

เอกสารรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์  
โครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ประจำปี 2549

เรื่อง

การเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร  
ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

โดย

1. ผศ.ดร. ดวงกมล ณะระนอง
2. ดร.พรสวรรค์ กาญจนวณิชย์กุล
3. นายเกียรติคุณ ไชยชนะ
4. นายสหพล ชัยอนุรักษ์

(ภาควิชาวิศวกรรมเคมี)

เสนอ

RCH  
TP  
156  
.pa  
ก494

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....84547  
วัน,เดือน,ปี.....13.๓.๒๕๕1

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

b. 11994885

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

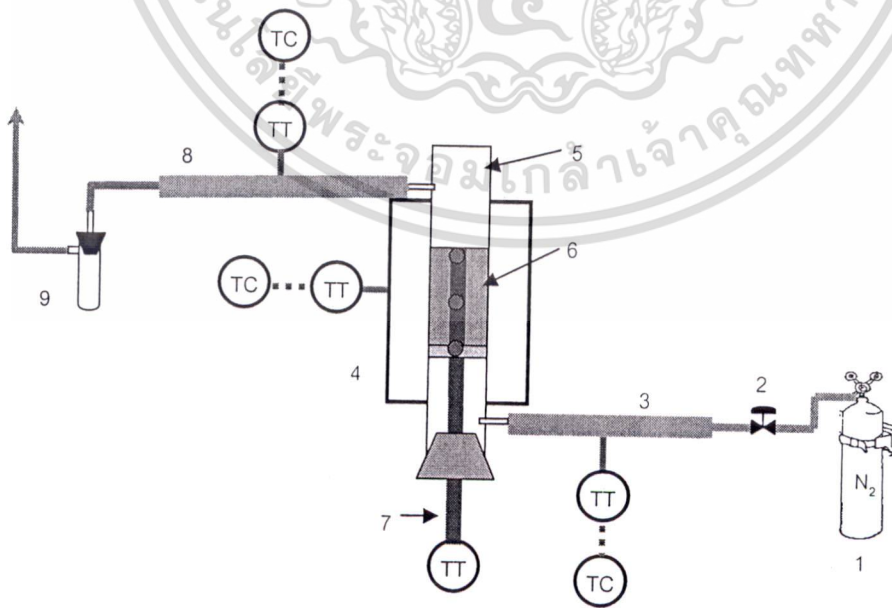
คุณสมบัติและรายละเอียดการทำงานของชิ้นงานในโครงการวิจัย

1. ชิ้นงานที่ต้องส่งมอบคณะวิศวกรรมศาสตร์ คือ  
เครื่องไพโรไลซิสแบบกึ่งต่อเนื่อง

2. คุณสมบัติและรายละเอียดการทำงานของชิ้นงาน

2.1 ส่วนประกอบของเครื่องไพโรไลซิสแบบกึ่งต่อเนื่อง

- (1) ถังแก๊สไนโตรเจน
- (2) วาล์วควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
- (3) ชุดให้ความร้อนก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์
- (4) เตาเผาให้ความร้อน
- (5) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ
- (6) เบดกะลาปาล์มน้ำมัน
- (7) หัววัดอุณหภูมิแบบ 3 จุด
- (8) แถบให้ความร้อน
- (9) ชุดควบแน่นดักจับไอผลิตภัณฑ์



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเครื่องไพโรไลซิสแบบกึ่งต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายละเอียดทางวิชาการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน
2. เพื่อหาแนวทางการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ประโยชน์ โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมันภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุซึ่งทำงานแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยมีปัจจัยที่เลือกพิจารณา คือ ขนาดของวัตถุดิบ (0.25-0.84 และ 0.84-1.50 mm) อุณหภูมิ (350, 400, 450, 500 และ 550 °C) อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน (50, 100, 200 และ 300 cm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>) เวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส (30, 60 และ 90 min) และความเข้มข้นของน้ำในแก๊สพา (0, 5 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาสัดส่วนของของแข็ง ของเหลว และแก๊ส นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่น ความหนืด ค่าความร้อน และค่าความเป็นกรด-ด่าง) และองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ

## 1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบการทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้
3. ประกอบและติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง
4. ทำการทดลองไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน ณ สภาวะปฏิบัติงานต่างๆ
5. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี
6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
7. จัดทำรายงาน

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน
2. ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว ปริมาณมาก และแนวทางที่เหมาะสมในการนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ไปใช้ประโยชน์
3. เป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดการพัฒนาเศรษฐกิจแบบยั่งยืน
4. นำความรู้ที่ได้ไปใช้ในการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทอื่นๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวล

เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวลให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีค่ามากขึ้น ในปัจจุบันที่นิยมทำกัน แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ

##### 2.1.1 กระบวนการทางชีวเคมี (Biochemical Conversion Process) ได้แก่

- Biochemical liquefaction
- Microbial gasification

##### 2.1.2 กระบวนการทางเคมีด้วยความร้อน (Thermochemical Conversion Process) ได้แก่

- การเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion)
- กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เพื่อทำการเปลี่ยนชีวมวลให้กลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิงหรือแก๊สชีวภาพ (Biogas) โดยแก๊สที่ได้มักมีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ มักนำไปใช้ขับเคลื่อนกังหันแก๊ส (Gas turbine)
- กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนสูง ในสภาวะไร้อากาศ ทำให้เกิดการสลายตัวของชีวมวล เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปของเหลวและแก๊สผสม

ตารางที่ 2.1 ผลิตรภัณฑ์ที่ได้จากการเปลี่ยนองค์ประกอบของชีวมวลโดยวิธีทางชีวเคมีและวิธีทางความร้อน

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบผลิตรภัณฑ์ที่ได้จากการเปลี่ยนองค์ประกอบของชีวมวล [3]

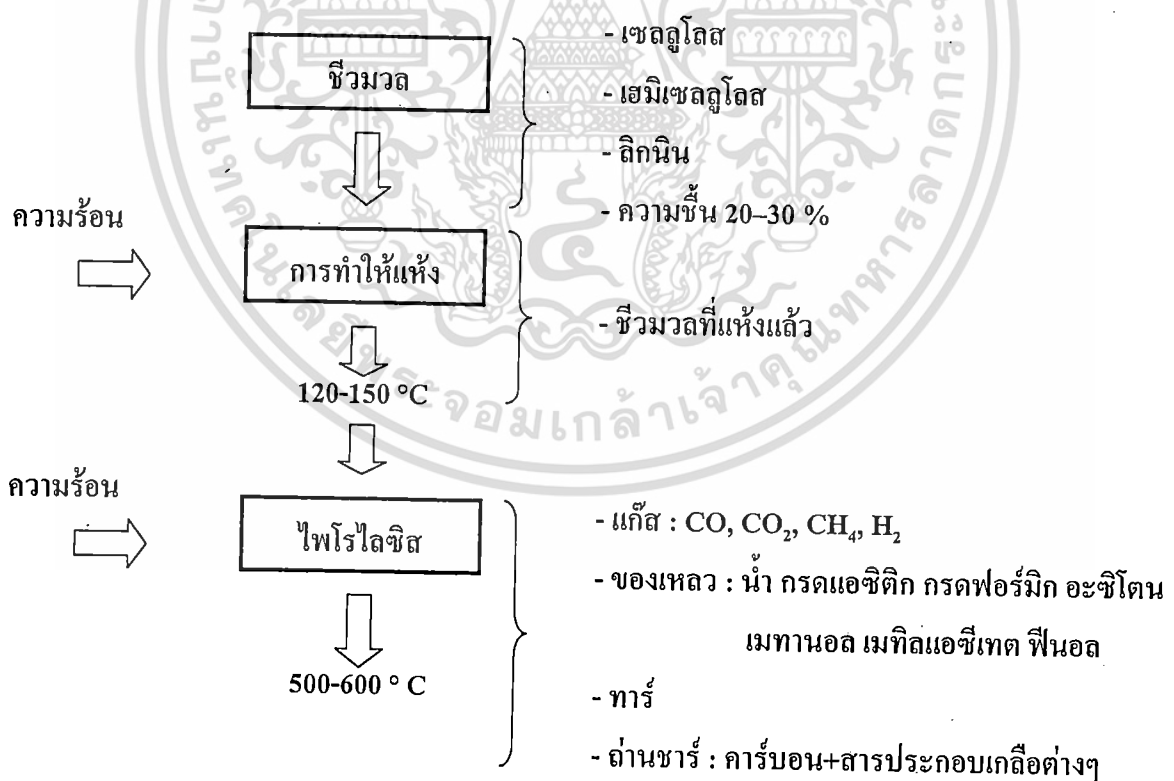
	การใช้ประโยชน์	วิธีชีวเคมี	วิธีใช้พลังงานความร้อน
เชื้อเพลิง	สารแต่งเติม	✓	✓
	แอลกอฮอล์	✓	✓
	ถ่านชาร์		✓
	ดีเซล		✓
	กระแสไฟฟ้า		✓
	น้ำมันเตา		✓
	แก๊ส	✓	✓
	เบนซิน		✓
	ไฮโดรเจน	✓	✓
สารเคมี	อะซิโตน	✓	
	บิวทานอล	✓	
	เอทานอล	✓	✓
	ไฮโดรเจน	✓	✓
	มีเทน	✓	✓
	สารอื่น ๆ ที่มีลักษณะเฉพาะ	✓	✓
	เมทานอล		✓
	เรซิน		✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 กระบวนการไพโรไลซิส

ไพโรไลซิส คือ กระบวนการที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์โดยใช้ความร้อนสูง ในสภาวะที่ไร้อากาศ เกิดที่อุณหภูมิระหว่าง 400-600 °C เป็นกระบวนการทางเคมีแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible reaction) พันธะภายในโมเลกุลของสารอินทรีย์จะแตกตัวเนื่องจากความร้อนที่ได้รับเข้าไป องค์ประกอบที่ระเหยได้จะกลายเป็นแก๊ส เช่น มีเทน ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น แก๊สบางส่วนจะถูกควบแน่นกลายเป็นของเหลว เรียกว่าน้ำมันชีวภาพ มีองค์ประกอบ เช่น กรดแอซิติค (Acetic acid) เมทานอล (Methanol) เป็นต้น ส่วนองค์ประกอบที่ระเหยไม่ได้ จะกลายเป็นของแข็งหรือที่เรียกว่า ถ่านชาร์

กระบวนการไพโรไลซิสแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 โดยเริ่มจากการทำให้ชีวมวลซึ่งประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่มีความชื้นอยู่ประมาณร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักให้ปราศจากน้ำ โดยกระบวนการทำให้แห้ง ที่อุณหภูมิประมาณ 120-150 °C จากนั้นชีวมวลจะถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 500-600 °C จะเกิดการสลายพันธะทางเคมีของโมเลกุล ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สต่าง ๆ และของเหลว



รูปที่ 2.1 กระบวนการไพโรไลซิส [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส จะขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ธรรมชาติของวัสดุ เวลา อุณหภูมิ ขนาดวัตถุดิบที่ใช้ เป็นต้น กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) เป็นวิธีที่ใช้กันมานานสำหรับการผลิตถ่านไม้ ส่วนกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) ซึ่งมีอัตราการให้ความร้อนสูง เวลาที่สารอยู่ในระบบสั้น และมีการลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ลงอย่างรวดเร็ว มักจะใช้เพื่อผลิตของเหลว ของแข็งที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงและสารประกอบคาร์บอนที่เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ ของเหลวที่ได้จะเป็นของผสมของน้ำและสารอินทรีย์ ประกอบด้วยกรด แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ คีโตน เอสเทอร์ อนุพันธ์ที่มีโครงสร้างเป็นวง (Heterocyclic derivatives) และสารประกอบฟีนอล น้ำมันดินหรือทาร์จะประกอบด้วยยางเหนียว สารมัธยันตร์คาร์โบไฮเดรต (Intermediate carbohydrates) อนุพันธ์อะโรมาติกของฟีนอล และแอลดีไฮด์ แก๊สประกอบด้วยมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไอน้ำ ไฮโดรเจน และแก๊สของสารอินทรีย์ชั้นสูง

การสลายตัวขั้นปฐมภูมิของชีวมวล (Primary decomposition) จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 °C เป็นกระบวนการแตกตัวของโครงสร้างภายในโมเลกุล ส่วนการสลายตัวจากความร้อนในขั้นทุติยภูมิ (Secondary thermolysis) เกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 °C เป็นกระบวนการสร้างสารแอโรแมติก

เมื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสกับกระบวนการเผาไหม้แบบธรรมดาพบว่า ไพโรไลซิสมีข้อที่ดีกว่าการเผาไหม้ในแบบธรรมดา คือได้น้ำมันชีวภาพเกิดขึ้นจากปฏิกิริยา และในกระบวนการเผาไหม้ในแบบธรรมดานั้น จำเป็นต้องติดตั้งระบบปรับปรุงคุณภาพแก๊สที่เกิดขึ้นก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ เพราะอาจจะมีการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดแก๊สมลภาวะ

### 2.2.1 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส

การไพโรไลซิสแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

- ก. Anhydrous pyrolysis เป็นกระบวนการที่ไม่มีไอน้ำเข้าไปเกี่ยวข้อง มักทำที่อุณหภูมิสูงกว่า 430 °C ใช้สำหรับการผลิตถ่านไม้และเชื้อเพลิงเหลว
- ข. Hydrous pyrolysis มีการเติมไอน้ำเข้าไประหว่างการไพโรไลซิส มักใช้ในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นน้ำมันดิบเบา
- ค. Vacuum pyrolysis เป็นการไพโรไลซิสสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพื่อลดจุดเดือดของสารอินทรีย์ให้ต่ำลง

นอกจากนี้ยังอาจแบ่งกระบวนการไพโรไลซิสตามสภาวะปฏิบัติงานได้ 3 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 การจำแนกประเภทของการทำไพโรไลซิสตามสภาวะที่ใช้

Type	Residence Time	Heating Rate	Temp. Max (°C)	Main product
Slow	Hrs – Days 5 – 30 min.	Very low < 10 °C.sec <sup>-1</sup>	400 – 600	Solid
Fast	0.5 – 5 sec.	10-100 °C.sec <sup>-1</sup>	600 – 650	Liquid
Flash	< 0.5 sec.	> 100 °C.sec <sup>-1</sup>	1000	Gas

### 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส

- ก. องค์ประกอบของวัสดุ เป็นสิ่งที่จะกำหนดผลิตภัณฑ์ที่ได้
- ข. อุณหภูมิ เป็นตัวแปรสำคัญที่สุด ที่ส่งผลต่อองค์ประกอบและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยสามารถแบ่งช่วงของอุณหภูมิได้เป็น 3 ช่วง คือ
- ขั้นแรก อุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิต่ำที่บรรยากาศปกติ จนถึงประมาณ 135 °C ในขั้นนี้ สารที่ระเหยออกมาส่วนใหญ่ จะเป็นความชื้นในวัสดุ
  - ขั้นที่สอง อุณหภูมิในช่วง 135-400°C สารที่ระเหยได้ประมาณ 75% จะถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงนี้
  - ขั้นที่สาม ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 400 ถึง 600°C โดยที่หลังจากอุณหภูมิ เกิน 600 °C ไปแล้ว กระบวนการไพโรไลซิสจะสิ้นสุดลงจะไม่มีสารระเหยออกมาอีก
- ค. ความดัน มีผลต่อส่วนประกอบของแก๊สที่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำคือ เมื่อความดันเพิ่มขึ้น การไพโรไลซิสชีวมวลจะทำให้ได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทนจะมีปริมาณลดลง นอกจากนี้ ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้จะลดลงพร้อมกับได้แก๊สไฮโดรคาร์บอนเบาออกมา ในทางตรงกันข้ามเมื่อความดันต่ำลงปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้จะเพิ่มขึ้น
- ง. อัตราการให้ความร้อน ปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จะลดลง เมื่อมีการเพิ่มอัตราการให้ความร้อน
- จ. ขนาดของวัตถุดิบ วัสดุขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวน้อย การให้ความร้อนจะช้ากว่าวัสดุที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นอุณหภูมิเฉลี่ยก็จะต่ำกว่าวัสดุที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่า อุณหภูมิในวัสดุที่มีขนาดใหญ่จึงไม่สม่ำเสมอ ทำให้ปริมาณสารที่ระเหยได้น้อยกว่า วัสดุที่มีขนาดเล็ก
- ฉ. ตัวเร่งปฏิกิริยา อาจเพิ่มประสิทธิภาพได้ประมาณ 10 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 การใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส

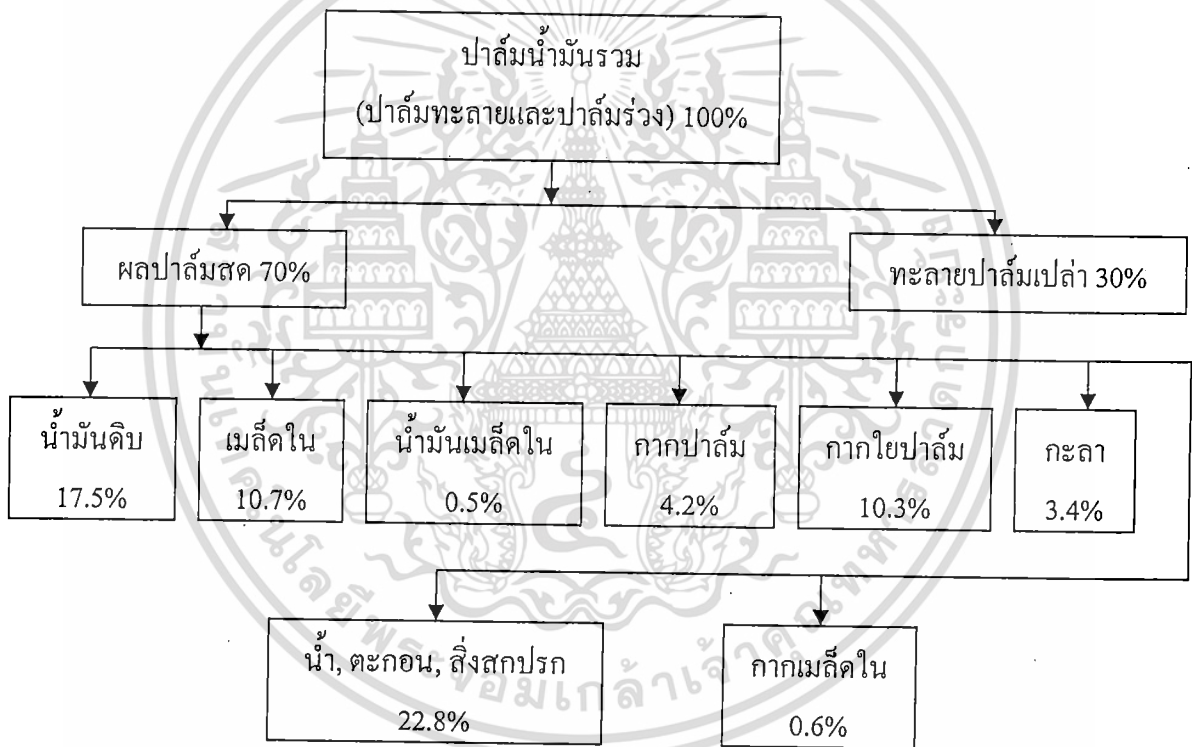
ก. ฟีนอล ใช้เป็นสารเคมีในอุตสาหกรรมพลาสติก สารย้อมติด

ข. กรดแอซิดิก ใช้ผลิตน้ำส้มสายชู ไวนิล อะซิเตท เป็นต้น

ค. เมทานอล ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารเคมีพวก พอร์มอลดีไฮด์ กรดแอซิดิก รวมทั้งใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้

### 2.3 วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการสกัดปาล์มน้ำมัน

ในการสกัดปาล์มน้ำมัน เมื่อพิจารณาผลปาล์มทั้งทะเลายเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ จะพบว่ามีวัสดุเหลือทิ้งเกิดขึ้น เช่น ทะลายเปล่า กากปาล์ม กากใยปาล์ม กากเมล็ดใน กะลาปาล์ม และตะกอนสิ่งสกปรก ในสัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



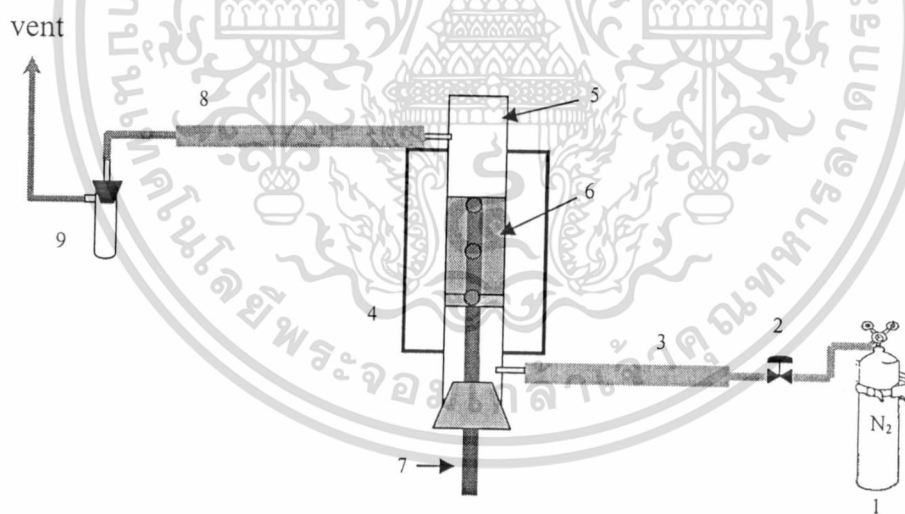
รูปที่ 2.2 วัสดุส่วนต่างๆ ที่ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มจากโรงงานอุตสาหกรรม

จากการสำรวจพบว่า กะลาปาล์มที่เหลือทิ้งจากโรงงานมักถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ให้กำเนิดพลังงานภายในโรงงานถึง 58.8 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่เหลือจะนำไปขาย

### บทที่ 3 การทดลอง

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยมีหลักการทำงานดังนี้ กะลาปาล์มน้ำมันจะถูกบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ ซึ่งได้รับความร้อนจากเตาเผาด้านนอก อุณหภูมิของเตาเผาควบคุมได้จากอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และมีการป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในระบบ เพื่อพาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสออกนอกเครื่องปฏิกรณ์ โดยอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนจะถูกควบคุมด้วยวาล์วควบคุมแก๊ส และมีการอุ่นแก๊สไนโตรเจนให้ร้อนด้วยฮีตเตอร์ก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วย ผลิตภัณฑ์ที่ได้ซึ่งถูกพาออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ในสถานะแก๊สจะเคลื่อนที่เข้าสู่เครื่องควบแน่นที่อุณหภูมิ  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  กลายเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว ส่วนแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้จะถูกปล่อยสู่บรรยากาศ และจะมีของแข็งที่เหลือจากการไพโรไลซิสอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.1 เครื่องไพโรไลซิสแบบกึ่งต่อเนื่องประกอบด้วย (1) ถังแก๊สไนโตรเจน, (2) วาล์วควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน, (3) ชุดให้ความร้อนก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์, (4) เตาเผาให้ความร้อน, (5) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ, (6) เบดกะลาปาล์มน้ำมัน, (7) หัววัดอุณหภูมิแบบ 3 จุด (8) แถบให้ความร้อน และ (9) ชุดควบแน่นดักจับไอผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ กะลาปาล์มน้ำมัน แก๊สไนโตรเจน และน้ำแข็ง

### 3.3 วิธีการทดลอง

เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จะใช้ในการทดลองดังรูปที่ 3.1 ปรับอุณหภูมิของเตาเผาและอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนให้ได้ตามต้องการ พร้อมทั้งอุ่นแก๊สไนโตรเจนให้ร้อน เมื่ออุณหภูมิจากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบ 3 จุด เป็นไปตามที่ต้องการ จึงเริ่มนำกะลาปาล์มน้ำมันที่ผ่านการอบแล้วใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ เริ่มจับเวลา จนเมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงหยุดการทดลอง นำของแข็งที่เหลือและผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ภายในอุปกรณ์ควบแน่นมาชั่งน้ำหนัก เพื่อวิเคราะห์หีมวลสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

### 3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ภายใต้สภาวะต่าง ๆ จะถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยวิธีดังนี้

1. สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และแก๊สที่ได้ ทำโดยชั่งน้ำหนักของเหลวและของแข็งที่ได้ จากนั้นคำนวณหาน้ำหนักแก๊สจากสมการดุลมวลสาร

(นน.กะลาปาล์มน้ำมันเริ่มต้น = นน.ของแข็งที่เหลือ + นน.ของเหลวที่ได้ + นน.แก๊ส)

2. องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลว แก๊สโครมาโตกราฟ แบบ FID (GC14-B)
3. ความเป็นกรด-เบส (pH) กระดาษลิตมัส
3. ความหนาแน่น (Density) มาตรฐาน ASTM D 4052-86
4. ความหนืด (Viscosity) มาตรฐาน ASTM D 445
5. ค่าความร้อน (Heating value) มาตรฐาน ASTM D 240

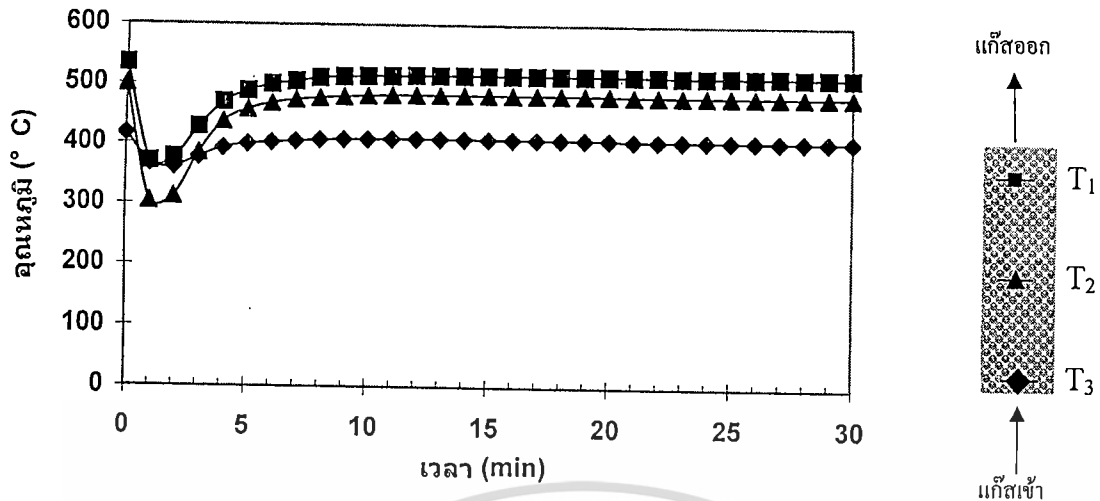
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

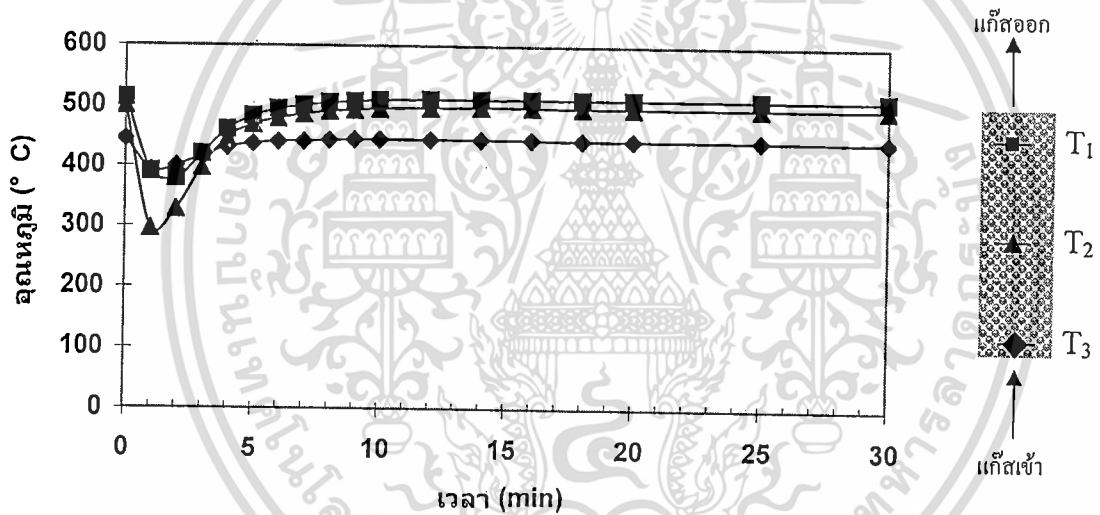
#### 4.1 การถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์

รูปที่ 4.1 (ก.)-(ข.) แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส เมื่อใช้อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 50 และ 100  $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 2 นาทีแรกของการทำไพโรไลซิส จากนั้นจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าคงที่หลังจากทำไพโรไลซิสผ่านไปนาน 10 นาที ที่เป็นเช่นนี้เพราะปฏิกิริยาไพโรไลซิสเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน [1] ทันทีที่ใส่วัตถุดิบลงไป วัตถุดิบจะดูดความร้อนจากแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์เข้าไปเพื่อใช้ในการแตกสลายพันธะภายในโมเลกุล และในช่วง 2 นาทีแรกเป็นช่วงที่สารตั้งต้นมีความเข้มข้นสูงปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ความร้อนที่ถ่ายเทจากเตาเผาด้านนอกเข้าสู่ไปภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่สามารถชดเชยการสูญเสียความร้อนได้ทัน แต่เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไประยะหนึ่ง ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงลดต่ำลงด้วย อัตราการชดเชยความร้อนจากเตาเผาด้านนอกค่อย ๆ เข้าใกล้อัตราการดูดความร้อนเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยา ทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเมื่ออัตราการดูดความร้อนเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยามีค่าเท่ากับอัตราการชดเชยความร้อนจากเตาเผา อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จะเข้าสู่ค่าคงที่

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งภายในเครื่องปฏิกรณ์ในกรณีที่ใช้อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 50  $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของแต่ละตำแหน่งคงที่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิก่อนเริ่มทำไพโรไลซิส ต่างจากกรณีใช้อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 100  $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  ซึ่งอุณหภูมิของแต่ละตำแหน่งคงที่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าค่าที่วัดได้ก่อนเริ่มทำไพโรไลซิส ทำให้สรุปได้ว่าการเลือกใช้อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 50  $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  จะทำให้การถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่ผิดพลาด ดังนั้นจึงควรทำการทดลองโดยใช้อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนมากกว่าหรือเท่ากับ 100  $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$



(ก.)

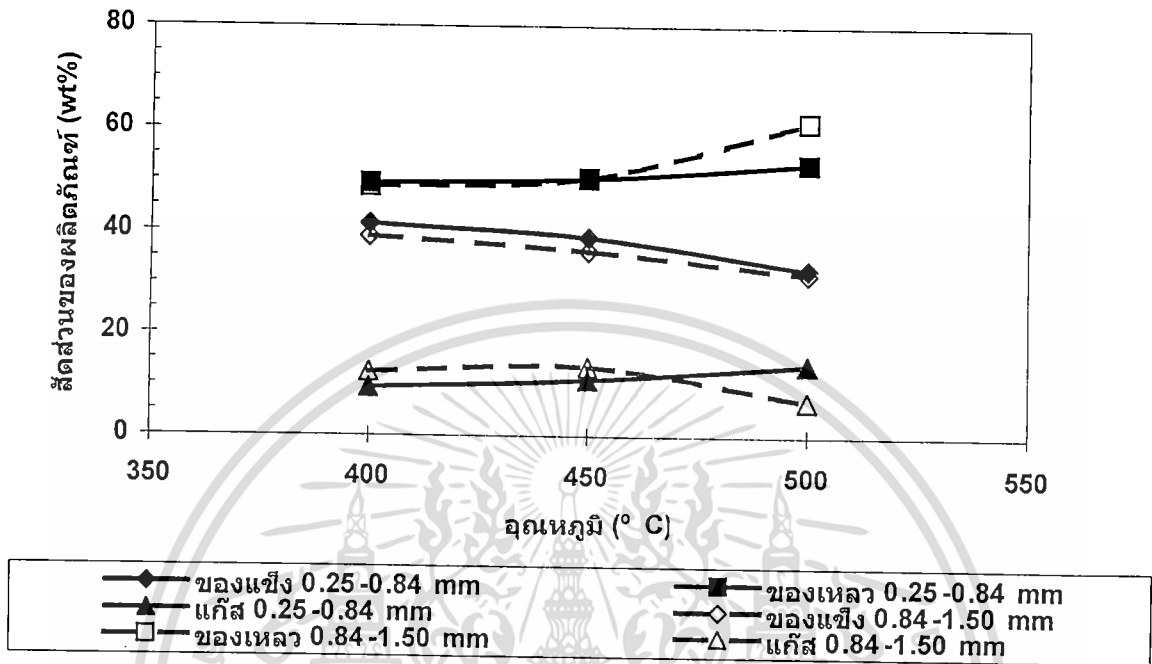


(ข.)

รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลาต่าง ๆ เมื่ออัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนเป็น (ก.)  $50 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  และ (ข.)  $100 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  (ขนาดวัสดุดิบ 0.84-1.50 mm อุณหภูมิ 500 °C และเวลาทำไพโรไลซิส 60 min)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

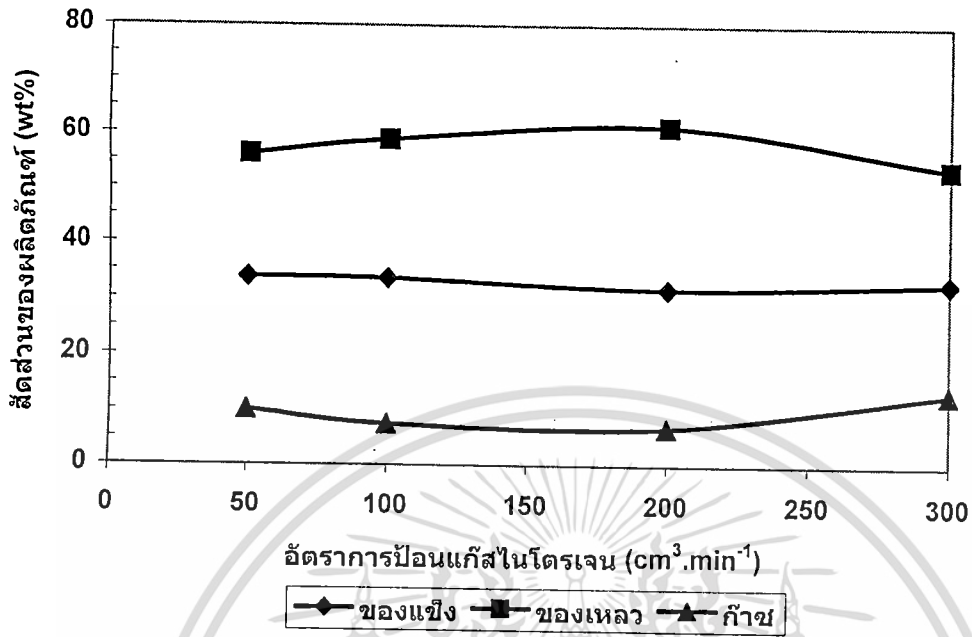
#### 4.2 อิทธิพลของขนาดวัสดุดิบที่ใช้ทำไฟโรไลซิสที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์



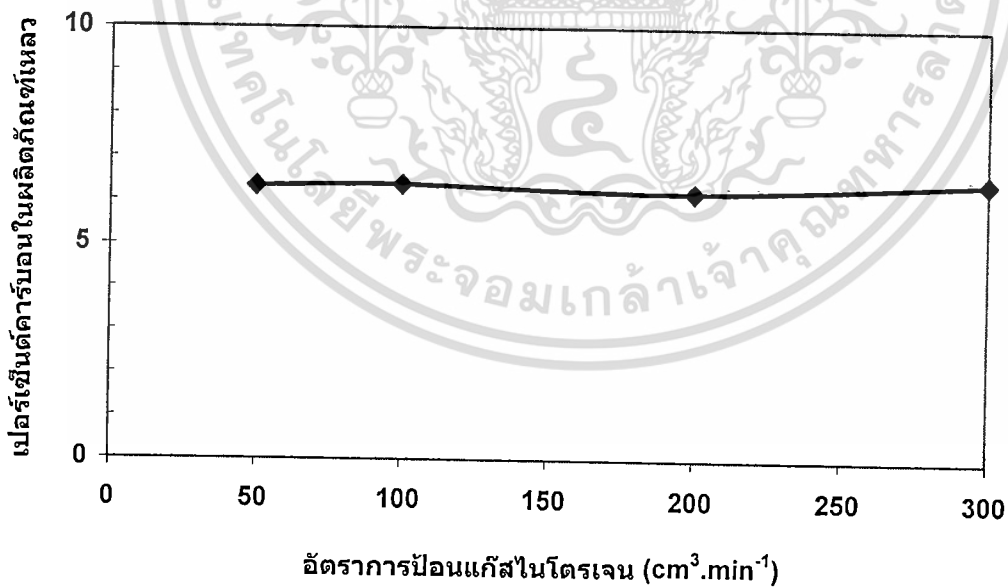
รูปที่ 4.2 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไฟโรไลซิส : เวลาทำไฟโรไลซิส 60 min อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 cm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>

ผลการทดลองในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อพิจารณาสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ในกรณีที่ใช้วัสดุดิบขนาด 0.25-0.84 มม. เทียบกับกรณีที่ใช้วัสดุดิบขนาด 0.84-1.50 มม. จะพบว่าในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำไฟโรไลซิส ระหว่าง 400-450 °C สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัสดุดิบทั้ง 2 ขนาดมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน แต่เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำไฟโรไลซิสเพิ่มเป็น 500 °C สัดส่วนของเหลวที่ได้จากการใช้วัสดุดิบที่มีขนาด 0.84-1.50 มม. จะได้ 61.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าเมื่อใช้วัสดุดิบขนาด 0.25-0.84 มม. ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่สัดส่วนของแก๊สที่ได้จากการใช้วัสดุดิบขนาด 0.25-0.84 มม. จะมีมากกว่าการใช้วัสดุดิบขนาด 0.84-1.50 มม. ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

### 4.3 อิทธิพลของอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์

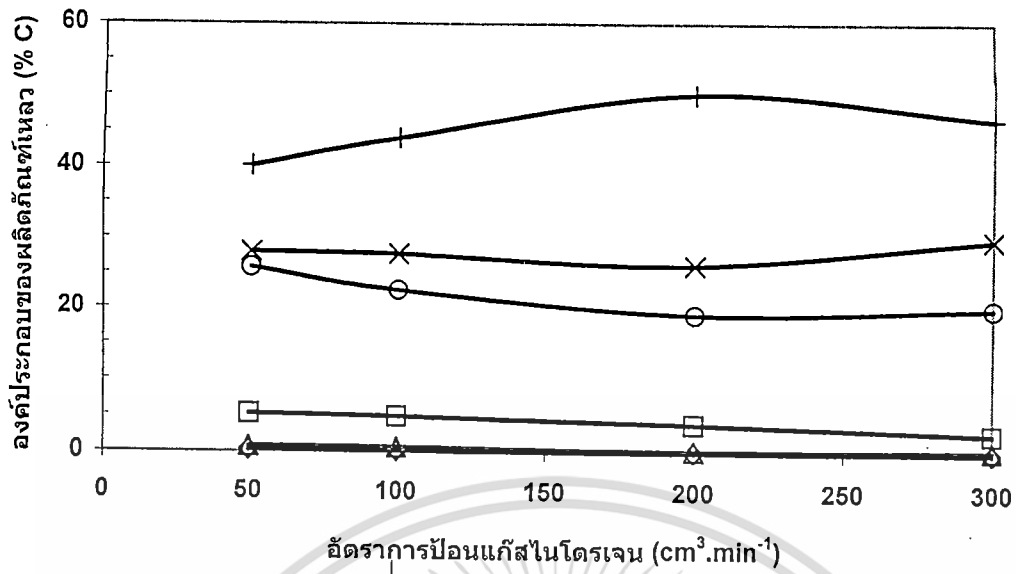


รูปที่ 4.3 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไพโรไลซิสเมื่อใช้อัตราการป้อนของแก๊สพาต่างกัน (ขนาดวัสดุดิบ 0.84-1.50 mm อุณหภูมิ 500 °C และเวลาทำไพโรไลซิส 60 min)



รูปที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลว (ขนาดวัสดุดิบ 0.84-1.50 mm, อุณหภูมิ 500 °C และเวลาทำไพโรไลซิส 60 min)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทำไพโรไลซิส (ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 mm อุณหภูมิ 500 °C และเวลาทำไพโรไลซิส 60 min)

รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน ส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊สเท่านั้น แต่ไม่ส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมากนัก และการเลือกใช้อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 200 cm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> จะทำให้ได้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุดถึง 61.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ปริมาณของเหลวที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 56.1 เป็น 61.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่ออัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 50 เป็น 200 cm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 ว่าอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 50 cm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> ไม่สามารถทำให้การถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ดีพอ ดังนั้นอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์จึงต่ำกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ นอกจากนี้เมื่ออัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนน้อย สารที่เกิดจากการสลายตัวของอนุภาคอะลาปาล์มน้ำมันจะเกิดการสลายตัวขั้นทุติยภูมิ ทำให้ได้สารที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก สามารถควบแน่นได้ง่าย ทำให้ได้สัดส่วนของแก๊สที่มาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohammad Nurul Islam และคณะ [2] และเมื่ออัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 200 cm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> เป็น 300 cm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้มีค่าลดลง 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของแก๊สพาเพิ่มขึ้นทำให้เวลาที่แก๊สผลิตภัณฑ์อยู่ในอุปกรณ์สำหรับควบแน่นสั้นลง จึงเกิดการควบแน่นได้ไม่สมบูรณ์

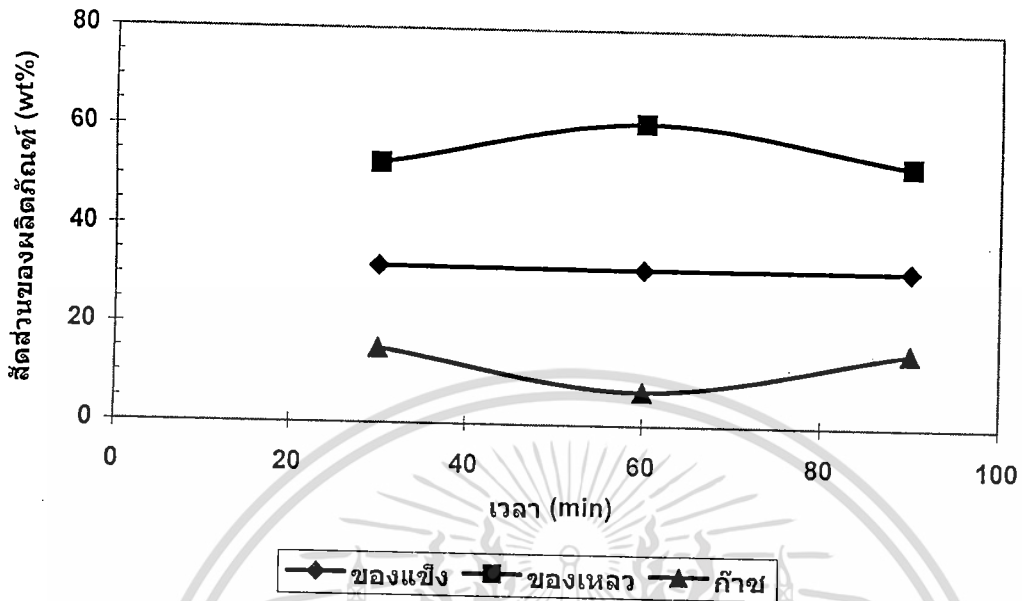
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมาวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่พบว่า มีปริมาณค่อนข้างคงที่ไม่ขึ้นกับอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน โดยมีค่าประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.4 เมื่อวิเคราะห์หาชนิดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ พบว่ามีองค์ประกอบหลักคือ เมทานอล อะซีทัลดีไฮด์ อะซีโตน กรดแอซิติค และฟีนอล โดยปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ในผลิตภัณฑ์ของเหลว จะขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนแก๊ส ดังรูปที่ 4.5 จากรูปพบว่าอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน จะส่งผลกระทบต่อปริมาณของฟีนอลอย่างเห็นได้ชัด ที่อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ  $200 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  ปริมาณของฟีนอลที่ได้ คือ 50.2 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเมื่อใช้อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนเป็น  $50 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน และมากกว่าเมื่อใช้อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนเป็น  $300 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  ประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน ในขณะที่สัดส่วนขององค์ประกอบอื่น ๆ มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

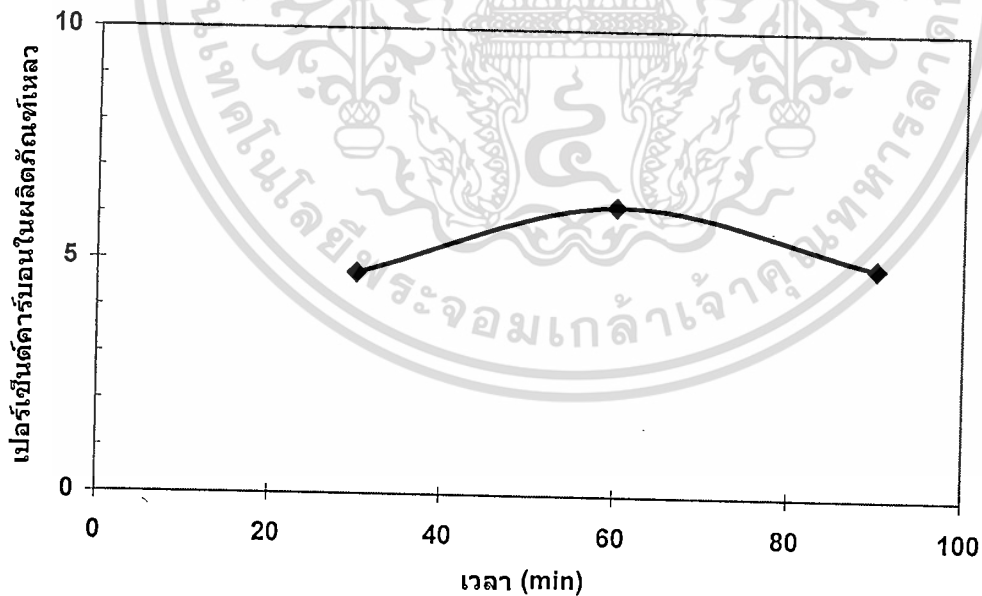


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 อิทธิพลของเวลาทำไพโรไลซิสที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์

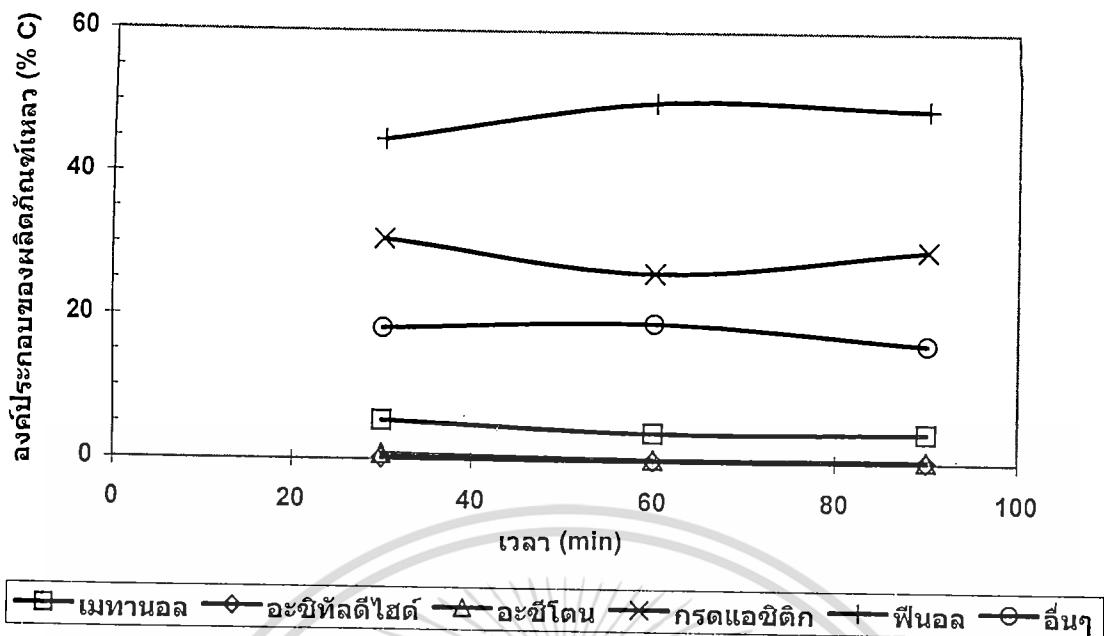


รูปที่ 4.6 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไพโรไลซิส (ขนาดวัสดุดิบ 0.84-1.50 mm อุณหภูมิ 500 °C และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 cm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>)



รูปที่ 4.7 เปอร์เซนต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลว (ขนาดวัสดุดิบ 0.84-1.50 mm อุณหภูมิ 500 °C และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 cm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

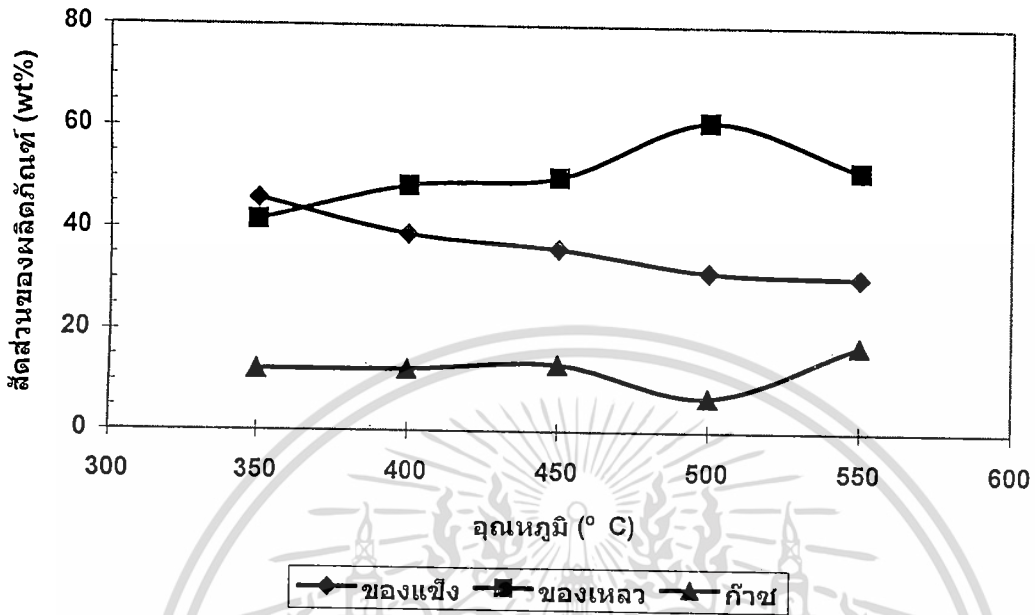


รูปที่ 4.8 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทำไพโรไลซิส (ขนาดวัสดุ 0.84-1.50 mm อุณหภูมิ 500 °C และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 cm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>)

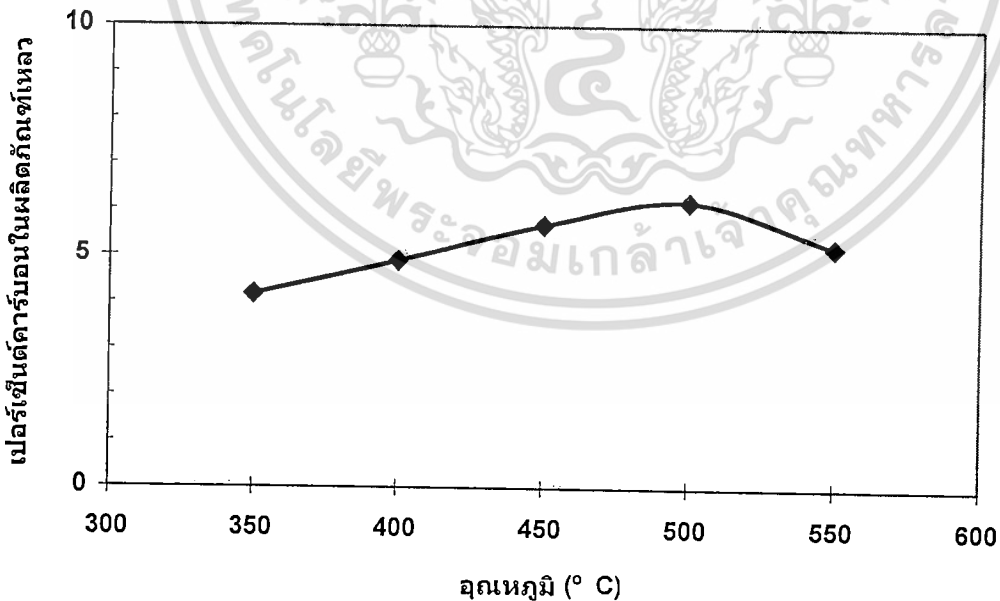
จากรูปที่ 4.6 และ 4.8 แสดงผลของเวลาที่มีต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวตามลำดับ พบว่าสัดส่วนของของแข็งที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่แม้ว่าเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสจะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม ในขณะที่สัดส่วนของเหลวที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 52.8 เป็น 61.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 60 min เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสเพียง 30 min ไม่สามารถที่จะไพโรไลซิสวัสดุได้อย่างสมบูรณ์ และเมื่อเพิ่มเวลาในการไพโรไลซิสให้นานขึ้นเป็น 90 min พบว่าปริมาณของเหลวที่ได้ลดลงถึง 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากเมื่อเวลาผ่านไปผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในอุปกรณ์ควบคุมจะถูกแก๊สพาออกไปอย่างต่อเนื่อง (สารตั้งต้นมีปริมาณมากช่วงแรก จากนั้น 60-90 min น้อยลงจนคงที่แทบไม่มีอะไรออกมาแล้ว) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้พบว่า คล้ายกับผลการทดลองในข้อที่ 4.3 กล่าวคือ มีฟีนอลปริมาณมากที่สุด โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส และค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสนานกว่า 60 min

รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่ประกอบอยู่ในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เวลาในการทำไพโรไลซิสต่าง ๆ กัน พบว่าที่เวลาที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส 60 min จะให้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุด คือ 6.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากเมื่อเวลาที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสเป็น 30 และ 90 min ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์

4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ทำไพโรไลซิสที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์

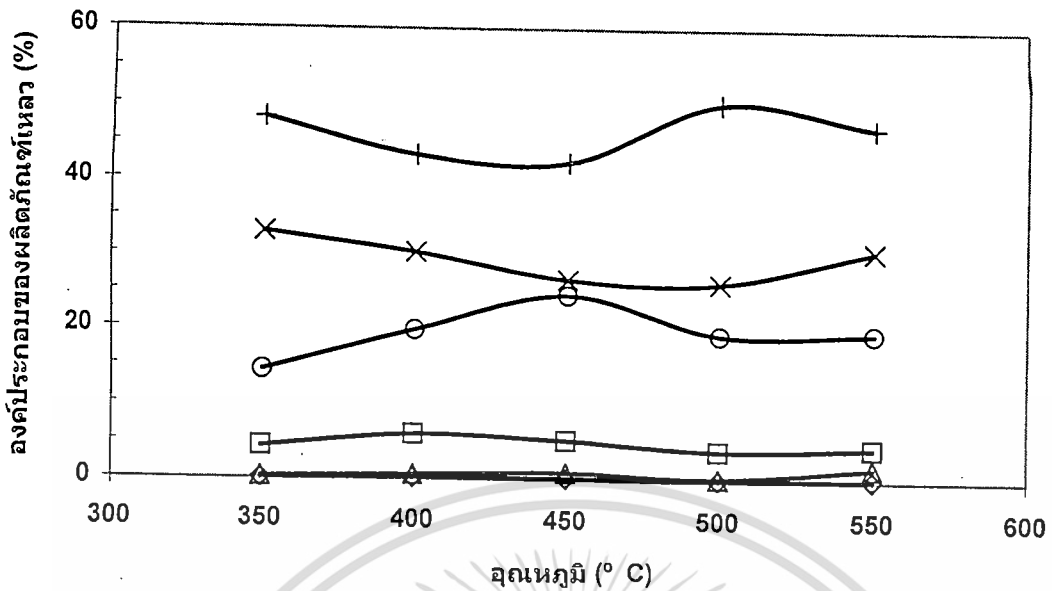


รูปที่ 4.9 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไพโรไลซิส (ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 mm อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน  $200 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  และเวลาทำไพโรไลซิส 60 min)



รูปที่ 4.10 เปอร์เซนต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลว (ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 mm อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน  $200 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  และเวลาทำไพโรไลซิส 60 min)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



□ เมทานอล ◇ อะซีทิลดีไฮด์ △ อะซีโตน × กรดแอสซิดิก + ฟีนอล ○ อื่นๆ

รูปที่ 4.11 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทำไพโรไลซิส (ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 mm อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 cm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> และเวลาทำไพโรไลซิส 60 min)

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ทั้งที่เป็นของเหลว ของแข็งและแก๊ส อุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสที่ทำให้ได้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุด 61.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คือ ที่อุณหภูมิ 500 °C

สัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวจะลดลงจาก 61.3 มาเป็น 41.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสลดลงจาก 500 °C มาเป็น 350 °C เนื่องจากที่อุณหภูมิ 350 °C วัตถุดิบจะเกิดการสลายตัวได้ไม่สมบูรณ์ สังเกตได้จากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่เหลืออยู่มาก และได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ayhan Demirbas [3] ที่พบว่าโครงสร้างของสารชีวมวลจะสลายตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของเหลวที่ได้เมื่อใช้อุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสเท่ากับ 500 °C และ 550 °C จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสเพิ่มจาก 500 °C เป็น 550 °C ปริมาณของเหลวที่ได้มีปริมาณต่ำลงถึง 9.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากเกิดการสลายตัวขั้นทุติยภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ได้ในเบื้องต้น ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างขนาดเล็กซึ่งควบแน่นได้ยาก สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวจึงลดลง และสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohammad Nurul Islam และคณะ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

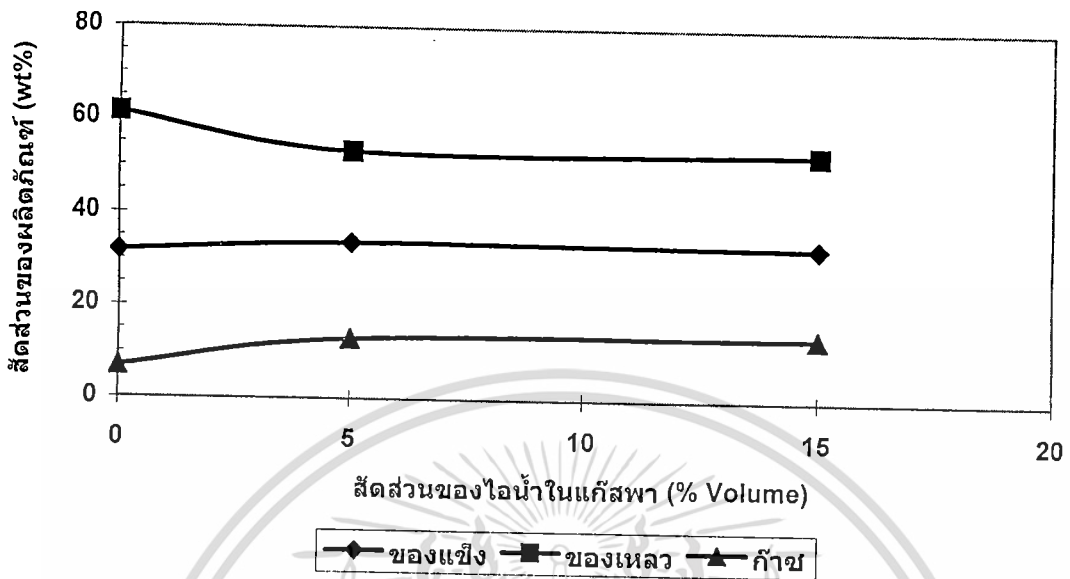
รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสต่าง ๆ กัน พบว่าที่อุณหภูมิ 500 °C จะให้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุด คือ 6.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเมื่อใช้อุณหภูมิ 350 °C มาประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสเป็น 550 °C จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงเหลือ 5.2 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสจะส่งผลต่อสัดส่วนขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับผลของตัวแปรอื่น ๆ โดยที่เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสเป็น 500 °C ซึ่งเป็นสภาวะที่ทำให้ได้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุด จะพบปริมาณของฟีนอลสูงสุด และปริมาณของกรดเอซิติคต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสอื่น ๆ คือ 50.2 และ 26.2 เปอร์เซ็นต์คาร์บอนตามลำดับ

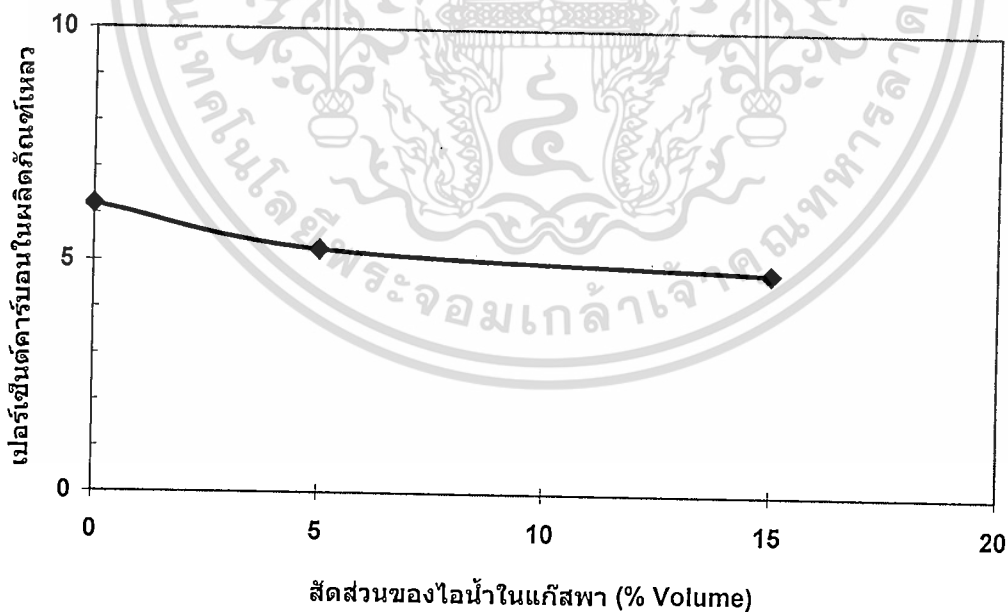


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 อิทธิพลของไอน้ำที่ใช้ทำไพโรไลซิสที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์

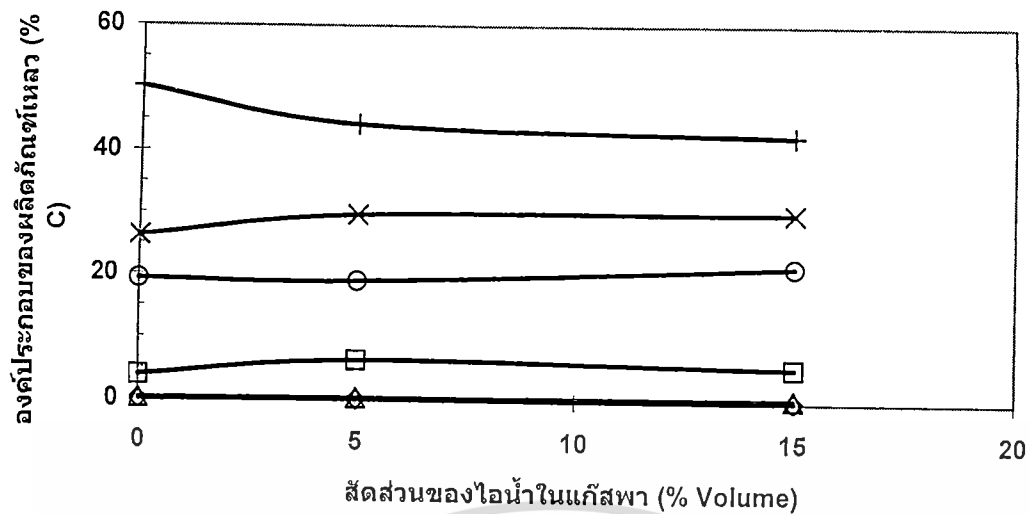


รูปที่ 4.12 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไพโรไลซิส (ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 mm อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 cm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> เวลาทำไพโรไลซิส 60 min และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส 500 °C)



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลว (ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 mm อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 cm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> เวลาทำไพโรไลซิส 60 min และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส 500 °C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



—□— เมทานอล —◇— อะซีตัลดีไฮด์ —△— อะซีโตน —×— กรดแอซิดิก —+— ฟีนอล —○— อื่นๆ

รูปที่ 4.14 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทำไพโรไลซิส (ขนาดวัตต์ถูกปิด 0.84-1.50 mm อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน  $200 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  เวลาทำไพโรไลซิส 60 min และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ )

รูปที่ 4.12-4.14 แสดงผลของไอน้ำต่อการเกิดไพโรไลซิส จากผลการทดลองในรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าการเติมไอน้ำเข้าสู่ระบบไม่ส่งผลต่อสัดส่วนของแข็งมากนัก แต่จะส่งผลให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง ขณะที่สัดส่วนของแก๊สเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเติมไอน้ำเข้าสู่ระบบสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวจะลดลงจาก 61.3 เป็น 53 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในทั้ง 2 กรณี เนื่องจากไอน้ำในแก๊สพาจะช่วยในการแตกตัวของสารให้เกิดได้ดีขึ้น จึงได้สารที่มีโมเลกุลเล็กซึ่งสามารถควบแน่นได้ง่าย จึงทำให้สัดส่วนของของเหลวลดลง และไปเพิ่มในสัดส่วนของแก๊สแทน เห็นได้จากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.13

รูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อสัดส่วนของไอน้ำในแก๊สพาเป็น 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะมีค่าสูงที่สุด คือ 6.2 เปอร์เซ็นต์ และจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของไอน้ำในแก๊สพา จนเมื่อสัดส่วนของไอน้ำในแก๊สพาเป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะทำให้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงต่ำสุดเหลือ 4.8 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่า การที่มีไอน้ำในระบบจะทำให้ปริมาณของฟีนอลในผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงจาก 50.2 เป็น 42.5 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน และทำให้ปริมาณของกรดแอซิดิกในผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 26.2 เป็น 30.1 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน ในขณะที่สัดส่วนขององค์ประกอบอื่น ๆ ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ของเหลว

เมื่อทราบสภาวะที่เหมาะสมในการทำไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมันเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวปริมาณมากแล้ว จึงนำของเหลวที่ได้ภายใต้สภาวะปฏิบัติงานดังกล่าวไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ได้ผลดังนี้

##### 4.7.1 ลักษณะทางกายภาพ

ตาราง 4.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองกับคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันชนิดอื่น ๆ (น้ำมันจากการไพโรไลซิสกะลาปาล์ม น้ำมันและไม้ น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว) โดยนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองในสภาวะที่ได้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุดมาวิเคราะห์ พบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองมีสภาพเป็นกรด ความหนืดต่ำ มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้ แต่มากกว่าน้ำและน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าน้ำมันชนิดอื่น ๆ จึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองกับน้ำมันชนิดอื่น ๆ

คุณสมบัติ	Palm shell pyrolysis oil (Experiment)*	Palm shell pyrolysis oil [2]	RTP wood pyrolysis oil [2]	Fast diesel [2]
Heating value (MJ.kg <sup>-1</sup> ) ASTM D240	12.68	22.1	22.1-24.3	45-46
Viscosity @ 40 °C (cSt) ASTM D445	3.25	14.63	35-53	1.3-3.3
Density@15°C (g.cm <sup>-3</sup> ) ASTM D4052-86	1.08	1.2	1.11-1.25	0.78
pH	4	-	-	-

\* สภาวะทดลอง : ขนาดวัสดุดิบ 0.84-1.50 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส 500 °C

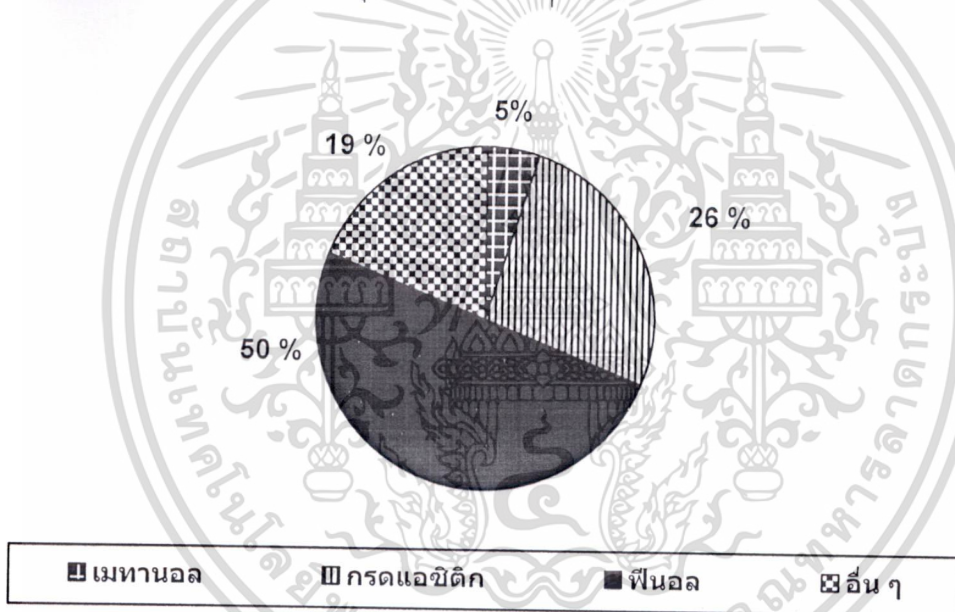
อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 cm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> และเวลาทำไพโรไลซิส 60 min

หมายเหตุ: คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ ณ สภาวะอื่น ๆ แสดงในภาคผนวก ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.2 องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ของเหลว

รูปที่ 4.15 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทำไพโรไลซิสกะลาปาล์ม น้ำมัน พบว่าสารที่พบมากที่สุดในการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลว คือ ฟีนอล ซึ่งพบประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอน รองลงมา คือ กรดแอสติค พบประมาณ 26 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน ส่วนที่เหลือจะเป็น เมทานอล อะซีโตน อะซิทัลดีไฮด์ และสารอื่นๆ ซึ่งสารที่พบในการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองนี้มีองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกับในงานวิจัยของ Mohammad Nurul Islam และคณะ [2] และงานวิจัยของ MD Kawser, J และ Farid Nash [4] ซึ่งในงานวิจัยทั้งสอง จะพบฟีนอลเป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลอง จากการที่พบฟีนอลเป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลว ประกอบกับค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับน้ำมันชนิดอื่นๆ จึงมีความเหมาะสมที่จะสกัดฟีนอลออกมา เพื่อนำไปใช้เป็นสารเคมีทั้งในอุตสาหกรรมพลาสติก สารยึดติดหรืออุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 4.15 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทำไพโรไลซิส (ขนาดวัตต์ 0.84-1.50 mm อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 cm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> เวลาทำไพโรไลซิส 60 min และ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส 500 °C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัย

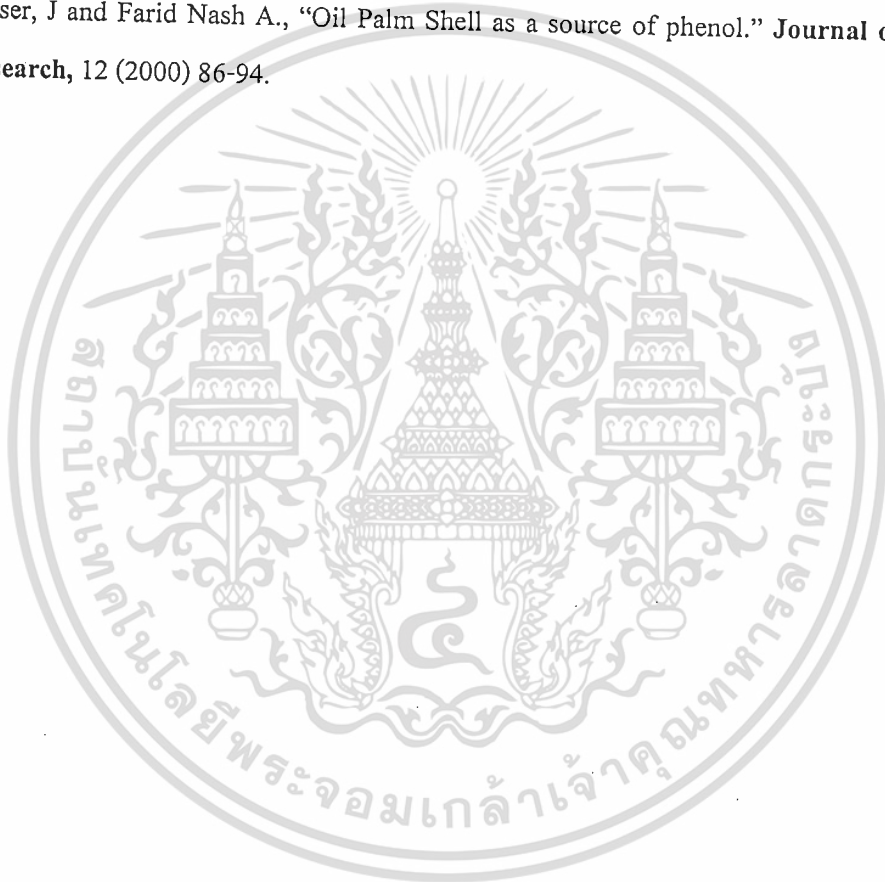
#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ขนาดของวัตถุดิบ อุณหภูมิ อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน และเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส เป็นปัจจัยที่จำเป็นต้องพิจารณาในการเลือกสภาวะการไพโรไลซิส การเติมน้ำในระหว่างการไพโรไลซิสจะทำให้ประสิทธิภาพการไพโรไลซิสลดลง

สภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุด คือ ใช้กะลาปาล์มน้ำมันขนาด 0.84-1.50 mm อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200  $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  อุณหภูมิ 500  $^{\circ}\text{C}$  เวลาในการไพโรไลซิส 60 min และไม่มีการเติมน้ำในแก๊สพา ซึ่งทำให้ได้ปริมาณของเหลว 61.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีฟีนอล 50.2 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน กรดแอซิดิก 26.2 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน เมทานอล 3.9 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ อีกประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน เหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาเพื่อใช้เป็นแหล่งสารเคมีทดแทน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] "Thermal methods of municipal waste treatment". [Online]. Available : <http://www.Biffaward.org/downloads/projectfiles/1826-00237.pdf>.2548.
- [2] Mohammad Nurul I., Ramlan Zailani and Farid Nasir A. "Pyrolytic oil from fluidised bed pyrolysis of oil palm shell and its characterization." **Renewable Energy**, 17 (1999) 73-84.
- [3] Ayhan Demirbas. "Partly chemical analysis of liquid fraction of flash pyrolysis products from biomass in the presence of sodium carbonate." **Energy Conversion and Management**, 43 (2002) 1801-1809.
- [4] MD Kawser, J and Farid Nash A., "Oil Palm Shell as a source of phenol." **Journal of Oil Palm Research**, 12 (2000) 86-94.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้