนวโน้มลดลงจาก 62.25 เป็น 36.70 %wt ในขณะที่สัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สค่อนข้างคงที่เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500°C ยางรถยนต์ยังเกิดการสลายตัวไม่สมบูรณ์สังเกตได้จากสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของแข็งเหลืออยู่มาก และการเพิ่มอุณหภูมิจาก 500 เป็น 600°C สัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจะค่อนข้างคงที่ แต่สัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่สัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงไอระเหย่ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กที่อยู่ในรูปของแก๊ส

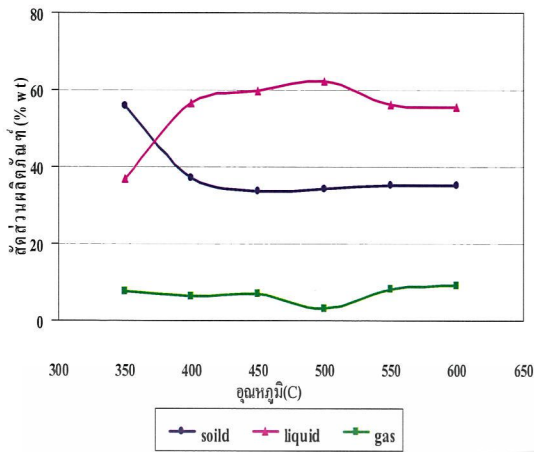
จากรูปที่ 4.2.3 (ข) พบว่าร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับในผลิตภัณฑ์ของแข็งมีมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊ส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิสจาก 350 เป็น 500°C ทำให้อัตราของคาร์บอนที่นำกลับในผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 14.69 เป็น 24.85 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสจาก 500 เป็น 600°C ร้อยละของคาร์บอนนำกลับในผลิตภัณฑ์ของเหลวจะลดลงจาก 25.13 เป็น 21.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

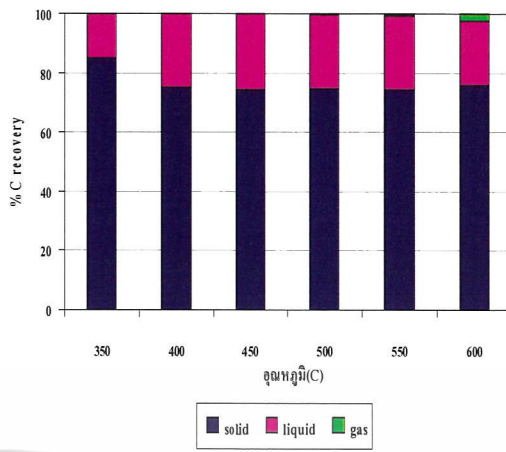
จากรูปที่ 4.2.3 (ค) แสดงสัดส่วนขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เหลว พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับตัวแปรอื่น ๆ โดยการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้สัดส่วนของดีแอลไอ โมโนมีแนวโน้มลดลงในขณะที่เบนซิน โทลูอีนและไซลีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เมื่อวิเคราะห์หาร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจาก 350 เป็น 450°C ทำให้ร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับดีแอลไอ โมโนเพิ่มขึ้นจาก 5.08 เป็น 6.97 (0.44 เป็น 0.63 mol/l) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 450 เป็น 600°C ร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับดีแอลไอ โมโนมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงรูปที่ 4.2.3 (ง) เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงไลโมเนนจะเกิดการสลายตัวขั้นทุติยภูมิไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xinghua และคณะ [3] ที่ศึกษากลไกการสลายตัวของไลโมเนน

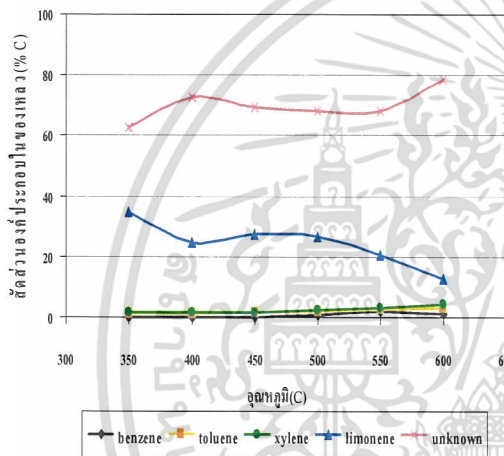
เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมาวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่ามีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน อีเทน เอทิลีน โพรเพน บิวเทนและแก๊สอื่นๆ เป็นองค์ประกอบ เมื่อคำนวณหาร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับในแก๊สพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิสจะทำให้ร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับในแก๊สเพิ่มขึ้นโดยมีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิ 600°C



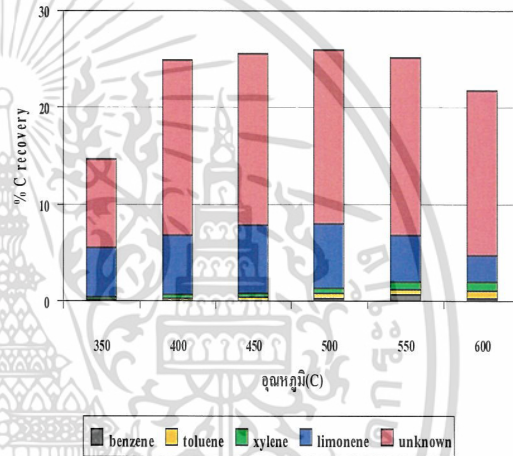
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่มีต่อ

ก) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ (%wt)

ข) %C recovery ของผลิตภัณฑ์

ค) สัดส่วนขององค์ประกอบในของเหลว (%C)

ง) %C recovery ขององค์ประกอบในของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 อิทธิพลของความดันที่มีต่อกระบวนการไพโรไลซิส

ตารางที่ 4.2.1 แสดงอิทธิพลของความดันที่มีผลต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์ พบว่าเมื่อลดความดันจาก 1 เป็น 0.21 atm จะทำให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์เหลวมีแนวโน้มลดลงจาก 62.25 เป็น 59.35 %wt สัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นจาก 3.32 เป็น 6.87 %wt ในขณะที่สัดส่วนผลิตภัณฑ์ของแข็งค่อนข้างคงที่ เนื่องจากที่ความดันต่ำ ๆ ไอรระเหยที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลงปริมาณของเหลวที่ได้จึงลดลง

เมื่อวิเคราะห์หาร้อยละของคาร์บอนน้ำกลับในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวพบว่าเมื่อลดความดันจาก 1 เป็น 0.21 atm ทำให้ร้อยละของคาร์บอนน้ำกลับดีแอลโตโมเนีนลดลง จาก 6.64 เป็น 6.30 ดังแสดงในตารางที่ 4.2.2

ตารางที่ 4.2.1 อิทธิพลของความดันที่มีผลต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์

สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (%wt)	ความดัน	
	1 atm	0.21 atm
ของแข็ง	34.43	33.78
ของเหลว	62.25	59.35
แก๊ส	3.32	8.82

ตารางที่ 4.2.2 ร้อยละของคาร์บอนน้ำกลับในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว

%C recovery (%)	ความดัน	
	1 atm	0.21 atm
เบนซิน	0.24	0.00
โทลูอิน	0.52	0.74
ไซลีน	0.59	0.71
ไลโมเนีน	6.64	6.30
อื่นๆ	17.05	12.59

4.2.5 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดมอร์ดินิต (H-Mordenite)

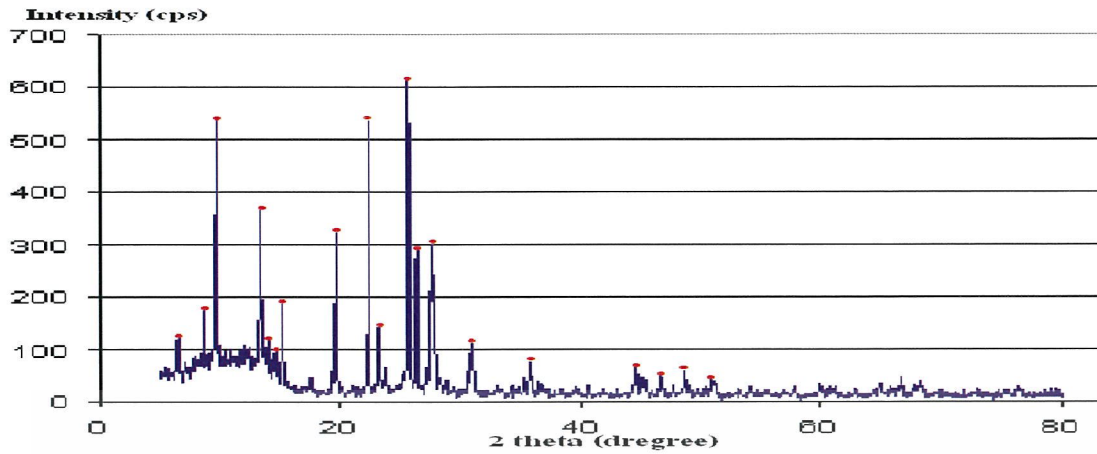
ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดมอร์ดินิต (H-Mordenite) ที่ใช้ในการทดลองแสดงด้วยรูปจาก การวิเคราะห์ X-ray Diffraction (XRD) ในรูปที่ 4.2.5 (ก) และจากรูปที่ 4.2.5 (ข) อิทธิพลของตัวเร่ง ปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดมอร์ดินิต (H-Mordenite) ที่มีผลต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์ โดยทำการ เปรียบเทียบเมื่อไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากับเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนน้ำหนักของตัวเร่ง ปฏิกิริยาต่ออย่างรยยนต์ (Catalyst/Tyres) เป็น 0.01 และ 0.02 ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำหนักของ ตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออย่างรยยนต์ (Catalyst/Tyres) เป็น 0, 0.01 และ 0.02 ทำให้ได้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ เป็นของเหลวเป็น 62.25, 56.62 และ 53.28 %wt ตามลำดับ และสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเป็น 3.32, 8.82 และ 11.61 %wt ตามลำดับ ในขณะที่สัดส่วนผลิตภัณฑ์ของแข็งค่อนข้างคงที่ ซึ่งเห็น ได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออย่างรยยนต์ (Catalyst/Tyres) จะทำให้สัดส่วน ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีแนวโน้มลดลงแต่สัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมตัวเร่ง ปฏิกิริยาจะช่วยให้เกิดการสลายตัวของโมเลกุลของไฮระเหยที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสให้มี ขนาดโมเลกุลเล็กลง ปริมาณดีแอลโหมินินที่ได้จึงมากขึ้นซึ่งการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัย ของ Roy และคณะ [11] และ Xinghua และคณะ [3]

รูปที่ 4.2.5 (ค) พบว่าร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว เมื่อเพิ่มอัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ อย่างรยยนต์ในกระบวนการไพโรไลซิสเป็น 0, 0.01 และ 0.02 ตามลำดับ จะทำให้ได้ร้อยละของ คาร์บอนที่นำกลับในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวลดลงเป็น 25.05, 22.26 และ 21.01 ตามลำดับ ในขณะที่ ร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับในผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเพิ่มขึ้นเป็น 0.25, 1.46 และ 1.65 ตามลำดับ

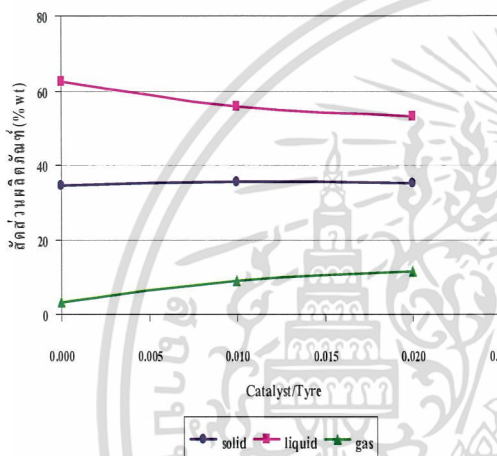
รูปที่ 4.2.5 (ง) แสดงสัดส่วนขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว พบว่าเมื่อเพิ่ม อัตราส่วนน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออย่างรยยนต์ (Catalyst/Tyres) เป็น 0, 0.01 และ 0.02 ทำให้ สัดส่วนของดีแอลโหมินินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่องค์ประกอบอื่นๆ มีค่าค่อนข้างคงที่

เมื่อวิเคราะห์ร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับของดีแอลโหมินิน พบว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ซีโอไลต์ชนิดมอร์ดินิต (H-Mordenite) ทำให้ร้อยละของคาร์บอนนำกลับดีแอลโหมินินลดลงดัง แสดงในรูปที่ 4.2.5 (จ)

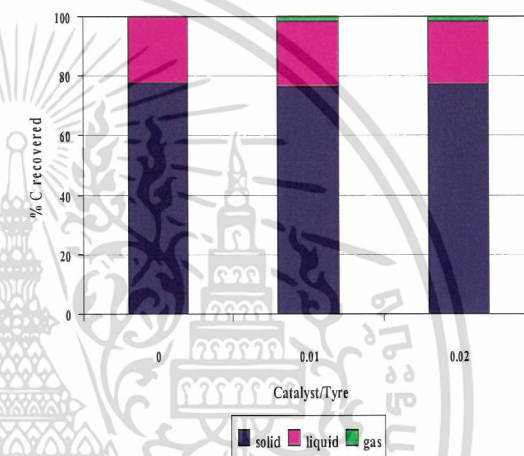
เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมาวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน อีเทน เอทิลีน โพรเพน บิวเทนและแก๊สอื่นๆ เมื่อคำนวณหาร้อยละของ คาร์บอนที่นำกลับในแก๊สพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออย่างรยยนต์จะ ทำให้ร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับในแก๊สเพิ่มขึ้น โดยมีค่ามากที่สุดคือ 1.65 เมื่ออัตราส่วน โดย น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออย่างรยยนต์เป็น 0.02



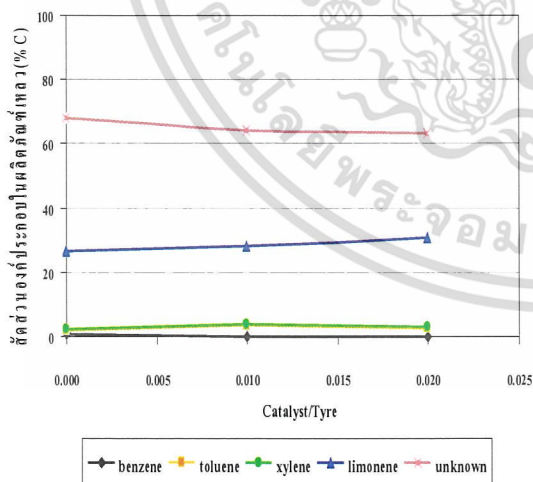
(ก)



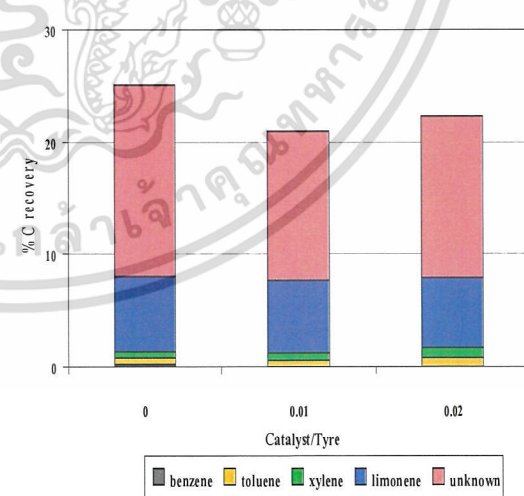
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.2.5 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลท์ชนิดมอร์ดินิต์ (H-Mordenite) ที่มีต่อ

ก) X-ray Diffraction (XRD) ของ H-Mordenite

ข) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ (%wt)

ค) %C recovery ของผลิตภัณฑ์

ง) สัดส่วนขององค์ประกอบในของเหลว

จ) %C recovery ขององค์ประกอบในของเหลว

การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการไพโรไลซิสของรถยนต์ เพื่อนำกลับดีเซลโพลีเมอร์ในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว คือ ที่อุณหภูมิ 450°C ความดัน 1 atm อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจน 50 cm³/min และใช้ระยะเวลาในการไพโรไลซิส 120 min ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว 59.58 %wt โดยปัจจัยที่มีผลต่อดีเซลโพลีเมอร์มากที่สุดคืออุณหภูมิ เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมาวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่ามีส่วนของดีเซลโพลีเมอร์ 25.50 %C ทำให้ได้ร้อยละของคาร์บอนที่นำกลับของดีเซลโพลีเมอร์มากที่สุดถึง 6.97 นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดมอร์ดีไนต์ไม่ส่งผลดีต่อการนำกลับดีเซลโพลีเมอร์ โดยจะทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวลดลงแต่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเพิ่มขึ้นและดีเซลโพลีเมอร์ในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ศึกษาวิธีการแยกองค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ของเหลว เพื่อหาโอกาสและความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Pakdel, C. Roy, D.M. Pantea (2001). "Formation of dl-limonene in used tire vacuum pyrolysis oils." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 57: 1646-1649.
- [2] M. Yates, B. Casal, M. Iglesias, M. Esteban, E. Ruiz-Hitzky, M.A. Matin-Luengo (2007). "Synthesis of p-cymene from limonene a renewable feedstock." *Applied Catalysis* 81 : 218-224
- [3] X. Zhang, T. Wang, L. Ma, J. Change (2007). "Vacuum Pyrolysis of waste tires with basic additives." *Waste management*.
- [4] M.F. Laresgoiti, B. M. Caballero, I. De Marco, A. Torres, M.A. Cabroero, M.J. Comon (2004). "Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 71: 917-934.
- [5] I.D.M. Rodriguez, M. F. Laresgoiti, M.A. Cabrero, A. Torres, M.J. Chomon, B. Caballero (2001). "Pyrolysis of scrap tyres. " *Fuel Processing Technology* 72: 9-22.
- [6] W. Qu, Q. Zhou, J. Zhang, Y.H. Wu, J.W. Yang, D.Z. Wang (2006). "Pyrolysis of waste tire on ZSM-5 Zeolite with enhanced catalytic activity." *Polymer Degradation and Stability* 91: 2389-2395.
- [7] H. Pakdel, D. M. Pantea, C. Roy (2001). "Production of dl-limonene by vacuum pyrolysis of used tires" *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 57: 91-107.
- [8] B. Shen, C. Wu, R. Wang, B. Guo, C. Liang (2006). "Pyrolysis of scrap tyres with zeolite USY." *Journal of Hazardous Material* 37: 1065-1073.
- [9] A. Napoli, Y. Soudais, D. Lecomte, S. Castillo (1997). " Scrap tyre pyrolysis:Are the effluents valuable products" *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 40-41: 373-382.
- [10] A.K. Bhowmick, S.K. De, A. Roychoudhury (1992). " Self-crosslinkable ternary blend of chlorosulfonate polyethylene, epoxidized natural rubber and carboxylated nitrile rubber" *Journal of Analytical and Applied Polymer Science* 33: 1125.
- [11] C. Roy, B. Benallal, C. Amen-Chen, H. Darmstadt (1997). "Characterization of naphtha and carbon black obtained by vacuum pyrolysis of polyisoprene rubber" *Fuel Process Tecnology* 50: 87-103.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [12] M. Olazar, R. Aguado, M. Arabiourrutia, G. Lopez, A. Borona, J. Bilbao (2008). "Catalyst Effect on the Composition of Tire Pyrolysis Products" Energy and Fuels.
- [13] M. Stanciulescu, M. Ikura (2006). "Limonene ether from tire pyrolysis oil." Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 75: 217-225.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ผลการทดลองไพโรไลซิส

ตารางที่ ก ข้อมูลการทดลองที่สภาวะต่างๆด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง

สภาวะ ที่	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง				สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (%wt)		
	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (atm)	เวลา (min)	อัตราการป้อน ไนโตรเจน (cm ³ /min)	ของแข็ง	ของเหลว	แก๊ส
1.	500	1.00	120	25	39.11	41.27	19.62
2.	500	1.00	120	50	34.43	62.25	3.32
3.	500	1.00	120	100	38.83	57.99	3.18
4.	500	1.00	120	200	35.22	57.12	7.66
5.	500	1.00	60	50	67.50	27.33	5.17
6.	500	1.00	180	50	38.28	57.88	3.84
7.	350	1.00	120	50	55.80	36.70	7.50
8.	400	1.00	120	50	37.24	56.47	6.29
9.	450	1.00	120	50	33.51	59.58	6.91
10.	550	1.00	120	50	35.29	56.30	8.41
11.	600	1.00	120	50	35.19	55.62	9.18
12.	500	0.21	120	50	33.78	59.35	6.87
13.*	500	1.00	120	50	35.65	55.62	8.82
14.**	500	1.00	120	50	35.10	53.28	11.61

หมายเหตุ 1. ใช้ยางรถยนต์ขนาด 0.833-1.168 mm

2. * เดิมตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 g

** เดิมตัวเร่งปฏิกิริยา 0.10 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ร้อยละของคาร์บอนนำกลับในผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว แก๊ส

ตารางที่ ข ร้อยละของคาร์บอนนำกลับในผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว แก๊ส

ปัจจัยที่ศึกษา		ร้อยละของคาร์บอนนำกลับในผลิตภัณฑ์		
		ของแข็ง	ของเหลว	แก๊ส
อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน (cm^3/min)	25	78.33	20.91	0.76
	50	74.70	25.05	0.25
	100	77.58	21.11	1.31
	200	79.12	20.72	0.16
เวลา (min)	60	89.52	10.32	0.16
	120	77.49	22.33	0.18
	180	75.01	24.85	0.14
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	350	85.15	14.69	0.16
	400	74.99	24.85	0.16
	450	74.32	25.50	0.18
	500	74.70	25.05	0.25
	550	74.19	25.13	0.67
	600	75.83	21.70	2.47
ความดัน (atm)	1.00	-	25.05	-
	0.21	-	20.34	-
Catalyst/Tyres	0.01	76.28	22.26	1.46
	0.02	77.34	21.01	1.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ร้อยละของคาร์บอนนำกลับในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่เป็นของเหลว

ตารางที่ ค ร้อยละของคาร์บอนนำกลับในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว

ปัจจัยที่ศึกษา		ร้อยละของคาร์บอนนำกลับในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว				
		เบนซิน	โทลูอิน	ไซลีน	ไลโมนีน	อื่นๆ
อัตราการป้อนแก๊ส ไนโตรเจน (cm ³ /min)	25	0.23	0.66	0.59	4.6	14.82
	50	0.24	0.52	0.59	6.64	17.05
	100	0.57	0.20	0.25	6.93	13.16
	200	0.56	0.20	0.24	6.80	12.92
เวลา (min)	60	0.00	0.13	0.11	2.72	8.09
	120	0.00	0.29	0.37	5.70	16.60
	180	0.00	0.30	0.38	6.17	17.62
อุณหภูมิ (°C)	350	0.00	0.17	0.22	5.08	9.21
	400	0.00	0.31	0.39	6.17	17.97
	450	0.00	0.43	0.42	6.97	17.68
	500	0.24	0.52	0.59	6.64	17.05
	550	0.59	0.63	0.73	4.84	18.34
	600	0.27	0.73	0.94	2.74	17.03
ความดัน (atm)	0.21	0.00	0.74	0.71	6.30	12.59
	1.00	0.24	0.52	0.59	6.64	17.05
Catalyst/Tyres	0.01	0.00	0.78	0.90	6.28	14.30
	0.02	0.00	0.59	0.67	6.49	13.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

สัดส่วนขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ตารางที่ ง สัดส่วนขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เหลว

ปัจจัยที่ศึกษา		สัดส่วนขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เหลว				
		เบนซิน	โทลูอีน	ไซลีน	ไลโมนีน	อื่นๆ
อัตราการป้อนแก๊ส ไนโตรเจน (cm ³ /min)	25	1.12	3.18	2.83	21.98	70.89
	50	0.97	2.07	2.38	26.52	68.07
	100	1.02	0.96	1.18	32.82	62.34
	200	1.21	1.23	1.38	31.54	61.46
เวลา (min)	60	0.00	1.12	1.08	24.09	74.79
	120	0.00	1.25	1.438	27.52	69.79
	180	0.00	1.16	1.57	25.33	71.95
อุณหภูมิ (°C)	350	0.00	1.14	1.53	34.61	62.72
	400	0.00	1.24	1.56	24.86	72.34
	450	0.00	1.68	1.66	27.34	69.32
	500	0.97	2.07	2.38	26.52	68.07
	550	2.02	2.59	3.09	20.69	68.07
	600	1.25	3.36	4.33	12.61	78.45
ความดัน (atm)	0.21	0.00	3.62	3.50	30.97	61.92
	1.00	0.97	2.07	2.38	26.52	68.07
Catalyst/Tyres	0.01	0.00	3.48	4.04	28.23	64.24
	0.02	0.00	2.83	3.18	30.90	63.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ร้อยละของคาร์บอนน้ำกลับในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่เป็นแก๊ส

ตารางที่ จ ร้อยละของคาร์บอนน้ำกลับในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

ปัจจัยที่ศึกษา		ร้อยละของคาร์บอนน้ำกลับในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส							
		CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₄ H ₁₀	อื่นๆ
อัตราการป้อนแก๊ส ไนโตรเจน (cm ³ /min)	25	0.00	0.02	0.02	0.10	0.10	0.10	0.02	0.36
	50	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.09
	100	0.00	0.03	0.02	0.04	0.14	0.29	0.03	0.62
	200	0.00	0.02	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.08
เวลา (min)	60	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.08
	120	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.09
	180	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.05
อุณหภูมิ (°C)	350	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.08
	400	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.07
	450	0.00	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.07
	500	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.09
	550	0.01	0.06	0.07	0.08	0.07	0.10	0.03	0.26
	600	0.01	0.04	0.09	0.42	0.37	0.34	0.11	1.08
Catalyst/Tyres	0.01	0.00	0.02	0.03	0.19	0.28	0.17	0.07	0.68
	0.02	0.01	0.04	0.03	0.20	0.22	0.18	0.08	0.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

สัดส่วนขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

ตารางที่ จ สัดส่วนขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊ส

ปัจจัยที่ศึกษา		สัดส่วนขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊ส							
		CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₄ H ₁₀	อื่นๆ
อัตราการป้อนแก๊ส ไนโตรเจน (cm ³ /min)	25	0.42	3.27	2.82	13.72	13.07	13.33	6.30	47.70
	50	1.30	11.28	10.10	10.48	10.24	14.51	6.45	34.64
	100	0.24	2.48	1.81	10.31	10.50	22.41	5.42	46.83
	200	0.00	13.01	11.18	9.83	12.65	9.26	4.90	49.17
เวลา (min)	60	0.00	14.06	3.84	7.42	6.27	10.88	7.41	50.40
	120	1.25	17.11	8.56	6.67	7.36	10.27	3.96	44.82
	180	0.23	7.56	6.12	7.75	8.74	11.24	7.88	50.48
อุณหภูมิ (°C)	350	0.00	14.06	3.84	7.42	6.27	10.88	7.39	50.42
	400	1.25	17.11	8.56	6.67	7.36	10.27	3.96	44.82
	450	1.76	15.34	15.10	6.43	8.26	9.45	6.22	37.43
	500	1.30	11.28	11.10	10.48	10.24	14.51	6.45	34.64
	550	1.16	8.32	11.04	11.45	9.87	14.49	4.87	39.79
	600	0.36	1.73	3.68	17.13	15.11	13.90	4.32	43.78
Catalyst/Tyres	0.01	0.30	1.66	2.30	13.30	19.38	11.30	4.98	46.79
	0.02	0.35	2.35	1.96	11.98	13.28	11.10	4.78	54.19

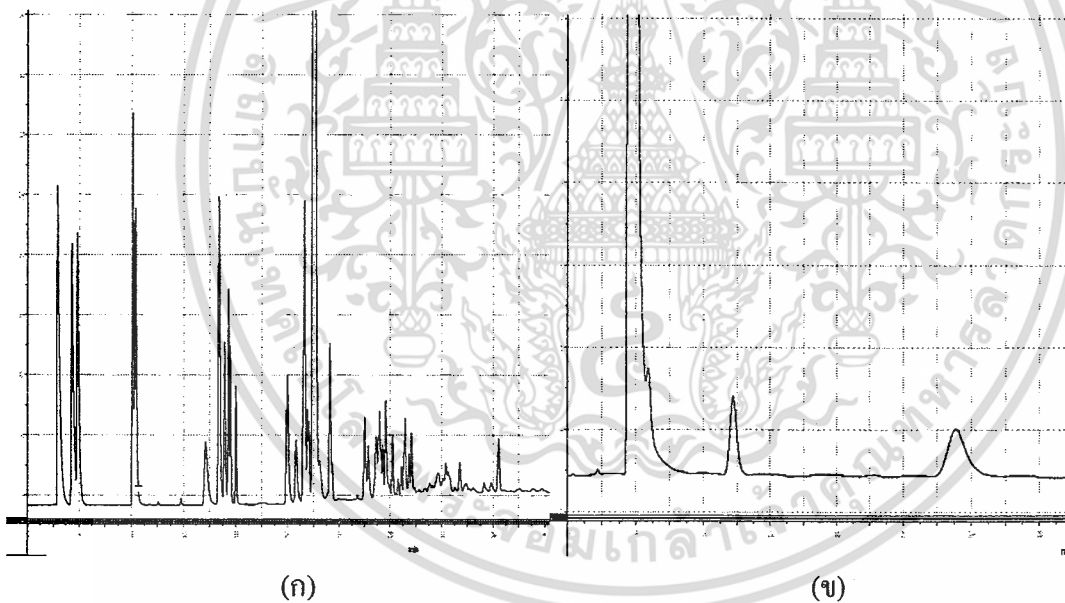
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

Chromatograms of pyrolysis Gas

Condition ;

	GC-FID	GC-TCD
column	plot fused silica	activated carbon
Initial temp.(°C)	50	60
Final temp.(°C)	300	60
Ramp rate.(°C/min)	5	-
Carrier gas	He	He
Flow rate of carrier gas	80 (kPa)	25 (cm ³ /min)

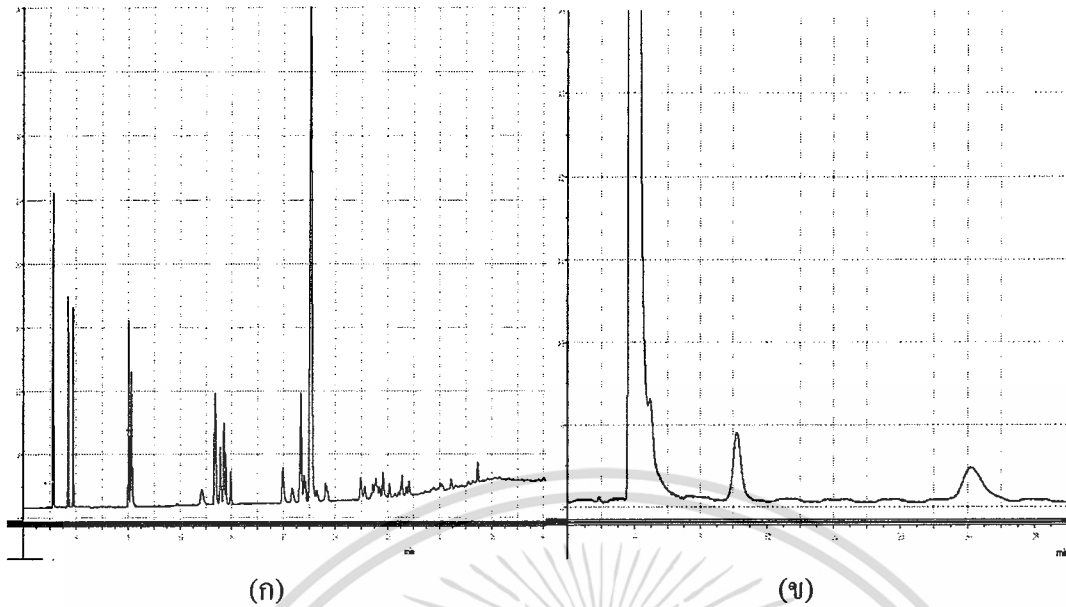


รูปข.1 โครมาโทแกรมของแก๊สที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 25 cm³/min (สถานะที่ 1)

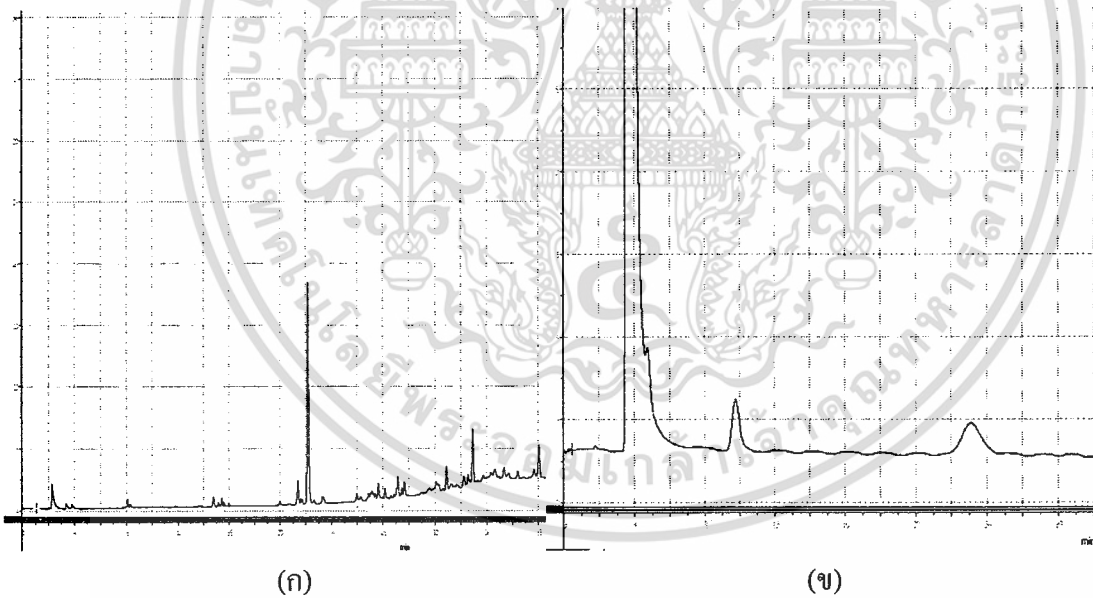
(ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิในการไพโรไลซิส 500°C, ระยะเวลา 120 min)

(ก) วิเคราะห์จาก GC-FID

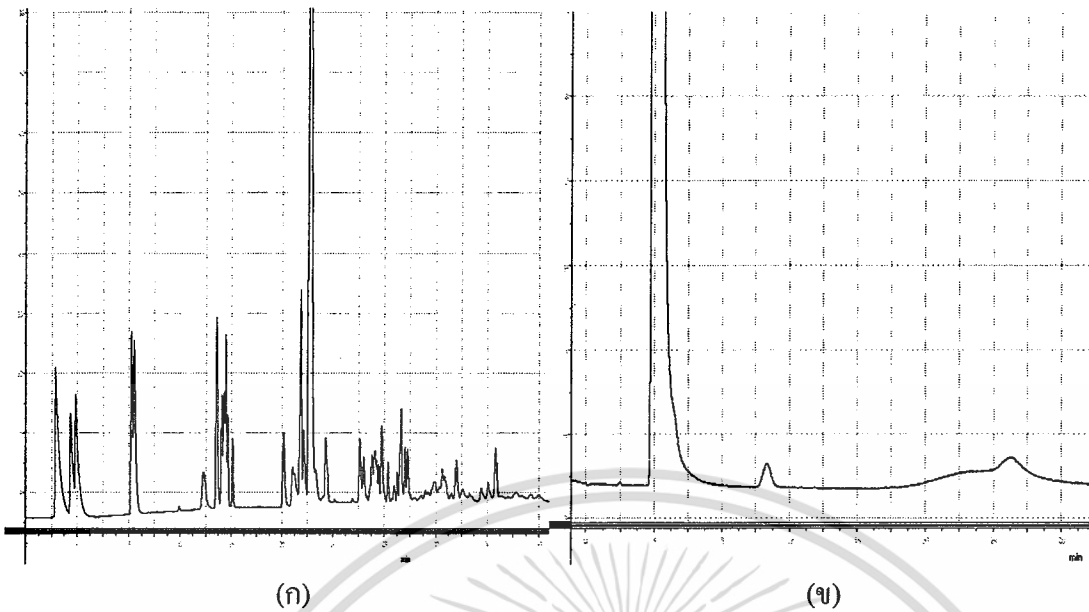
(ข) วิเคราะห์จาก GC-TCD



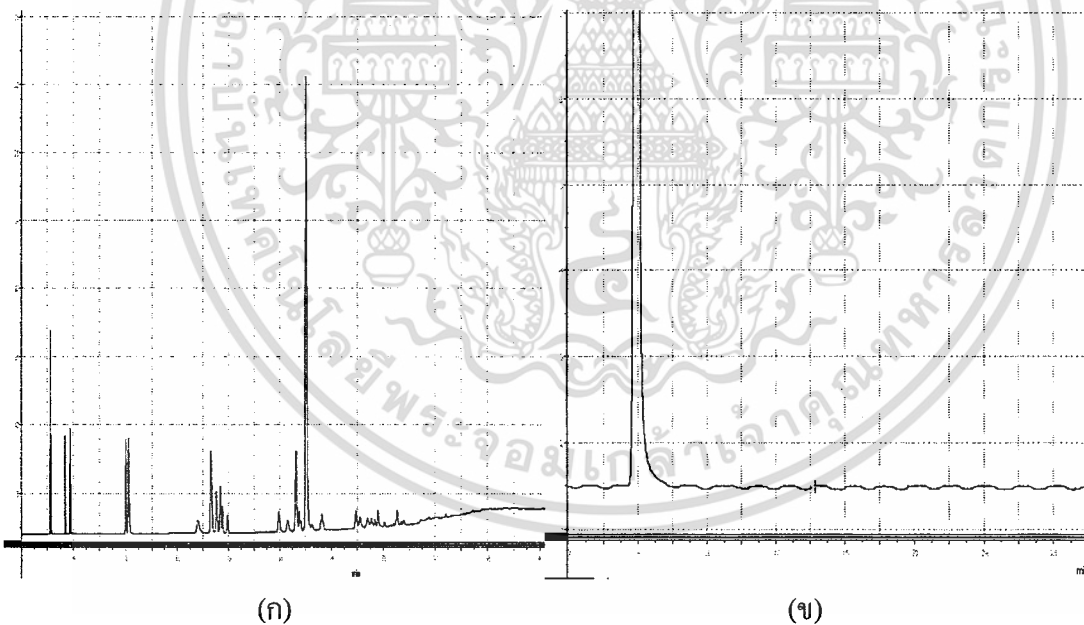
รูป ข.2 โครมาโทแกรมของแก๊สที่อัตราการไหลของไนโตรเจน $50 \text{ cm}^3/\text{min}$ (สภาวะที่ 2)
 (ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิในการไพโรไลซิส 500°C , ระยะเวลา 120 min)
 (ก) วิเคราะห์จาก GC-FID (ข) วิเคราะห์จาก GC-TCD



รูป ข.3 โครมาโทแกรมของแก๊สที่อัตราการไหลของไนโตรเจน $100 \text{ cm}^3/\text{min}$ (สภาวะที่ 3)
 (ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิในการไพโรไลซิส 500°C , ระยะเวลา 120 min)
 (ก) วิเคราะห์จาก GC-FID (ข) วิเคราะห์จาก GC-TCD

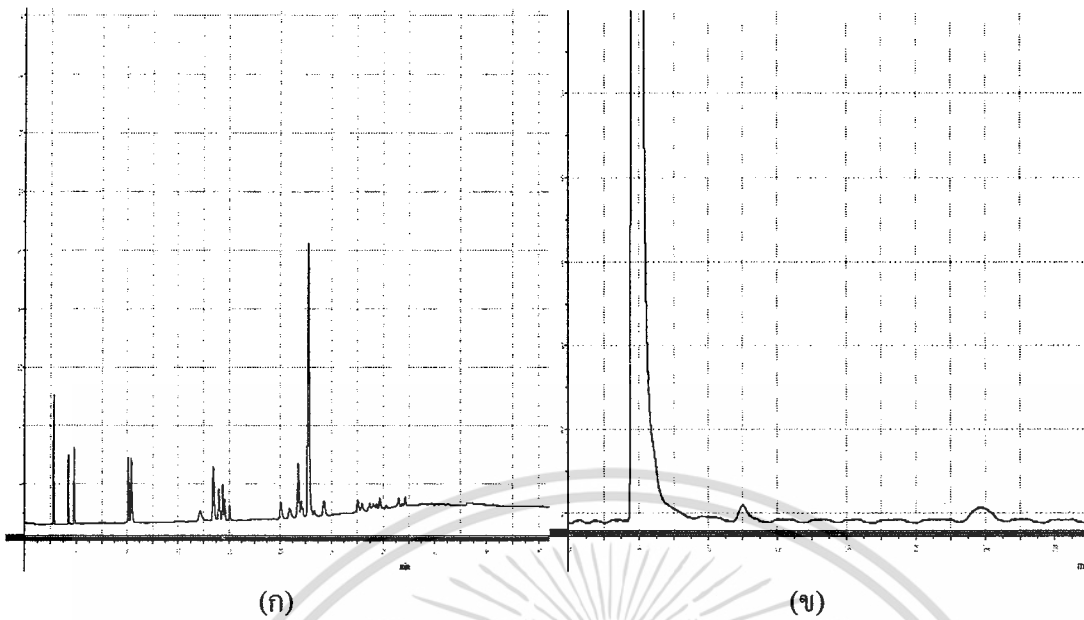


รูป ข.4 โครมาโทแกรมของแก๊สที่อัตราการไหลของไนโตรเจน $200 \text{ cm}^3/\text{min}$ (สภาวะที่ 4)
 (ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิในการไพโรไลซิส 500°C , ระยะเวลา 120 min)
 (ก) วิเคราะห์จาก GC-FID (ข) วิเคราะห์จาก GC-TCD



รูปที่ ข.5 โครมาโทแกรมของแก๊สที่เวลา 60 นาที (สภาวะที่ 5)
 (ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิ 400°C , อัตราการไหลของไนโตรเจน $50 \text{ cm}^3/\text{min}$)
 (ก) วิเคราะห์จาก GC-FID (ข) วิเคราะห์จาก GC-TCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

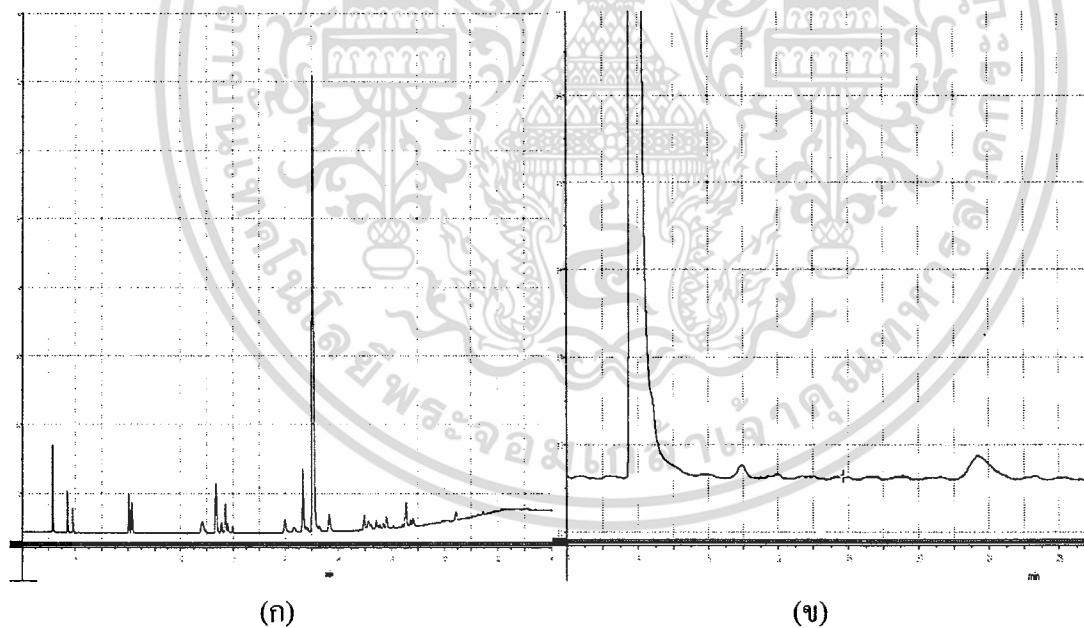


รูปที่ ข.6 โครมาโทแกรมของแก๊สที่เวลา 180 นาที (สถานะที่ 6)

(ยารถยนต์ 5 g, อุณหภูมิ 400°C, อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min)

(ก) วิเคราะห์จาก GC-FID

(ข) วิเคราะห์จาก GC-TCD

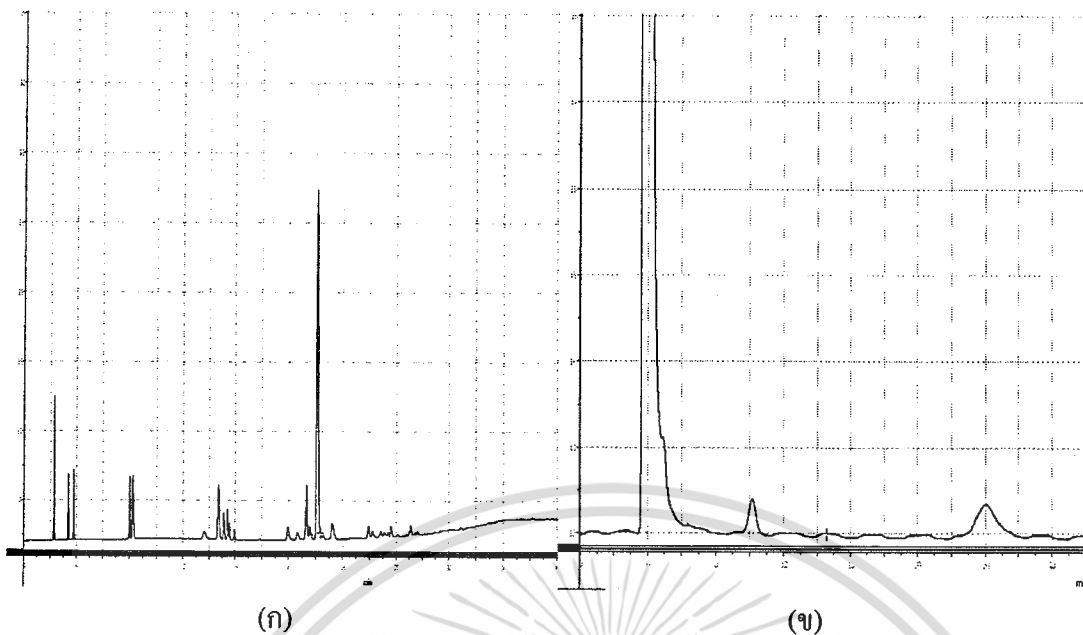


รูป ข.7 โครมาโทแกรมของแก๊สที่ 350°C (สถานะที่ 7)

(ใช้ยารถยนต์ 5 g, อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min, ระยะเวลา 120 min)

(ก) วิเคราะห์จาก GC-FID

(ข) วิเคราะห์จาก GC-TCD

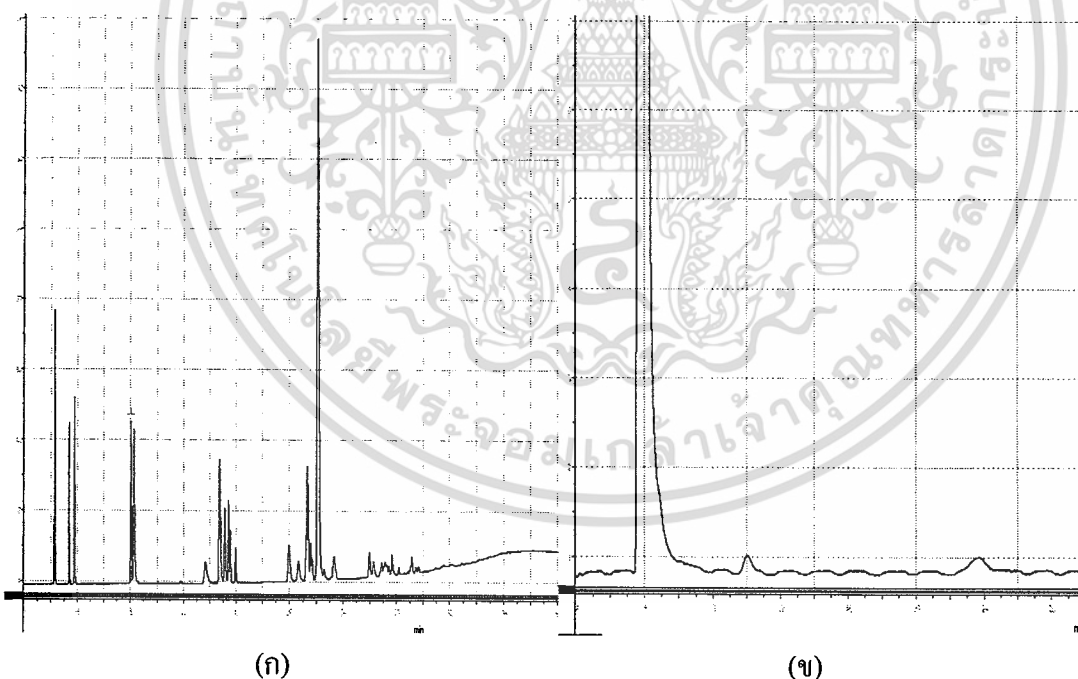


รูป ข.8 โครมาโทแกรมของแก๊สที่ 400°C (สภาวะที่ 8)

(ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min, ระยะเวลา 120 min)

(ก) วิเคราะห์จาก GC-FID

(ข) วิเคราะห์จาก GC-TCD



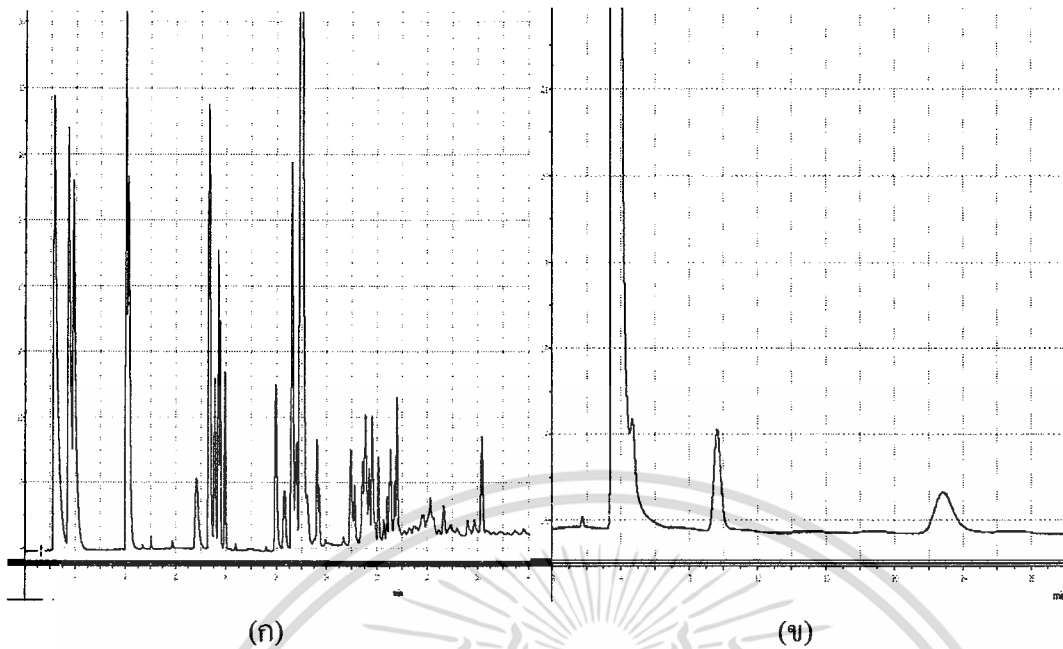
รูป ข.9 โครมาโทแกรมของแก๊สที่ 450°C (สภาวะที่ 9)

(ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min, ระยะเวลา 120 min)

(ก) วิเคราะห์จาก GC-FID

(ข) วิเคราะห์จาก GC-TCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

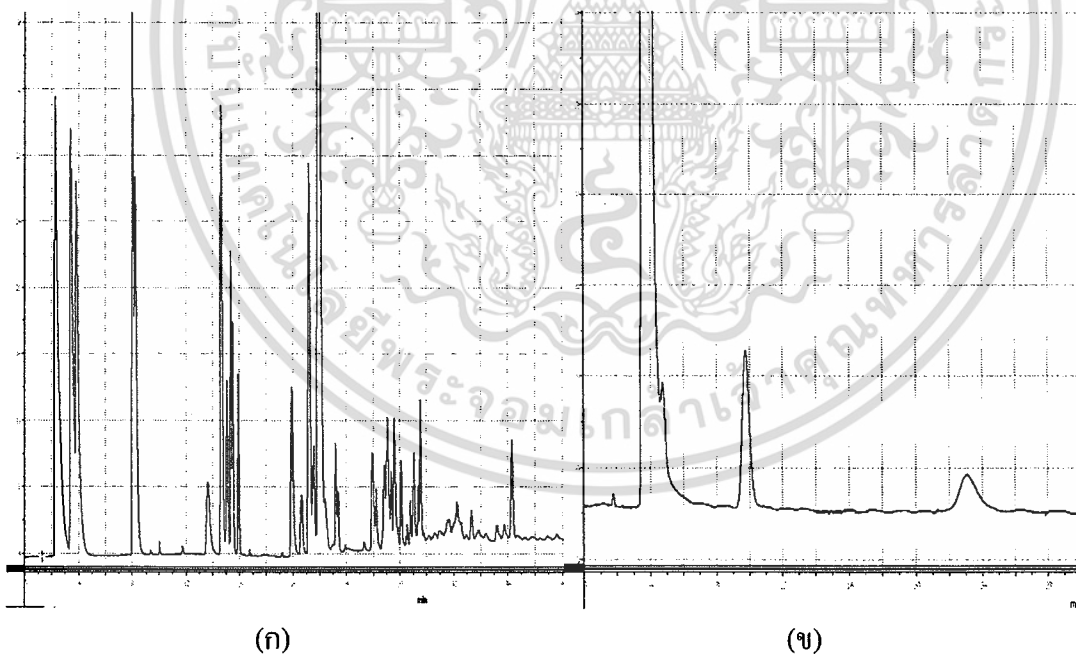


รูป ข.10 โครมาโทแกรมของแก๊สที่ 550°C (สภาวะที่ 10)

(ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min, ระยะเวลา 120 min)

(ก) วิเคราะห์จาก GC-FID

(ข) วิเคราะห์จาก GC-TCD

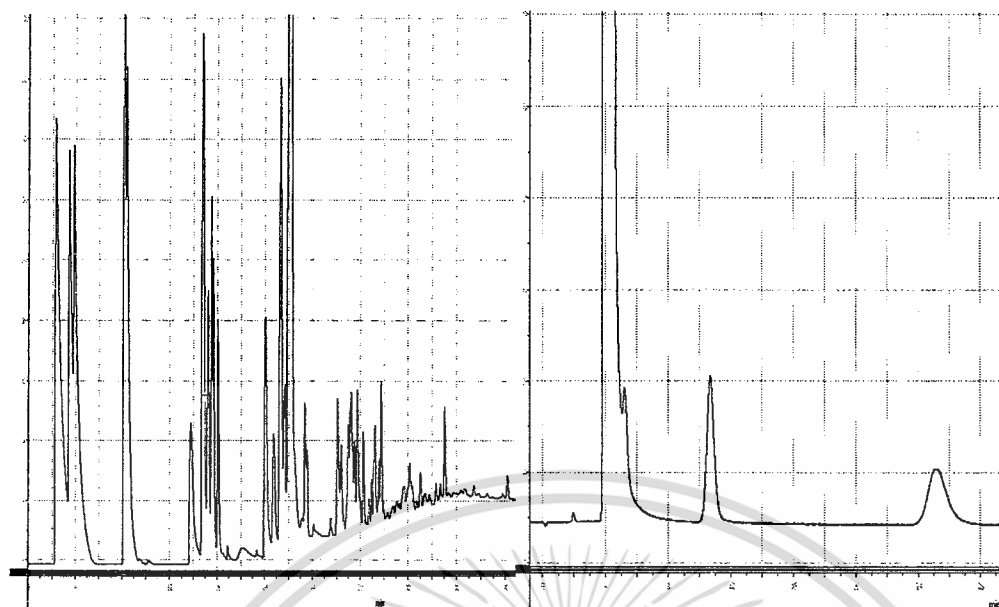


รูป ข.11 โครมาโทแกรมของแก๊สที่ 600°C (สภาวะที่ 11)

(ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min, ระยะเวลา 120 min)

(ก) วิเคราะห์จาก GC-FID

(ข) วิเคราะห์จาก GC-TCD



(ก)

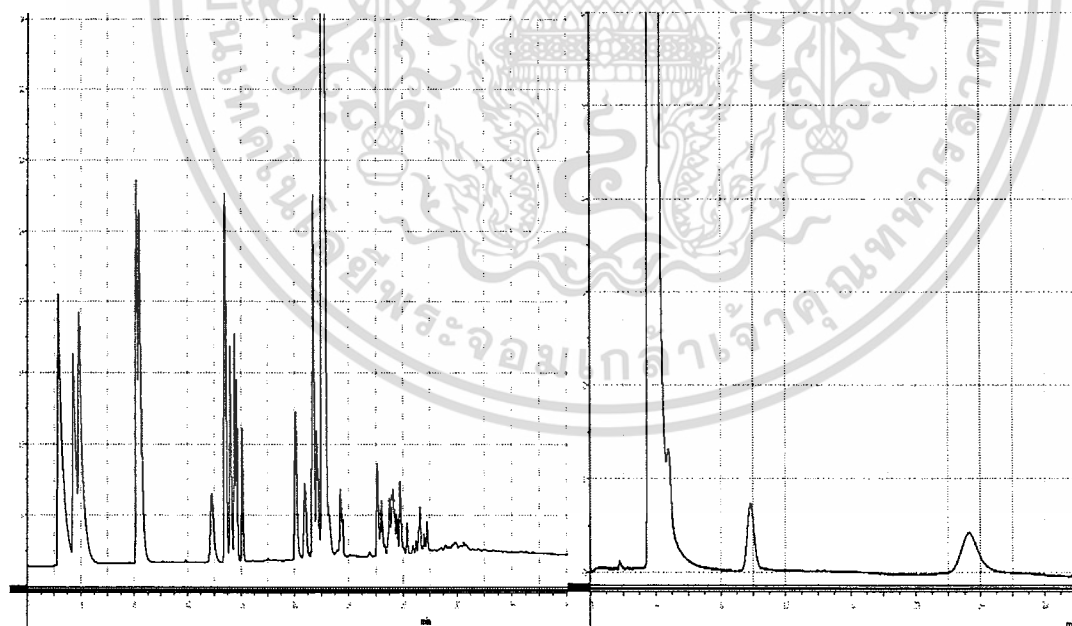
(ข)

รูปที่ 12 โครมาโทแกรมของแก๊สเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 กรัม (สภาวะที่ 13)

(ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิ 500°C, ระยะเวลา 120 min, อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 cm³/min)

(ก) วิเคราะห์จาก GC-FID

(ข) วิเคราะห์จาก GC-TCD



(ก)

(ข)

รูปที่ 13 โครมาโทแกรมของแก๊สเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัม (สภาวะที่ 14)

(ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิ 500°C, ระยะเวลา 120 min, อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 cm³/min)

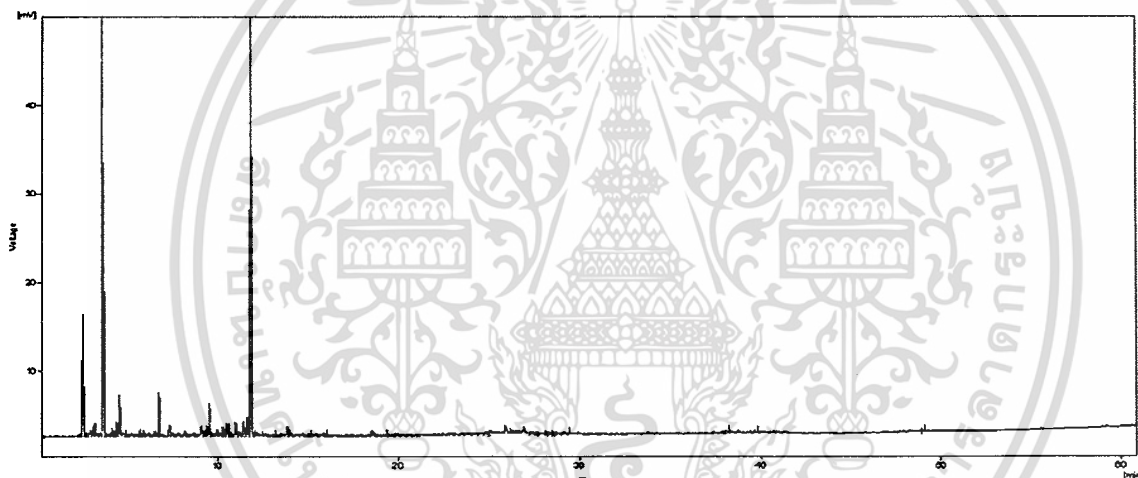
เอกสารนี้ (ก) วิเคราะห์จาก GC-FID การใช้งานเพื่อ (ข) วิเคราะห์จาก GC-TCD ตีให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

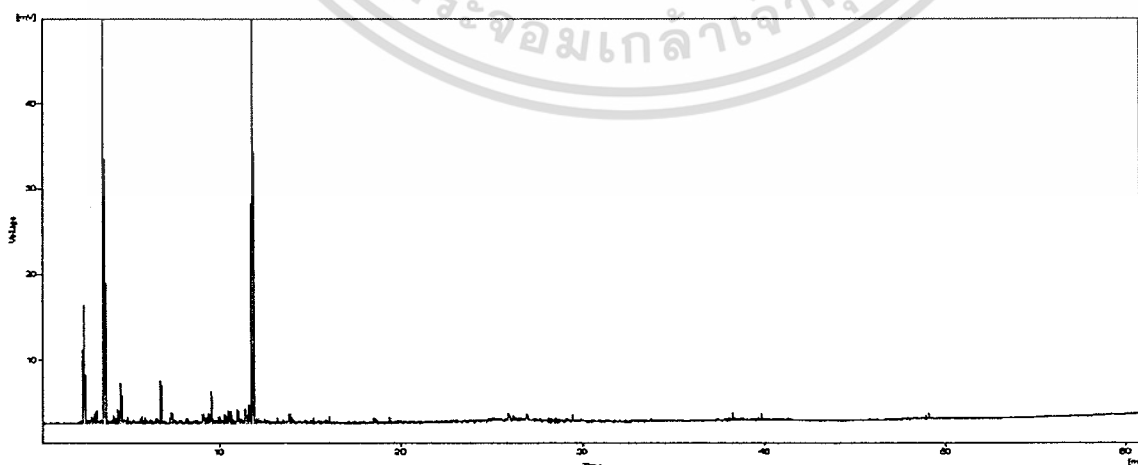
Chromatograms of pyrolysis oil

Condition ; GC-FID

column	fused silica
Initial temp	40 °C
Final temp	300 °C
Ramp rate	4 °C / min
Carrier gas	He
Flow rate of carrier gas	80 kPa

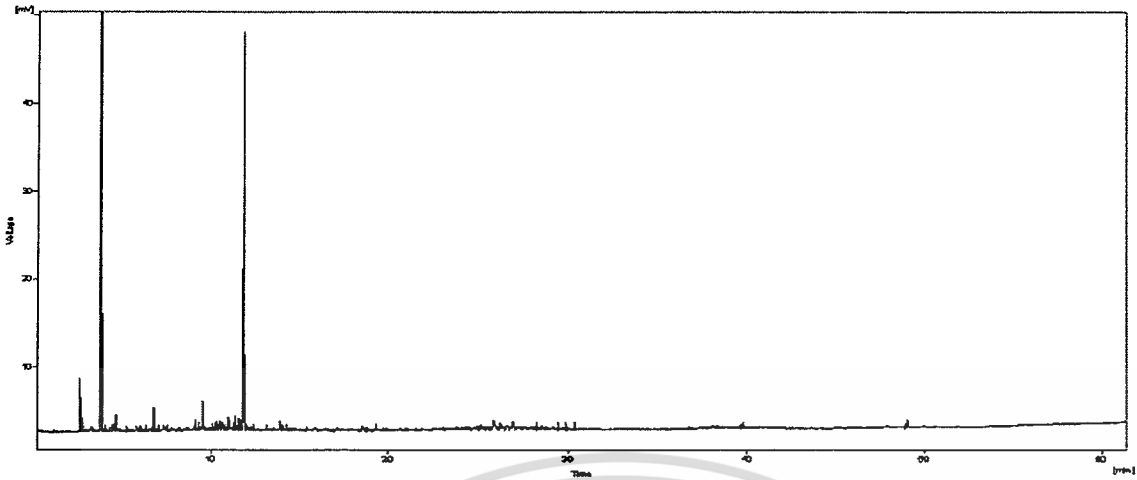


รูป ข.1 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 25 cm³/min (สภาวะที่ 1)
(ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิในการไพโรไลซิส 500°C, ระยะเวลา 120 min)

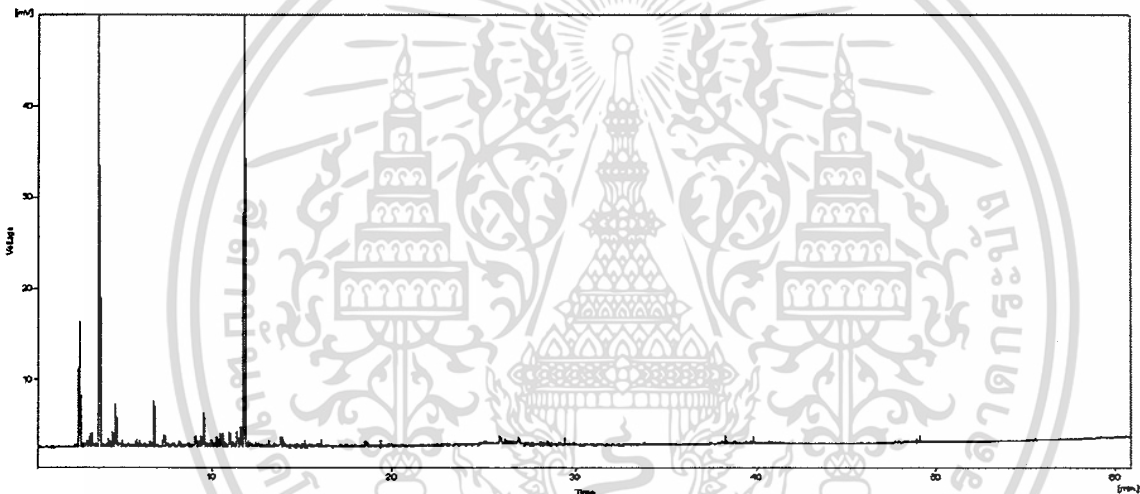


รูป ข.2 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min (สภาวะที่ 2)
(ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิในการไพโรไลซิส 500°C, ระยะเวลา 120 min)

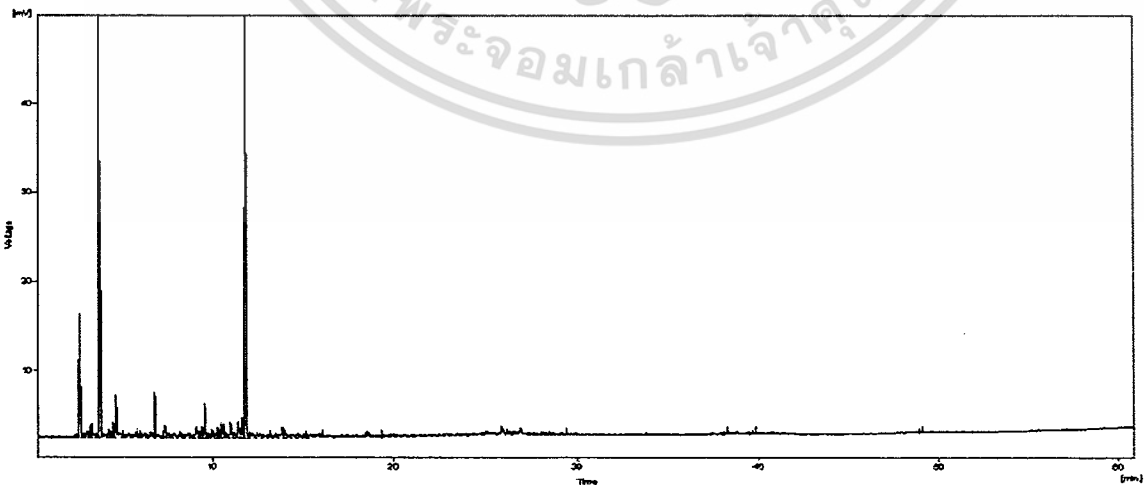
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข.3 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อัตราการไหลของไนโตรเจน $100 \text{ cm}^3/\text{min}$ (สถานะที่ 3)
(ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิในการไพโรไลซิส 500°C , ระยะเวลา 120 min)



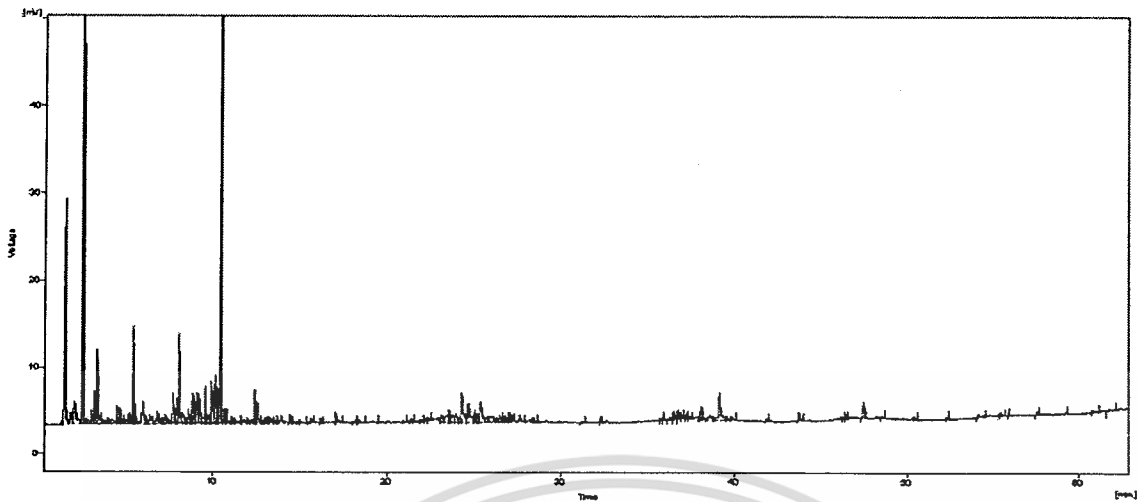
รูป ข.4 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อัตราการไหลของไนโตรเจน $200 \text{ cm}^3/\text{min}$ (สถานะที่ 4)
(ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิในการไพโรไลซิส 500°C , ระยะเวลา 120 min)



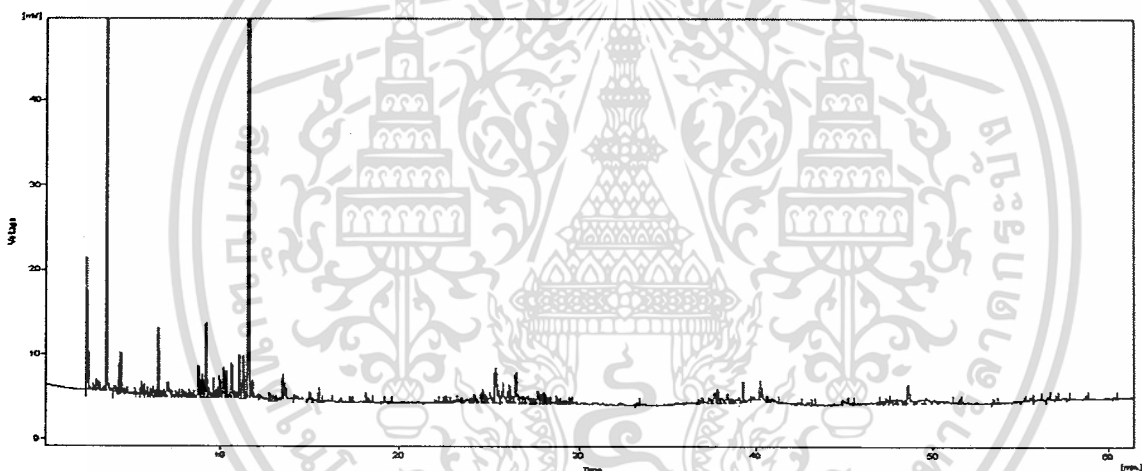
รูปที่ ข.5 โครมาโทแกรมของของเหลว ที่เวลา 60 นาที (สถานะที่ 5)

(ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิ 400°C , อัตราการไหลของไนโตรเจน $50 \text{ cm}^3/\text{min}$)

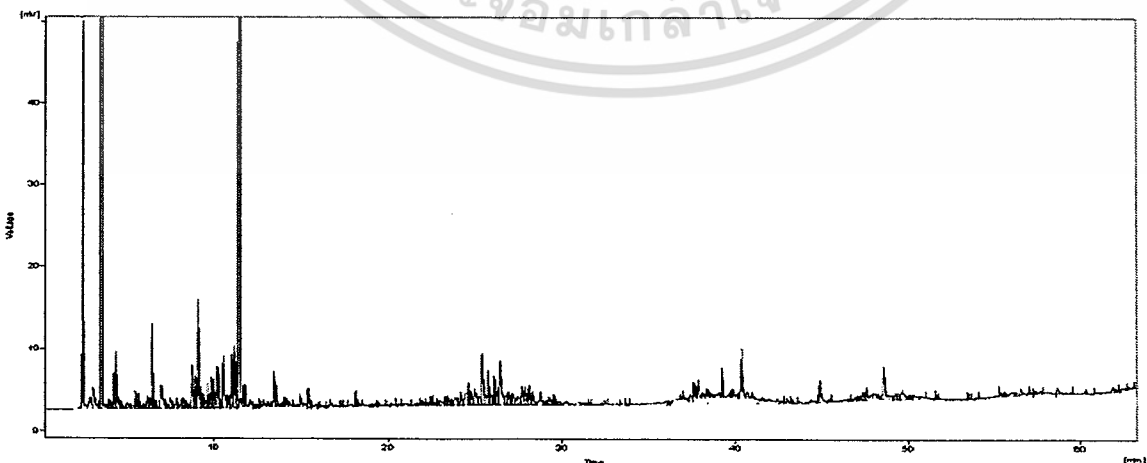
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.6 โครมาโทแกรมของของเหลว ที่เวลา 180 นาที (สภาวะที่ 6)
(ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิ 400°C, อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min)

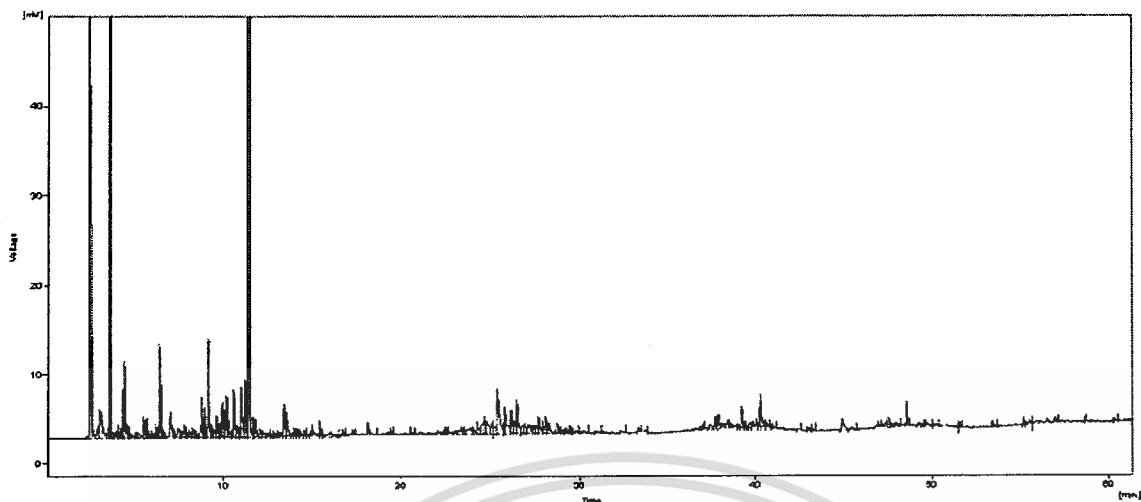


รูป ข.7 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อุณหภูมิ 350°C (สภาวะที่ 7)
(ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min, ระยะเวลา 120 min)

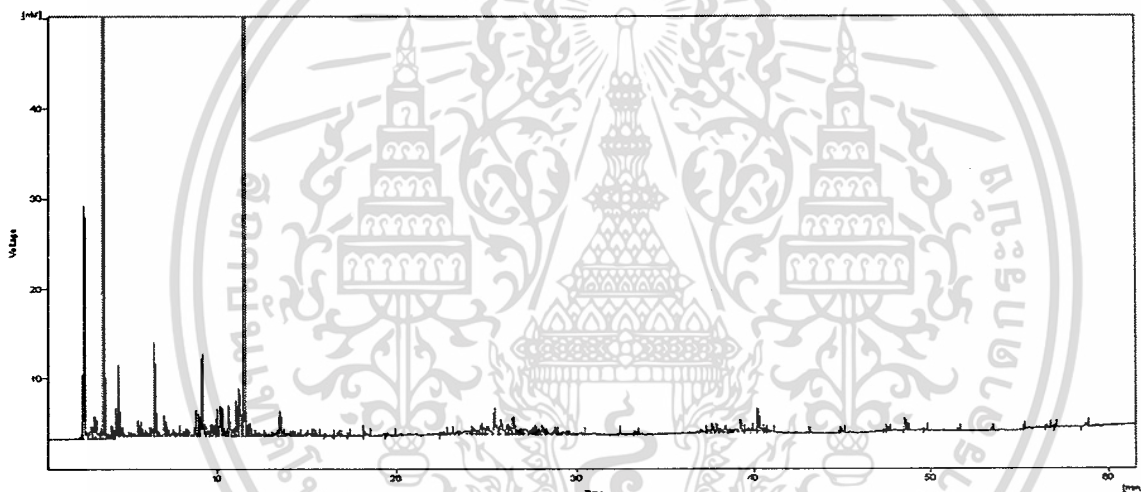


รูป ข.8 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อุณหภูมิ 400°C (สภาวะที่ 8)

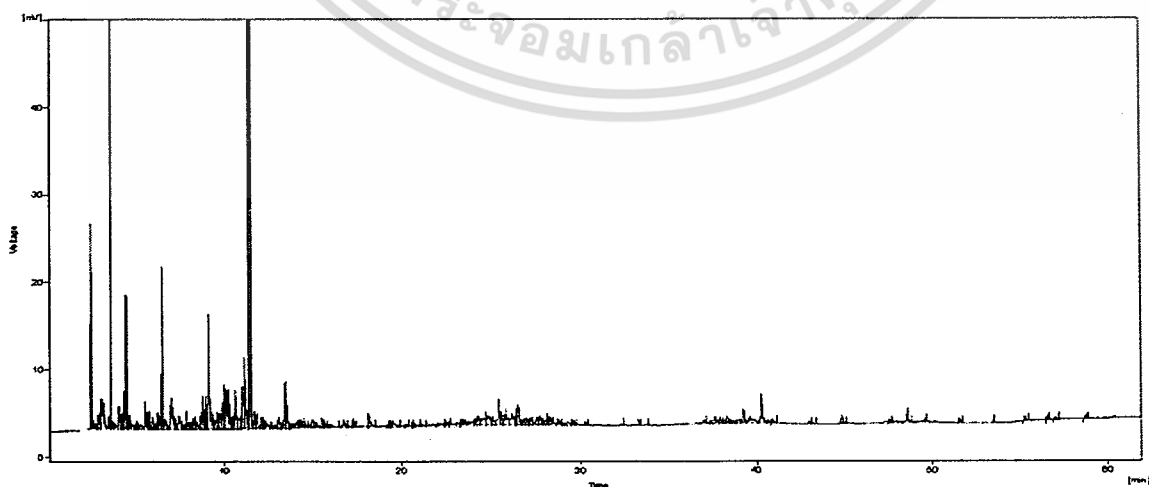
เอกสารนี้ (ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min, ระยะเวลา 120 min) | ระโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



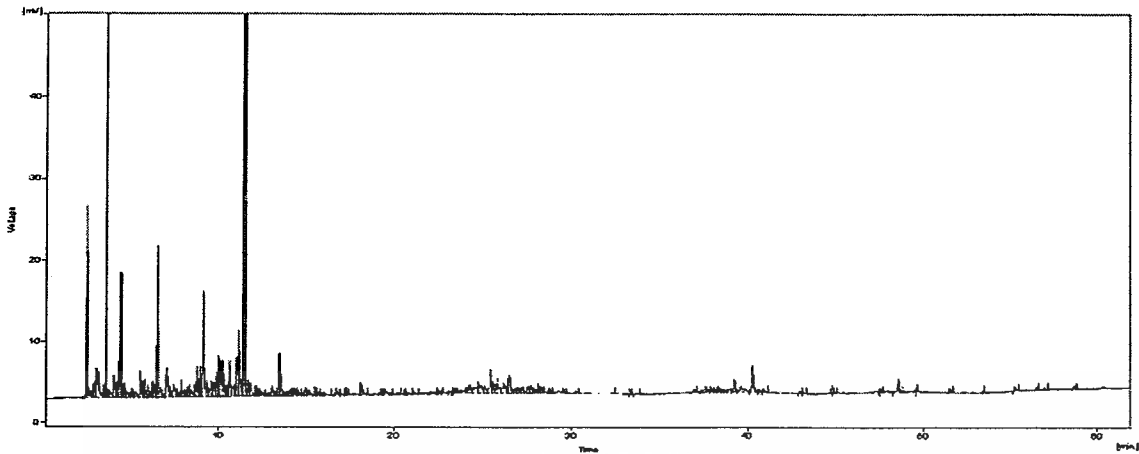
รูป ข.9 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อุณหภูมิ 450°C (สภาวะที่ 9)
(ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min, ระยะเวลา 120 min)



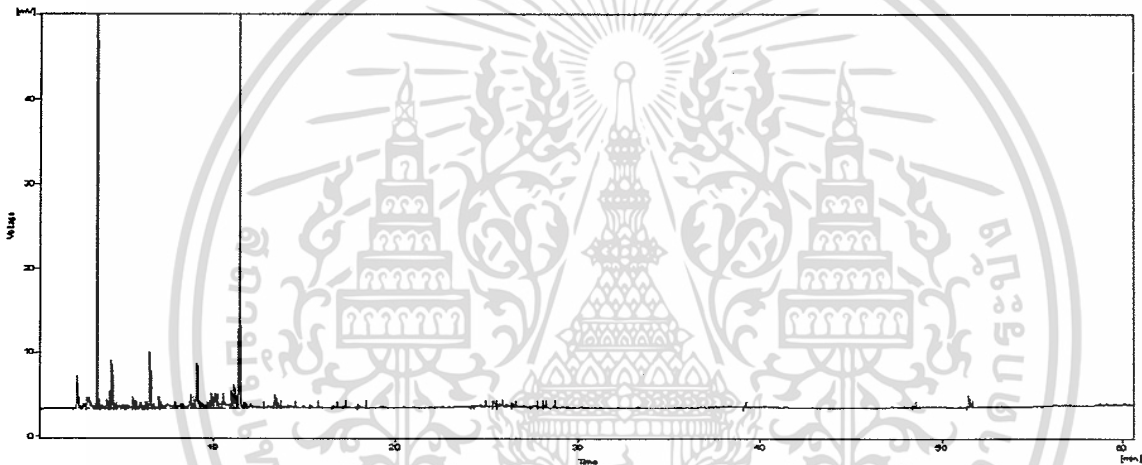
รูป ข.10 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อุณหภูมิ 550°C (สภาวะที่ 10)
(ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min, ระยะเวลา 120 min)



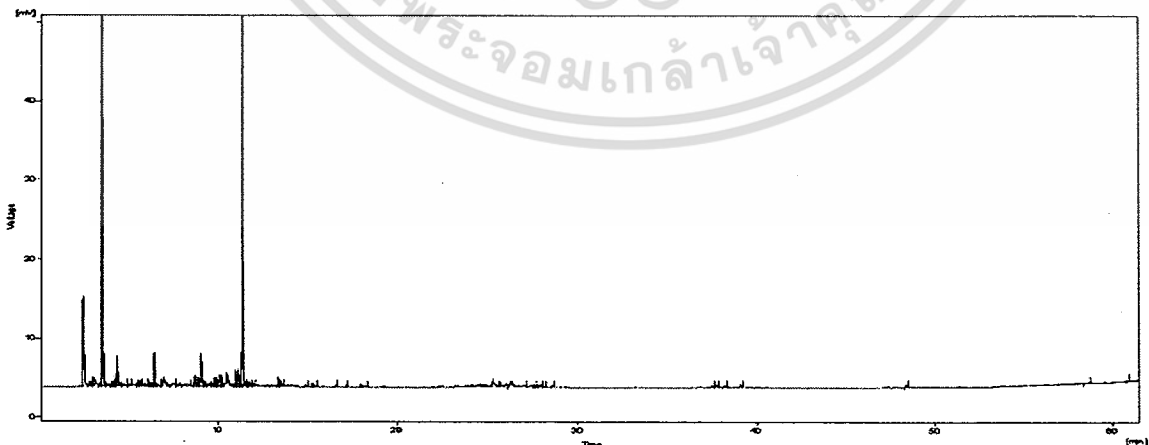
รูป ข.11 โครมาโทแกรมของของเหลวที่อุณหภูมิ 600°C (สภาวะที่ 11)
เอกสารนี้ (ใช้ยางรถยนต์ 5 g, อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min, ระยะเวลา 120 min) ระบายนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.12 โครมาโทแกรมของของเหลวที่ความดัน 0.21 atm (สถานะที่ 12)
(ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิ 500°C, ระยะเวลา 120 min)



รูปที่ ข.13 โครมาโทแกรมของของเหลวเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 กรัม (สถานะที่ 13)
(ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิ 500°C, ระยะเวลา 120 min, อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
50 cm³/min)



รูปที่ ข.14 โครมาโทแกรมของของเหลวเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัม
(ยางรถยนต์ 5 g, อุณหภูมิ 500°C, ระยะเวลา 120 min, อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน

50 cm³/min) เอกสารนี้เผยแพร่ฟรีสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ๑

การคำนวณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊ส

ตัวอย่างการคำนวณ

ไพโรไลซิสยางรถยนต์จำนวน 5 g อุณหภูมิ 500°C ความดัน 1 atm อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min ระยะเวลาในการไพโรไลซิส 120 min เมื่อสิ้นสุดกระบวนการนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว ไปซึ่งได้ผลการทดลองนี้

น้ำหนักยางรถยนต์หลังไพโรไลซิส	1.722	g
น้ำหนักของเหลว	3.116	g
น้ำหนักแก๊ส	0.162	g

การคำนวณสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้

ของแข็ง	=	$(1.722 \times 100) / 5$	=	34.43	%wt
ของเหลว	=	$(3.116 \times 100) / 5$	=	62.25	%wt
แก๊ส	=	$(0.248 \times 100) / 5$	=	3.32	%wt

การคำนวณร้อยละของคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลว

ในยางรถยนต์มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ 74.5 % wt [6] ในการทดลองใช้ยางรถยนต์จำนวน 5 g เมื่อคำนวณหาคาร์บอนจะได้เท่ากับ

$$74.5 \times 5 / 100 = 3.72 \text{ g}$$

การทดลองนี้ใช้ Heptane เป็น internal standard

ใน Heptane มีคาร์บอน	84	%wt
นน. Heptane	0.0442 g	(9.73%wt)
นน. sample	0.4101 g	(90.27%wt)

ดังนั้นใน Heptane จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่

$$(0.0442 \times 84) / 100 = 0.037 \text{ g (8.17%wt)}$$

วิเคราะห์ FID

Area รวม	1658.61	
Area ของ Heptane	384.69	(%area = 23.194)
Area ของ Sample	1273.2	(%area = 76.806)
คาร์บอนใน Sample	$(76,806 \times 0.037) / 23.194$	= 0.123 g (29.98%wt)
คาร์บอนใน Product	$(29.98 \times 3.116) / 100$	= 0.934 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณในสารประกอบไลโมนีน

Area	337.89		
%Area	$337.89 \times 100 / (1658.61-384.68) =$	26.52	
นน. คาร์บอนใน Product	$(26.52 \times 0.934)/100 =$	0.248	g
%C Recovered	$(0.248/3.72) \times 100 =$	6.64	
สัดส่วนของไลโมนีน	$(0.248/0.934) \times 100 =$	26.52	

ตาราง ญ.1 แสดงผลการคำนวณหาร้อยละของคาร์บอนนํากลับในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว

สาร	Area	% Area	นน. C ในผลิตภัณฑ์	%C Recovered	สัดส่วนองค์ประกอบ(%C)
Benzene	12.29	0.96	0.009	0.24	0.96
Toluene	26.33	2.07	0.019	0.52	2.07
Xylene	30.29	2.39	0.022	0.60	2.39
Limonene	337.89	26.52	0.248	6.64	26.52
Unknown	867.11	68.07	0.636	17.05	68.07
			0.934	25.05	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละของคาร์บอนนํากลับในผลิตภัณฑ์แก๊ส

ไพโรไลซิสยางรถยนต์จำนวน 5 g อุณหภูมิ 500°C ความดัน 1 atm อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 cm³/min ระยะเวลาในการไพโรไลซิส 120 min

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของแก๊สพา} &= (\text{อัตราการไหลของแก๊สพา} \times \text{เวลา}) \\ &= (50 \text{ cm}^3/\text{min} \times 120 \text{ min}) \\ &= 6000 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

วิเคราะห์ GC-TCD (sample 0.5 cm³)

เมื่อวิเคราะห์ห้องคํประกอบด้วย GC-TCD เพื่อหาร้อยละนํากลับขององค์ประกอบ โดยพื้นที่ใต้กราฟของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สตัวอย่างเท่ากับ 7825.71 mV/s แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 39.07 mV/s โดยมีค่า Area CO / mol CO = 4 × 10⁸, α_{CO} = 42, α_{CO₂} = 36 แสดงการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{Area pure N}_2 &= 8550.3 \text{ mV/s} \\ \text{Area gas product (N}_2 + \text{product)} &= 7825.71 \text{ mV/s} \\ \text{Volume gas product in sample} &= 0.5 \times 7825.71 / 8550.3 \\ &= 0.4576 \text{ cm}^3 \\ \text{Total product gas} &= (0.5 - 0.4576) \times 6000 / 0.5 \text{ cm}^3 \\ \text{Volume gas} &= 508.4664 \text{ cm}^3 \\ \text{mol CO}_2 \text{ in sample 0.5 cm}^3 &= \left(\frac{\alpha_{\text{CO}}}{(\text{area CO} / \text{mol CO})} \right) \times \left(\frac{\text{area}}{\alpha_{\text{CO}_2}} \right) \\ &= \left(\frac{42}{4 \times 10^8} \right) \times \left(\frac{39.07}{36} \right) \text{ mol} \\ &= 8.55 \times 10^{-8} \text{ mol} \\ \text{Total mole CO}_2 &= \text{mol CO}_2 \text{ in sample 0.5 cm}^3 \times \text{volume gas} / 0.5 \text{ cm}^3 \\ &= (8.55 \times 10^{-8} \text{ mol} \times 508.4664 \text{ cm}^3) / 0.5 \text{ cm}^3 \\ &= 8.69 \times 10^{-5} \text{ mol CO}_2 \\ \text{g. C in CO}_2 &= \text{Total mole CO}_2 \times 12 \\ &= 8.69 \times 10^{-5} \text{ mol CO}_2 \times 12 \text{ g. C} / \text{mol CO}_2 \\ &= 1.04 \times 10^{-3} \text{ g. C} \end{aligned}$$

ในยางรถยนต์มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ 74.5 % wt [6] ในการทดลองใช้ยางรถยนต์จำนวน 5 g เมื่อคำนวณหาคาร์บอนจะได้เท่ากับ 3.72 g. C

$$\begin{aligned} \% \text{ C recover} &= (\text{g. C in CO}_2 \times 100) / \text{g. C in tyre 5 g} \\ &= (1.04 \times 10^{-3} \text{ g. C} \times 100) / (3.72 \text{ g. C}) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ 0.028 การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ญ.2 ตัวอย่างการคำนวณผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สจาก GC-TCD

Name	(α)	Area	mol 0.5 cm ³	total mol	g. C	%C recover
N ₂	42	7825.11	1.96E-05	1.99E-02	0	0
CO	42	3.93	9.83E-09	9.99E-06	1.20E-04	0.003216
CH ₄	36	28.84	8.41E-08	8.55E-05	1.03E-03	0.027535
CO ₂	48	39.07	8.55E-08	8.69E-05	1.04E-03	0.027976
H ₂		0.56	3.98E-08	4.05E-05	0	0

วิเคราะห์ GC-FID (sample 0.1 cm³)

เมื่อวิเคราะห์ห้องที่ประกอบด้วย GC-FID เพื่อหาร้อยละน้ำหนักกลับขององค์ประกอบ เมื่อพื้นที่ที่ได้กราฟของแก๊สเอทิลีนในแก๊สตัวอย่างเท่ากับ 38.22 mV/s โดย Area / C 1 atom = 2.6×10^9 mV/s, factor C₂H₄ = 1.9

$$\begin{aligned}
 \text{Area / mol C}_2\text{H}_4 &= (\text{Area / C 1 atom} \times \text{Factor}) \\
 &= (2.6 \times 10^9 \text{ mV/s} \times 1.9) \\
 &= (4.94 \times 10^9 \text{ mV/s}) / \text{mol C}_2\text{H}_4 \\
 \text{mol C}_2\text{H}_4 \text{ in sample } 0.1 \text{ cm}^3 &= \text{Area} / (\text{Area / mol C}_2\text{H}_4) \\
 &= 39.22 / 4.94 \times 10^9 \\
 &= 7.94 \times 10^{-9} \text{ mol C}_2\text{H}_4 \\
 \text{Total mole C}_2\text{H}_4 &= (\text{mol C}_2\text{H}_4 \text{ in sample } 0.1 \text{ cm}^3) \times \text{volume gas} / 0.1 \text{ cm}^3 \\
 &= (7.94 \times 10^{-9} \text{ mol C}_2\text{H}_4 \times 508.4664 \text{ cm}^3) / 0.1 \text{ cm}^3 \\
 &= 4.04 \times 10^{-5} \text{ mol C}_2\text{H}_4 \\
 \text{g. C in C}_2\text{H}_4 &= (\text{Total mole C}_2\text{H}_4 \times \text{atom C}) \times 12 \\
 &= (4.04 \times 10^{-5} \text{ mol C}_2\text{H}_4 \times 2 \times 12) \\
 &= 9.69 \times 10^{-4} \text{ g. C} \\
 \% \text{ C recover} &= (\text{g C in C}_2\text{H}_4 \times 100) / (\text{g. C in tyre } 5 \text{ g}) \\
 &= (0.000969 \text{ g. C} \times 100) / (3.728 \text{ g. C}) \\
 &= 0.026
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ญ.3 ตัวอย่างผลการคำนวณที่เป็นแก๊สจาก GC-FID

Name	Factor	Area/mol	Area from GC	mol in sample 0.1 cm ³	total mol in product	Atom C	g. C	%C recovery
CO	0.2	5.2E+08	0.11	2.12E-10	1.0756E-06	1	1.29E-05	0.000346
CH ₄	1	2.6E+09	58.515	2.25E-08	0.00011443	1	0.001373	0.036835
C ₂ H ₄	1.9	4.94E+09	39.22	7.94E-09	4.0369E-05	2	0.000969	0.025988
C ₂ H ₆	2	5.2E+09	40.34	7.76E-09	3.9445E-05	2	0.000947	0.025394
C ₃ H ₆	2.85	7.41E+09	54.3	7.33E-09	3.726E-05	3	0.001341	0.035981
N-C ₄ H ₁₀	4	1.04E+10	25.4	2.44E-09	1.2418E-05	4	0.000596	0.015989
Other gas	1	2.6E+09	136.46	5.25E-08	0.00026687	1	0.003202	0.085901
Other liq.	1	2.6E+09	662.285	2.55E-07	0.00129519	1	0.015542	0.416907
Total			354.345				0.023984	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้