

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการเรื่อง
“การไฟโรไลซิสวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยกระบวนการต่อเนื่อง”



โดย
รศ.ดร.ดวงกมล ณะระนอง
สังกัดภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สนับสนุนทุนวิจัยโดย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประจำปีงบประมาณ 2551

RCH
TP
156
.Pg
๑153ค

b. 18160791.....

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 105810
วัน,เดือน,ปี..... 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีลิขสิทธิ์สงวนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นอย่างสูงที่ได้อุดหนุนทุนการวิจัย

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณพิสนต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่วิจัยประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการปรับปรุงเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทำงานวิจัย

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณพิมพ์ใจ ภูษณะกิจ เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไปประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานกับหน่วยงานต่างๆ ระหว่างการดำเนินงานวิจัย

คณะผู้วิจัย

มิถุนายน 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าสรุปโครงการ

1. ชื่อโครงการ

การไฟฟระไลชิสวัสตุเหลือทึงทางการเกษตรด้วยกระบวนการต่อเนื่อง

2. ผู้รับผิดชอบโครงการ

2.1 หัวหน้าโครงการ รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง

2.2 นักศึกษาผู้ช่วยวิจัย

น.ส.รัตนภร ยวงสวัสดิ์ (นักศึกษาระดับปริญญาเอก)

น.ส.มนีวรรณ ตนภู (นักศึกษาระดับปริญญาตรี)

น.ส.มานิตา ประสงค์เจริญ (นักศึกษาระดับปริญญาตรี)

3. งบประมาณทั้งโครงการ

113,460 บาท

4. ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย

12 เดือน

5. ชิ้นงานที่ส่งมอบเมื่อสิ้นสุดโครงการ

เครื่องไฟฟระไลชิสแบบต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	ii
สารบัญรูป	iii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การไฟโรไลซิสวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	3
2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องสำหรับการไฟโรไลซิส	5
บทที่ 3 การทดลอง	6
3.1 สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้	6
3.2 การเตรียมวัตถุดิบ	6
3.3 เครื่องไฟโรไลซิสแบบต่อเนื่อง	7
3.4 การไฟโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	10
3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์	10
บทที่ 4 ผลการวิจัย การวิเคราะห์และวิจารณ์ผล	11
4.1 การออกแบบเครื่องไฟโรไลซิสแบบต่อเนื่อง	11
4.2 อิทธิพลของอัตราการป้อนวัตถุดิบที่มีต่อการไฟโรไลซิสแบบต่อเนื่อง	12
4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการไฟโรไลซิสแบบต่อเนื่อง	17
4.4 ประสิทธิภาพของเครื่องไฟโรไลซิสแบบต่อเนื่อง	19
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	20
เอกสารอ้างอิง	21
ภาคผนวก	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องไฟโรไลซิส
แบบต่อเนื่องในงานวิจัยต่างๆ

หน้า

19



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1	กะลาปาล์มที่ผ่านการบดและคัดขนาด	6
รูปที่ 2(ก)	แผนภูมิแสดงส่วนประกอบของเครื่องไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง	8
รูปที่ 2(ข)	เครื่องไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง	9
รูปที่ 3	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส	10
รูปที่ 4	อิทธิพลของอัตราการป้อนกะลาปาล์มต่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้ : ขนาดกะลาปาล์ม 0.8 – 1.5 mm., อุณหภูมิ 500 °C	13
รูปที่ 5	โครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ แบบ MS และ FID: ขนาดกะลาปาล์ม 0.8 – 1.5 mm., อุณหภูมิ 500 °C	15
รูปที่ 6	อิทธิพลของอัตราการป้อนกะลาปาล์มต่อสัดส่วนองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว : ขนาดกะลาปาล์ม 0.8 – 1.5 mm., อุณหภูมิ 500 °C	16
รูปที่ 7	อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสต่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้ : ขนาดกะลาปาล์ม 0.8 – 1.5 mm., อัตราการป้อนกะลาปาล์ม 20 g/h	18
รูปที่ 8	อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสต่อสัดส่วนองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว : ขนาดกะลาปาล์ม 0.8 – 1.5 mm., อัตราการป้อนกะลาปาล์ม 20 g/h	18

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมของประเทศ อาศัยวัตถุดิบสำหรับการผลิตพลังงาน และสารเคมีมูลค่าสูง จากต่างประเทศเป็นหลักทำให้การพัฒนาอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมีของประเทศถูกกระทบกระเทือน จากปัจจัยภายนอกประเทศได้ง่าย เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวและพัฒนาศักยภาพของภาคอุตสาหกรรมให้ สามารถพึ่งพาตนเองได้ จำเป็นต้องหาแนวทางเพื่อนำทรัพยากรที่มีอยู่ในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์ สูงสุด

ในช่วงที่ผ่านมาภาครัฐได้ส่งเสริมการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากพืชน้ำมัน เช่น ปาล์มน้ำมัน, สนุ่ดำ ฯลฯ ทำให้มีการเพิ่มพื้นที่เพาะปลูกทางการเกษตรเป็นบริเวณมาก และมีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพิ่มขึ้นเป็นปริมาณมากตามไปด้วย แม้ว่าในปัจจุบันจะมีการนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ด้าน พลังงานบ้างก็ตามแต่เทคโนโลยีที่ใช้กันอยู่ทั่วไปตามโรงงานอุตสาหกรรมมักเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้ง เหล่านี้มาเผาเพื่อให้กำเนิดพลังงานความร้อนโดยตรงเท่านั้น ซึ่งวิธีการนี้จะมีการสูญเสียด้านพลังงานสูง ทำให้เกิดการใช้ประโยชน์ได้ไม่เต็มที่และยังปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาสิ่งแวดล้อมโลกอีกด้วย

ไพโรไลซิส (Pyrolysis) จัดเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้พลังงานความร้อน (Thermochemical process) ในการเปลี่ยนรูปชีวมวลทำให้ได้สารผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสถานะแก๊ส ของเหลว และของแข็ง ซึ่งสารผลิตภัณฑ์ ที่อยู่ในสถานะแก๊ส และของเหลวจะมีค่าความร้อน (heating value) สูงกว่าค่าความร้อนที่ได้จาก กระบวนการเผาไหม้ธรรมดา ทำให้ประสิทธิภาพของการนำวัสดุชีวมวลมาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานมี ค่าสูงกว่ากระบวนการเผาไหม้ธรรมดาตามาก ส่วนผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้มักมีคุณสมบัติเป็นถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับได้ นอกจากนี้หากพิจารณาองค์ประกอบ ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและของเหลวจะพบว่ามีสารประกอบจำพวกพาราฟินส์, โอเลฟินส์, กรดอินทรีย์, อัลกอฮอล์, อัลดีไฮด์, คีโตน, เอสเทอร์ และสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งสารเหล่านี้ถือเป็นสารตั้งต้น (feed stock) ที่สำคัญของกระบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมีของประเทศ

ที่ผ่านมาผู้วิจัยได้ทำวิจัยโดยเลือกกะลาปาล์มมาทำไพโรไลซิสในระบบแบบกะ เพื่อนำกลับสารเคมี มูลค่าสูงได้ผลเป็นที่น่าพอใจสามารถนำกลับสารผสมของสารอินทรีย์จำพวกคีโตน, อัลกอฮอล์, อัลดีไฮด์, ฟีนอลได้เป็นปริมาณมาก (ประมาณ 50% โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักกะลาปาล์มเริ่มต้น) ในรูปของ น้ำมันชีวภาพ และยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการนำกลับสารเคมี จนกระทั่งได้ สภาวะปฏิบัติงานที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสแล้ว (อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส, เวลาในการไพโรไล ซิส 1 ชั่วโมง และขนาดอนุภาคกะลาปาล์ม 10 – 20 เมช) นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพที่ได้เพื่อให้มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์อื่นๆ ปริมาณ น้อยเหมาะสำหรับนำไปแยกสารเคมีมูลค่าสูงให้บริสุทธิ์ต่อไป พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกสารประกอบ ออกไซด์ของเหล็กที่มีการเติมเซอร์โคเนียมออกไซด์สามารถปรับปรุงน้ำมันชีวภาพให้มีองค์ประกอบหลัก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสารอินทรีย์ที่มีความเสถียรมากยิ่งขึ้น (เมทานอล, อะซีโตน, กรดอะซีติก และฟีนอล) เหมาะสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

แม้ว่าผลงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นแนวทางการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรไปใช้ประโยชน์ อย่างเป็นรูปธรรมก็ตาม แต่การจะนำเทคโนโลยีดังกล่าวไปใช้ให้เกิดประโยชน์จริงในระดับอุตสาหกรรม จำเป็นต้องมีการปรับปรุงกระบวนการให้สามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบระบบไพโรไลซิสให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

องค์ความรู้และเทคโนโลยีที่ได้จากงานวิจัยนี้นอกจากจะมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตน้ำมัน ปาล์มแล้ว ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากอุตสาหกรรมอื่น ได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย

- 1.2.1 ออกแบบเครื่องไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง
- 1.2.2 ศึกษาการไพโรไลซิสด้วยกระบวนการแบบต่อเนื่อง
- 1.2.3 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรปฏิบัติงาน (อุณหภูมิ และอัตราการป้อนสาร) ที่มีต่อประสิทธิภาพ การทำงานของเครื่องไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบเครื่องไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องขนาดใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 1.3.2 ทดสอบการทำงานของเครื่องไพโรไลซิสที่สร้างขึ้นภายใต้สภาวะปฏิบัติงานต่างๆ (อุณหภูมิ 400 – 550 องศาเซลเซียส, อัตราการป้อนสาร 10 – 40 กรัมต่อชั่วโมง)
- 1.3.3 วิเคราะห์สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ของแข็ง ของเหลวและแก๊ส) ด้วยการดูลมวล
- 1.3.4 วิเคราะห์ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ แก๊สโครมาโตกราฟีชนิด MS และ FID

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อการนำวัสดุชีวมวลมาใช้เป็นวัตถุดิบหมุนเวียนสำหรับการผลิต สารเคมีมูลค่าสูงอย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.4.2 เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาการบำบัดของเสียชีวมวล
- 1.4.3 ลดการพึ่งพาเทคโนโลยีและการนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 2-2 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การไพโรไลซิสวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือชีวมวลมีองค์ประกอบพื้นฐานประเภทสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่มีมวลโมเลกุลสูง ได้แก่ เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งสารประกอบเหล่านี้สามารถสลายตัวเกิดเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดเล็กได้ เมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อนที่เหมาะสมหรือกระบวนการไพโรไลซิส โดยสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลเล็กเหล่านี้จะอยู่ในรูปผลิตภัณฑ์ของเหลว เช่น พาราฟินส์, โอเลฟินส์, กรดอินทรีย์, แอลกอฮอล์, แอลดีไฮด์, คีโตน, เอสเทอร์ และสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งจัดเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตสารเคมีต่างๆ ในอุตสาหกรรม นอกจากผลิตภัณฑ์เหลวแล้วแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสมียุคค่าความร้อนสูงกว่าแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ธรรมดา ทำให้มีประสิทธิภาพในการนำมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงานสูงกว่าการเผาไหม้ธรรมดา ส่วนผลิตภัณฑ์ของแข็งที่เหลือจากการไพโรไลซิสมียุคคุณสมบัติเป็นถ่านกัมมันต์ (activated carbon) สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับได้อีกด้วย

กระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลได้รับการพัฒนาและศึกษาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง โดยใช้วัตถุดิบ, สภาวะในการไพโรไลซิส และชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ที่แตกต่างกัน Yang และ คณะ [1] ได้ทำการศึกษาการไพโรไลซิสชีวมวลที่เป็นของเสียจากส่วนต่างๆ ของปาล์มน้ำมัน (กะลาปาล์ม ทะลายปาล์มเปล้าและเส้นใยปาล์ม) โดยใช้เทคนิค TGA พบว่าของเสียจากปาล์มน้ำมันสามารถสลายตัวได้โดยง่าย โดยช่วงอุณหภูมิของการสลายตัวอยู่ระหว่าง 220 – 340 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวของเซลลูโลสยังขึ้นกับอัตราการให้ความร้อนเป็นอย่างมาก นั่นคือเซลลูโลสจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นโดยอุณหภูมิการสลายตัวของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจาก 250 องศาเซลเซียส เป็น 350 องศาเซลเซียส เมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 0.1 เป็น 50 องศาเซลเซียสต่อนาที และขนาดของอนุภาคในช่วงที่ทำการศึกษา (0.25 – 2 มิลลิเมตร) ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการไพโรไลซิส Yaman และคณะ [2] ได้ทำการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลที่มีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส พบว่าผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสประกอบไปด้วย กรดอินทรีย์ อัลกอฮอล์ คีโตน เอสเทอร์ ฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล

กะลาหุ้มเม็ดมะม่วงหิมพานต์ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นปริมาณมากในประเทศอินเดีย [3] ได้รับความสนใจในการนำมาเป็นวัตถุดิบในการไพโรไลซิสเช่นเดียวกัน โดยผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผสมกับน้ำมันดีเซล และยังเป็นแหล่งของสารเคมี เช่น คีโตน กรดอินทรีย์และฟีนอล

Ateş และ คณะ [4] ทำการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสชีวมวล โดยการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ากับสารตั้งต้นในการไพโรไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้าซึ่งมีอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก พบว่าสามารถเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวได้ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา -3-จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหลวที่ได้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารจำพวกฟีนอลิกและอะโรมาติกส์ไฮโดรคาร์บอน

ก่อนหน้านี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการไพโรไลซิสกะลาปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ [5] เพื่อนักกลับสารเคมีมูลค่าสูงพบว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจ โดยสามารถนำกลับสารเคมีจำพวก คีโตน กรดอินทรีย์ แอลกอฮอล์ และ ฟีนอล ได้เป็นปริมาณมาก (ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับกะลาปาล์มเริ่มต้น) ในรูปของน้ำมันชีวภาพ โดยสภาวะที่ทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุดเมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ คือ อุณหภูมิที่ใช้เท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสเท่ากับ 60 นาที โดยได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลว แก๊สผลิตภัณฑ์ และของแข็งที่เหลือจากการไพโรไลซิส 61, 7 และ 32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยในผลิตภัณฑ์เหลวประกอบไปด้วยสารเคมีมูลค่าสูง ได้แก่ เมทานอล อะซีโตน กรดอะซีติก และฟีนอล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องสำหรับการไพโรไลซิส

Islam และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมันที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 400 – 600 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ fluidized bed พบว่า ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสมีปริมาณ PAH (polycyclic aromatic hydrocarbons) ซึ่งเป็นสารพิษในปริมาณต่ำมาก โดยสภาวะที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวปริมาณสูงสุด คือ อุณหภูมิที่ใช้ไพโรไลซิสเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สพาเท่ากับ 1.26 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มีฟีนอลเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kawser และคณะ [7] ที่ได้รายงานว่องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะมีฟีนอลเป็นองค์ประกอบอยู่สูงถึง 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

การไพโรไลซิสโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ fluidized bed ยังได้ถูกนำมาใช้สำหรับการไพโรไลซิส rape seed [8] อีกด้วย โดยมีกำลังการผลิต 50 – 100 กรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิที่ทำการไพโรไลซิสอยู่ในช่วง 500 – 700 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสในช่วงอุณหภูมิ 500 – 600 องศาเซลเซียส ประกอบด้วยกรดไขมันและอนุพันธ์ของกรดไขมัน เป็นองค์ประกอบหลัก และเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ไพโรไลซิสสูงขึ้น (700 องศาเซลเซียส) จะได้แก๊สและสารประกอบอะโรมาติกส์เป็นองค์ประกอบหลัก

Butt [9] ศึกษาอิทธิพลของขนาดและปริมาณของวัสดุที่ใช้บรรจุภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำหน้าทีเป็น fluidized bed ต่อการผลิตฟีนอลจากการไพโรไลซิส Radiata pine โดยเครื่องปฏิกรณ์แบบ fluidized bed ที่ใช้จะบรรจุ SiO_2 และ KAl_3O_8 ปริมาณเล็กน้อย ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณฟีนอลที่ผลิตได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณวัสดุและขนาดของวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเบด โดยได้ปริมาณฟีนอลสูงสุดภายใต้สภาวะทำการทดลองที่อุณหภูมิ 290 – 295 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ SiO_2 ที่มีอนุภาคขนาด 310 – 500 ไมโครเมตร ปริมาณ 200 กรัม

Lede และ คณะ [10-11] ทำการไพโรไลซิสขี้เลื่อย แบบต่อเนื่อง ในเครื่องปฏิกรณ์ไซโคลน (cyclone reactor) ซึ่งให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าที่ผนังเครื่องปฏิกรณ์โดยสามารถทำความร้อนได้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 620 – 1057 องศาเซลเซียส และสามารถบ้อนวัตต์ติดต่อกับอัตราเร็วสูงถึง 1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพอยู่ระหว่าง 627 – 710 องศาเซลเซียส สามารถผลิตน้ำมันชีวภาพได้ปริมาณสูงถึงร้อยละ 74 โดยน้ำหนัก โดยประกอบไปด้วย heavy oil, light oil และ aerosols (ร้อยละ 20.5, 37.4 และ 42 โดยน้ำหนักน้ำมันชีวภาพ)

การทดลอง

3.1 สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้

3.1.1 การไฟโวลซิส

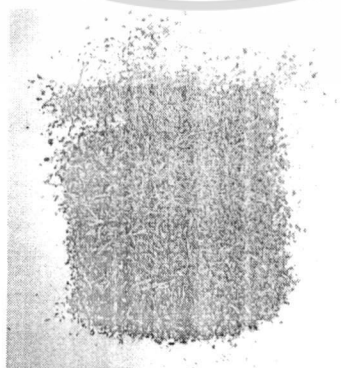
- แก๊สไนโตรเจน
- กะลาปาล์มที่ผ่านการบดและคัดขนาด
- น้ำแข็ง
- เครื่องบดแบบโม่มีดตัด
- ตะแกรงร่อนคัดขนาด
- เต้าเผาไฟฟ้า
- เครื่องชั่งทศนิยม 5 ตำแหน่ง

3.1.2 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ

- แก๊สฮีเลียม (carrier gas)
- แก๊สไฮโดรเจน
- อากาศอัด
- เอทานอล (internal standard)
- เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟที่มีตัวตรวจวัดแบบ FID (Shimadzu GC-17A)
- อินทิเกรเตอร์สำหรับวิเคราะห์สัญญาณจาก GC-17A

3.2 การเตรียมวัตถุดิบ

กะลาปาล์มที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (จากโรงงานหีบน้ำมันปาล์มแห่งหนึ่งในจังหวัดกระบี่) ถูกนำมาตากแดดให้แห้ง ก่อนนำไปบดด้วยเครื่องบดแบบโม่มีดตัด (grinding) จากนั้นจึงนำส่วนที่บดได้ไปคัดขนาดให้อนุภาคกะลามีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.8 - 1.5 มม. (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 กะลาปาล์มที่ผ่านการบดและคัดขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เครื่องไฟโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

เครื่องไฟโรไลซิสแบบต่อเนื่องที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีส่วนประกอบ 4 ส่วนหลักด้วยกัน ดังแสดงในแผนภูมิรูปที่ 2 (ก) คือ 1) ส่วนป้อนวัตถุดิบ, 2) เครื่องปฏิกรณ์, 3) ส่วนดึงผลิตภัณฑ์ของแข็ง และ 4) หน่วยควบคุมอุณหภูมิเหลว ซึ่งจะได้อธิบายในรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ส่วนป้อนวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้จะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์โดยใช้สกรู (screw feeder) ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (ขนาดความเร็วสูงสุด 110 รอบต่อนาที, กระแสไฟฟ้า 12 VDC) ที่สามารถปรับค่ากระแสไฟฟ้าป้อนเข้าได้ เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วในการป้อนวัตถุดิบ

2) เครื่องปฏิกรณ์

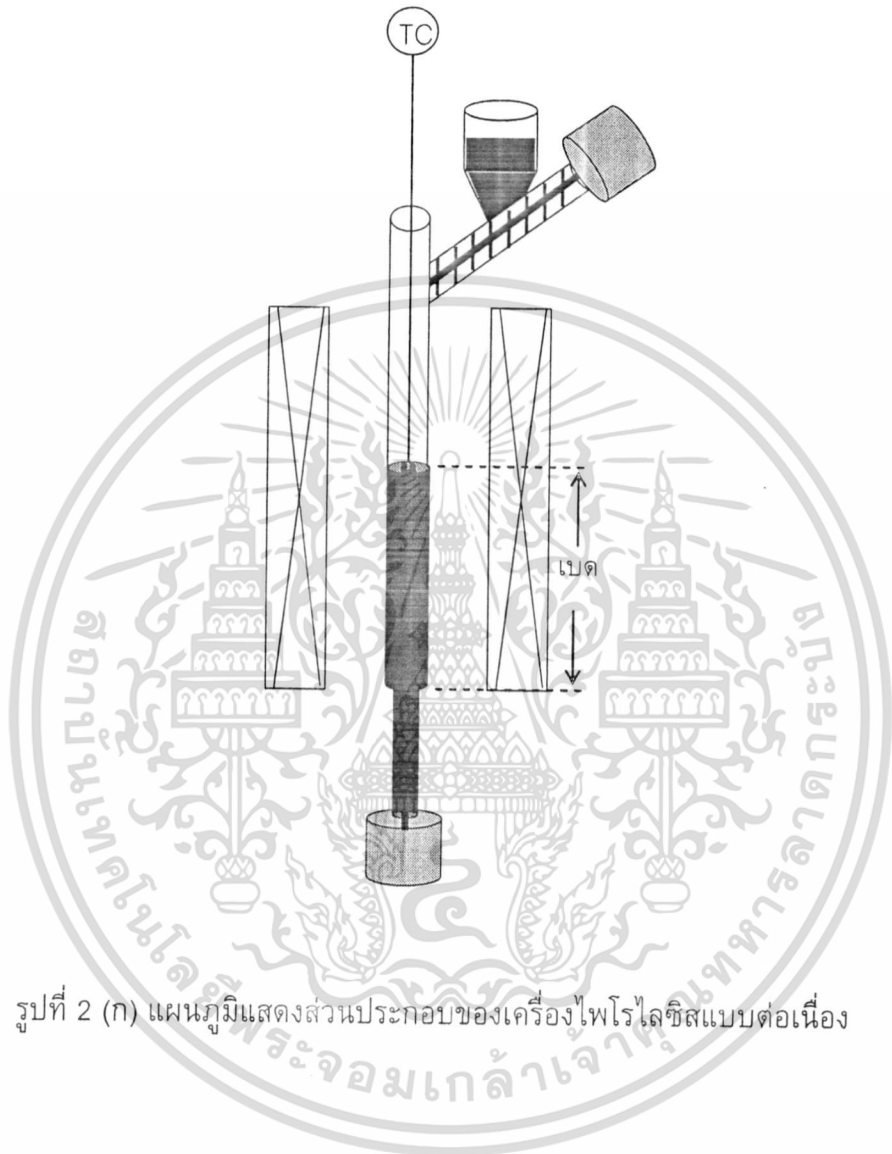
เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ทำจากแก้วควอทซ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 2.5 ซม. และยาว 40 ซม. ติดตั้งอยู่ในเตาเผาแบบใช้ไฟฟ้า (electrical furnace) ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID และเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

3) ส่วนดึงผลิตภัณฑ์ของแข็ง

ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ผ่านการไฟโรไลซิสแล้ว (char) จะถูกดึงออกจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้สกรูที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (ขนาดความเร็วสูงสุด 110 รอบต่อนาที, กระแสไฟฟ้า 12 VDC) ที่สามารถปรับค่ากระแสไฟฟ้าป้อนเข้าได้ เพื่อควบคุมความเร็วในการดึงสารออก

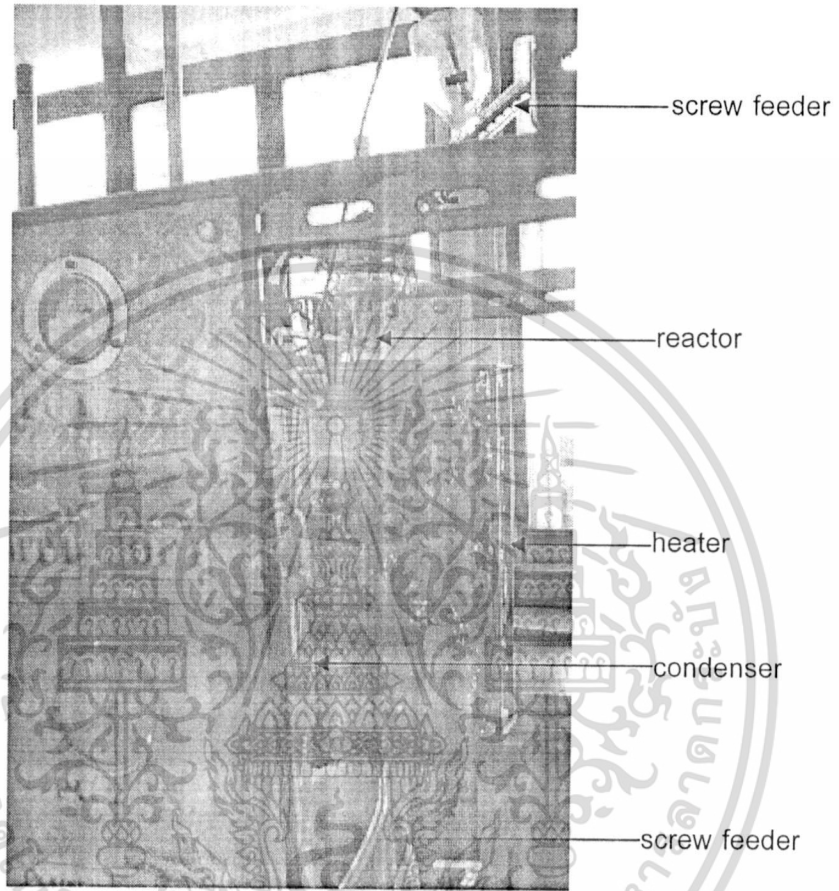
4) หน่วยควบคุมอุณหภูมิเหลว

ไอของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฟโรไลซิสจะถูกดึงออกจากเครื่องปฏิกรณ์ด้วยปั๊มสุญญากาศ โดยปล่อยให้เคลื่อนที่ผ่านคอนเดนเซอร์ที่ทำจากแก้ว pyrex ยาวประมาณ 40 ซม. ที่มีน้ำเย็น (อุณหภูมิประมาณ 5 องศาเซลเซียส) หล่อเย็นอยู่ เมื่อผ่านออกจากคอนเดนเซอร์แล้วของเหลวที่ควบแน่นจะถูกดักไว้ในแทรปที่มีอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2 (ก) แผนภูมิแสดงส่วนประกอบของเครื่องไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 (ข) เครื่องไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรปฏิบัติการได้แก่ อุณหภูมิ และ อัตราการป้อนสารตั้งต้น ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องไพโรไลซิส ทำโดยบรรจุอะลาปาล์มที่อบและคัตขนาดแล้วลงในถังพักวัตถุดิบที่ติดตั้งอยู่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ ทำการป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์พร้อมทั้งตั้งค่าอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า และเปิดปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) รอนอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าตามที่ต้องการ จากนั้นจึงป้อนวัตถุดิบที่อยู่ในถังพักเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วย screw feeder ที่สามารถกำหนดรอบการหมุน (อัตราการป้อน) ได้ตามต้องการ เมื่อสารตั้งต้นเคลื่อนที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แล้วสารตั้งต้นดังกล่าวจะถูกไพโรไลซิสที่อุณหภูมิตามที่กำหนดภายในเครื่องปฏิกรณ์ ได้เป็นไอของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะถูกพาออกจากเครื่องปฏิกรณ์ด้วยแก๊สไนโตรเจนและผ่านเข้าสู่ชุดควบแน่น เพื่อให้แก๊สผลิตภัณฑ์กลายเป็นผลิตภัณฑ์เหลว สำหรับของแข็งที่เหลือจากการไพโรไลซิสจะถูกดึงออกจากเครื่องปฏิกรณ์ด้วยสกรูอย่างต่อเนื่อง

3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

เมื่ออะลาปาล์มถูกนำไปไพโรไลซิสแล้วจะได้เป็นผลิตภัณฑ์ของแข็ง, ของเหลว และแก๊ส ดังนั้นในขั้นต้นจึงจะทำการคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดก่อน น้ำหนักผลิตภัณฑ์ของแข็งและของเหลวได้จากการนำผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นแต่ละส่วนไปชั่งน้ำหนัก ส่วนน้ำหนักผลิตภัณฑ์แก๊สจะได้จากการหักน้ำหนักของของแข็งและของเหลวออกจากน้ำหนักของสารตั้งต้นที่ใช้

ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสในข้อที่ 3.4 (มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3) จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟแบบ MS และทำปริมาณวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครมาโทกราฟแบบ FID โดยใช้เอทานอลเป็นสารมาตรฐาน (internal standard)

เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟที่ใช้จะถูกต่อเข้ากับ capillary column (plot fused silica 25 m×0.25 mm, VARIAN) โดยตั้งโปรแกรมของอุณหภูมิตู้อบเป็น 100-230 องศาเซลเซียส ที่มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา -10- ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิจัย การวิเคราะห์และวิจารณ์ผล

4.1 การออกแบบเครื่องไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องได้มาจากการทดลองการไพโรไลซิสกะลาปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ [5] โดยตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์และกำหนดสมภาวะการทดลองสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องมีดังนี้

1. อัตราการไหลของแก๊สพา

อัตราการไหลของแก๊สพา (แก๊สไนโตรเจน) เป็นตัวแปรที่ใช้กำหนดเวลาที่แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์และใช้ในการกำหนดขนาดเครื่องปฏิกรณ์ โดยอัตราการไหลของแก๊สพาที่เหมาะสมคือ 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ซึ่งจะทำให้แก๊สผลิตภัณฑ์มีเวลาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นาน 20 วินาที ก่อนที่จะถูกพาออกจากเครื่องปฏิกรณ์เข้าสู่ชุดควบแน่น

2. เวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส

เวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสมีผลต่อความสมบูรณ์ของการเกิดไพโรไลซิส โดยถ้าเวลาที่ใช้สั้นเกินไปจะทำให้การไพโรไลซิสเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวในปริมาณน้อยในขณะเดียวกันจะเหลือของแข็งอยู่ในปริมาณสูงและในทางตรงข้ามถ้าใช้เวลาในการไพโรไลซิสนานเกินไปจะส่งผลให้เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบบางชนิดกลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กและไม่สามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้ทำให้ได้ของเหลวในปริมาณน้อยและแก๊สผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณมากขึ้น

เวลาที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะคือ 1 ชั่วโมง ดังนั้นจึงกำหนดให้วัตถุดิบมีเวลาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 1 ชั่วโมงเป็นเวลามาตรฐานสำหรับการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (คิดเป็นอัตราการป้อนวัตถุดิบเท่ากับ 15 กรัมต่อชั่วโมง)

3. อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส

อุณหภูมิถือว่าเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดสำหรับกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากเป็นตัวแปรที่ส่งผลทั้งต่อปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยสามารถแบ่งช่วงอุณหภูมิระหว่างการไพโรไลซิสได้เป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 อุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิประมาณ 135 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่เกิดการระเหยของความชื้นในวัตถุดิบ

ช่วงที่ 2 อุณหภูมิ 135 – 400 องศาเซลเซียส สารที่ระเหยได้ประมาณ 75% จะสลายตัวออกจากวัตถุดิบ

ช่วงที่ 3 อุณหภูมิ 400 – 600 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบอย่างสมบูรณ์ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงกว่านี้กระบวนการไพโรไลซิสจะสิ้นสุดลงและมีมีสารระเหยออกมาอีก

อุณหภูมิที่ทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวสูงที่สุดเมื่อทำการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะคือ 500 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงเลือกอุณหภูมิดังกล่าวเป็นอุณหภูมิมาตรฐานสำหรับการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

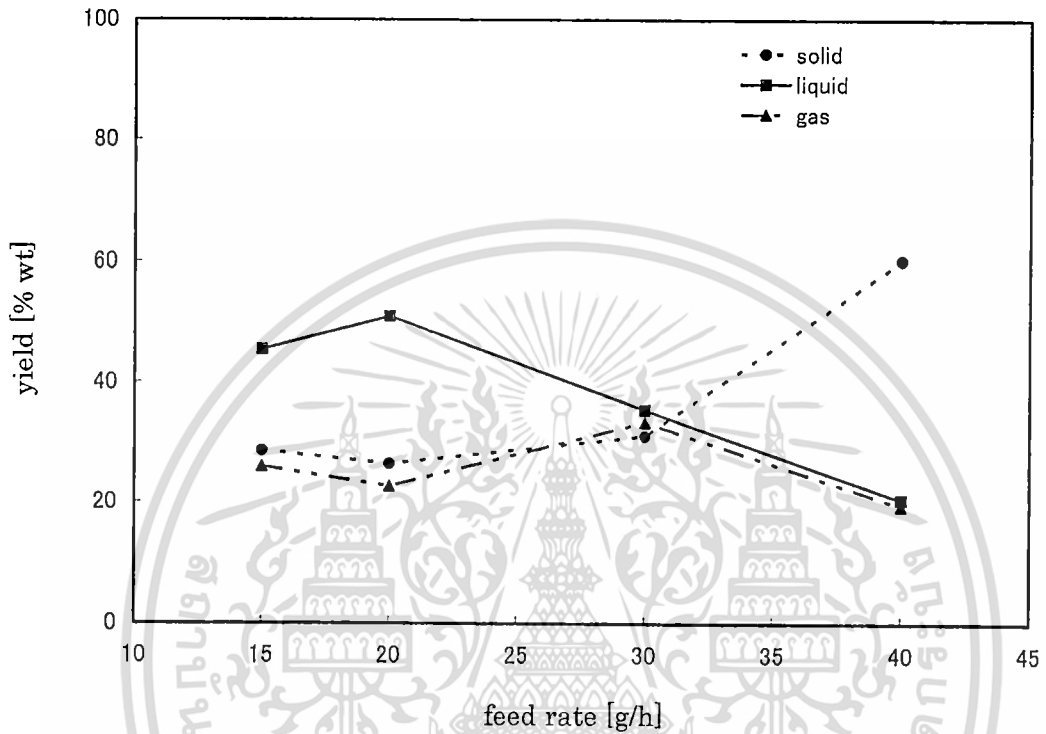
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา -11- ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 อิทธิพลของอัตราการป้อนวัตถุดิบที่มีต่อการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

เนื่องจากคณะผู้วิจัยได้เคยทำการศึกษาการไพโรไลซิสกะลาปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ [5] พบว่าอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการทำไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชนิดดังกล่าว แม้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสเมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องอาจต่างจากอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะก็ตาม แต่ในงานวิจัยนี้ก็จะเลือกใช้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะมาตรฐานเพื่อศึกษาการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

รูปที่ 4 แสดงปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เมื่ออัตราการป้อนวัตถุดิบมีค่า 15, 20, 30 และ 40 กรัมต่อชั่วโมง (จากอัตราการป้อนวัตถุดิบดังกล่าวจะทำให้กะลาปาล์มมีเวลาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 60, 45, 33 และ 20 นาที ตามลำดับ) ผลการทดลองในกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการป้อนสารเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ (ช่วงอัตราการป้อนวัตถุดิบ ≥ 20 กรัมต่อชั่วโมง) จะทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้น้อยลง ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้ปริมาณของแข็งที่เหลือจากการไพโรไลซิสมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายแนวโน้มดังกล่าวได้ว่าอัตราการป้อนสารตั้งต้นที่เร็วขึ้นทำให้สารตั้งต้นมีเวลาในการได้รับความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ (หรือเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส) สั้นลง กะลาปาล์มจึงถูกดึงออกจากเครื่องปฏิกรณ์ก่อนที่โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จะสลายตัวได้อย่างสมบูรณ์ แต่เมื่อพิจารณาในช่วงอัตราการป้อนวัตถุดิบ ≤ 20 กรัมต่อชั่วโมง พบว่าการลดอัตราการป้อนวัตถุดิบทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้น้อยลง ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น จึงสามารถอธิบายแนวโน้มดังกล่าวได้ว่าเมื่ออัตราการป้อนวัตถุดิบมีค่าต่ำกว่า ≤ 20 กรัมต่อชั่วโมง ทำให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวขั้นที่ 2 (secondary decomposition) ขององค์ประกอบบางชนิดในผลิตภัณฑ์เหลวมีค่ามากขึ้น จึงทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายที่เป็นแก๊สที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก

ผลการทดลองในรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าอัตราการป้อนวัตถุดิบที่เหมาะสมของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เมื่อปฏิบัติงานที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส คือ 20 กรัมต่อชั่วโมง ซึ่งทำให้สามารถผลิตน้ำมันไพโรไลซิสได้ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของกะลาปาล์มที่ใช้เป็นสารตั้งต้น

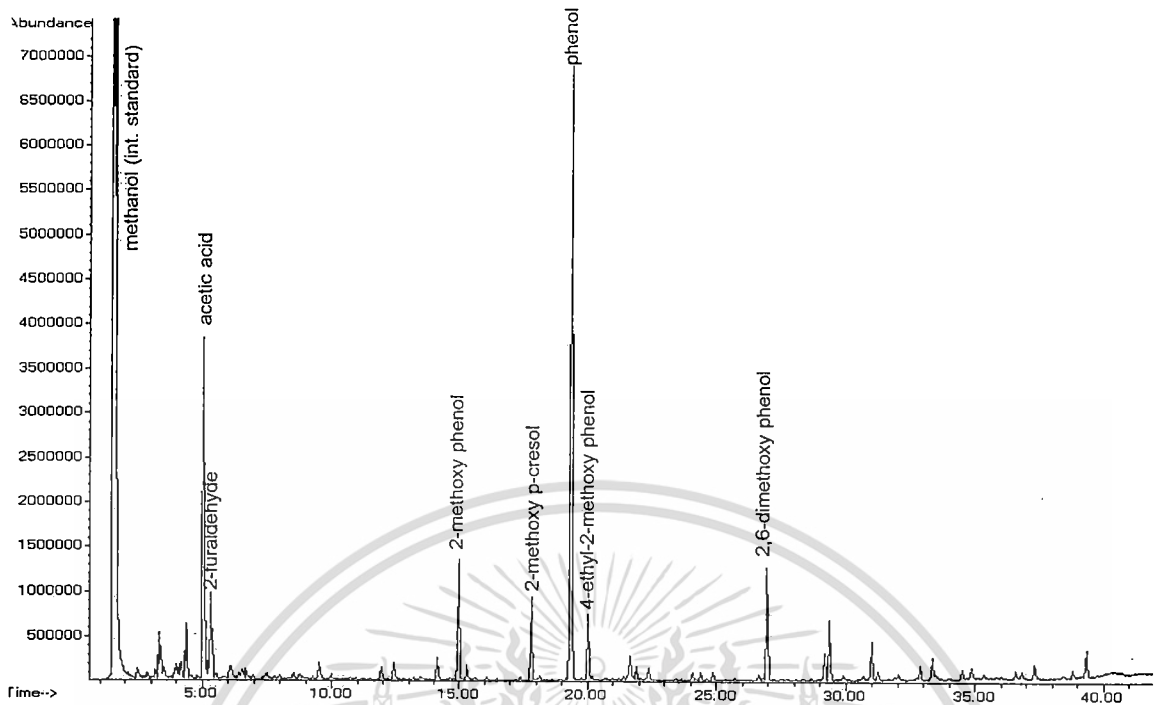


รูปที่ 4 อิทธิพลของอัตราการป้อนกะลาปาล์มต่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้
(ขนาดกะลาปาล์ม 0.8 – 1.5 mm., อุณหภูมิ 500 °C)

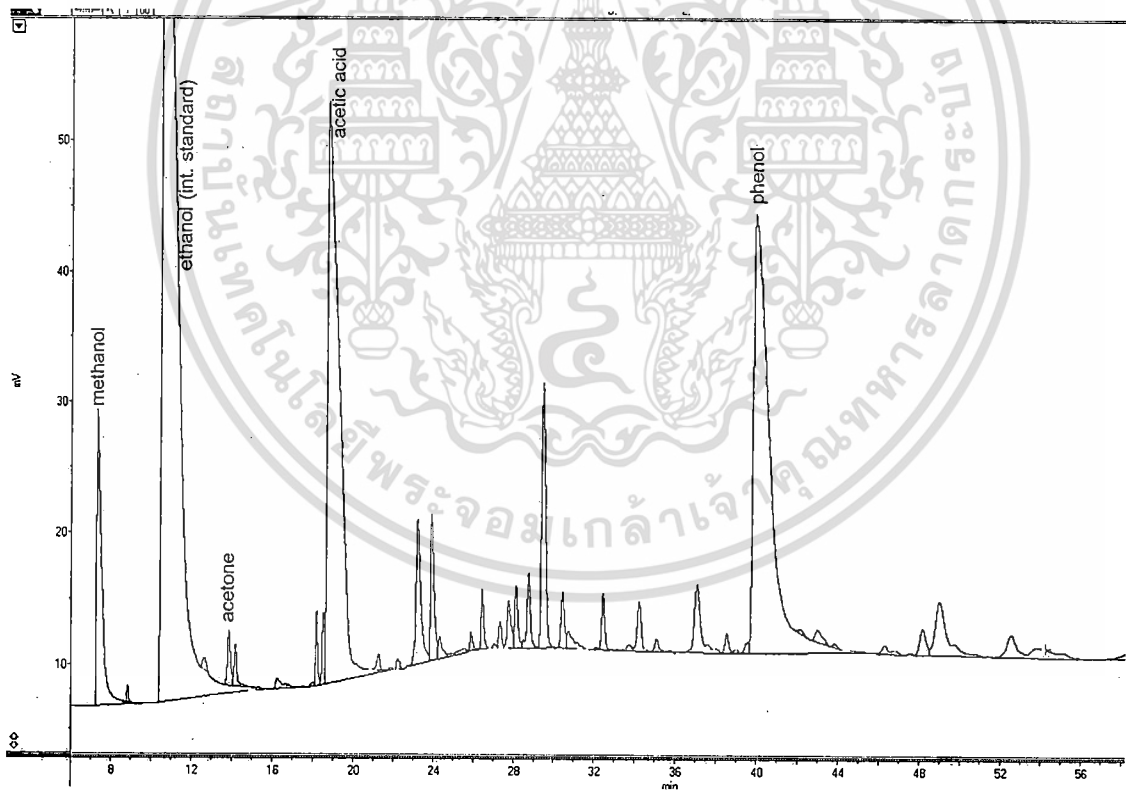
รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างของโครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เหลวด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟแบบ MS และ FID จากการวิเคราะห์พบว่าผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่สภาวะต่างๆ มีองค์ประกอบคล้ายคลึงกัน คือ มีเมทานอล, กรดอะซีติก และฟีนอล เป็นองค์ประกอบหลัก และมีสารประกอบจำพวกอนุพันธ์ของฟีนอล (เช่น 4-ethyl 2-methoxy phenol, 4-methyl 2-methoxy phenol, 2-methoxy phenol, 2,6 dimethoxy phenol ฯลฯ [12]) อีกประมาณ 20 ชนิด

รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของอัตราการป้อนวัตถุดิบที่มีต่อการกระจายองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เหลวจากกราฟจะเห็นว่าในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้มีเมทานอล, ฟีนอล และกรดอะซีติกเป็นปริมาณมากที่สุด โดยมีปริมาณรวมกันทั้งหมดประมาณร้อยละ 60-70 โดยน้ำหนักคาร์บอน ขึ้นกับอัตราการป้อนวัตถุดิบสำหรับสารประกอบจำพวกอนุพันธ์ของฟีนอลแต่ละชนิดมีอยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และสารเหล่านี้จะต้องถูกกำจัดออกหรือเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสารประกอบอื่นที่เสถียรมากขึ้นก่อนนำผลิตภัณฑ์ของเหลวไปใช้ประโยชน์ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ผลการทดลอง งานวิจัยนี้จึงนำปริมาณของสารประกอบจำพวกอนุพันธ์ของฟีนอลมารวมกันและแสดงเป็นส่วนที่เรียกว่า "others" ในรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราการป้อนวัตถุดิบที่มีต่อปริมาณของ "others" พบว่าอัตราการป้อนวัตถุดิบ 30 กรัมต่อชั่วโมงทำให้ได้ปริมาณ "others" น้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4 และรูปที่ 6 ประกอบกันเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสพบว่าควรเลือกใช้อัตราการป้อนวัตถุดิบเท่ากับ 20 กรัมต่อชั่วโมง จึงจะสามารถนำกลับสารเคมีมูลค่าสูง (เมทานอล, ฟีนอล และกรดอะซีติก) ในของเหลวได้ในสัดส่วนที่สูงที่สุดในช่วงที่ทำการศึกษา คือ คิดเป็นประมาณร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก ($0.51 \times (1-0.32)$)



(1)



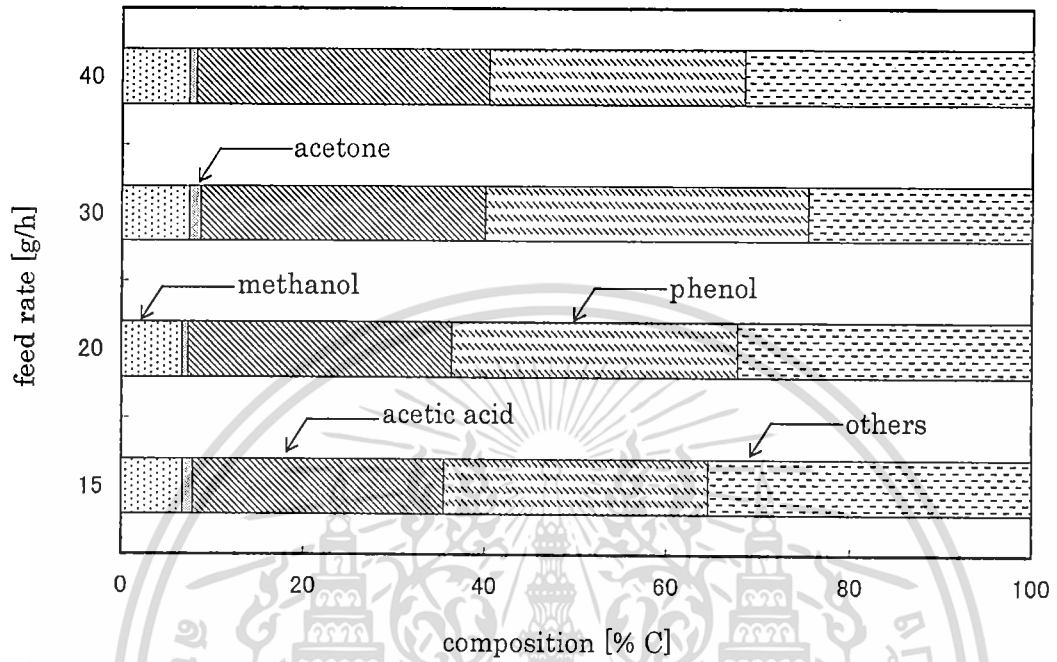
(2)

รูปที่ 5 โครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟแบบ

(1) MS และ (2) FID

(ขนาดท่อเสาปาล์ม 0.8 – 1.5 mm., อุณหภูมิ 500 °C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา -15- ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 อิทธิพลของอัตราการป้อนกะลาปาล์มต่อสัดส่วนองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว (ขนาดกะลาปาล์ม 0.8 – 1.5 mm., อุณหภูมิ 500 °C)

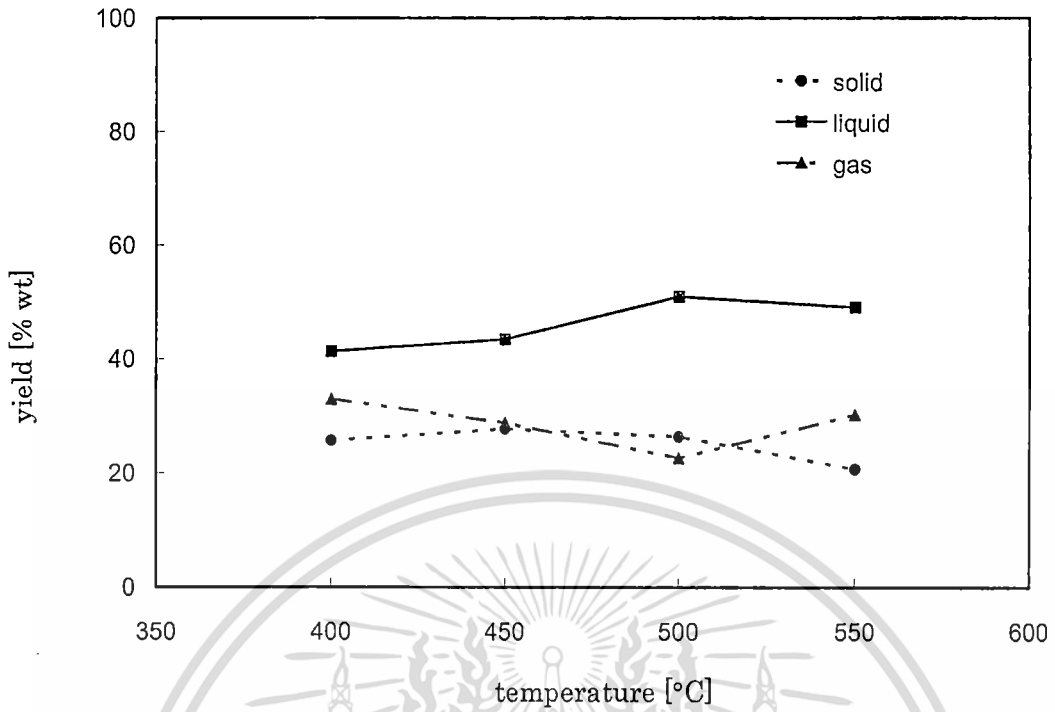
4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการไฟโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพของเครื่องไฟโรไลซิสแบบต่อเนื่องในงานวิจัยนี้ ทำโดยกำหนดให้อัตราการป้อนวัตถุดิบมีค่าคงที่เท่ากับ 20 กรัมต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดเมื่อทำการไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (อ้างอิงจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3) สำหรับอุณหภูมิที่ศึกษาถูกกำหนดให้อยู่ในช่วง 400 – 550 องศาเซลเซียส เนื่องจากช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการไฟโรไลซิสเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวในปริมาณสูง [4,6-7]

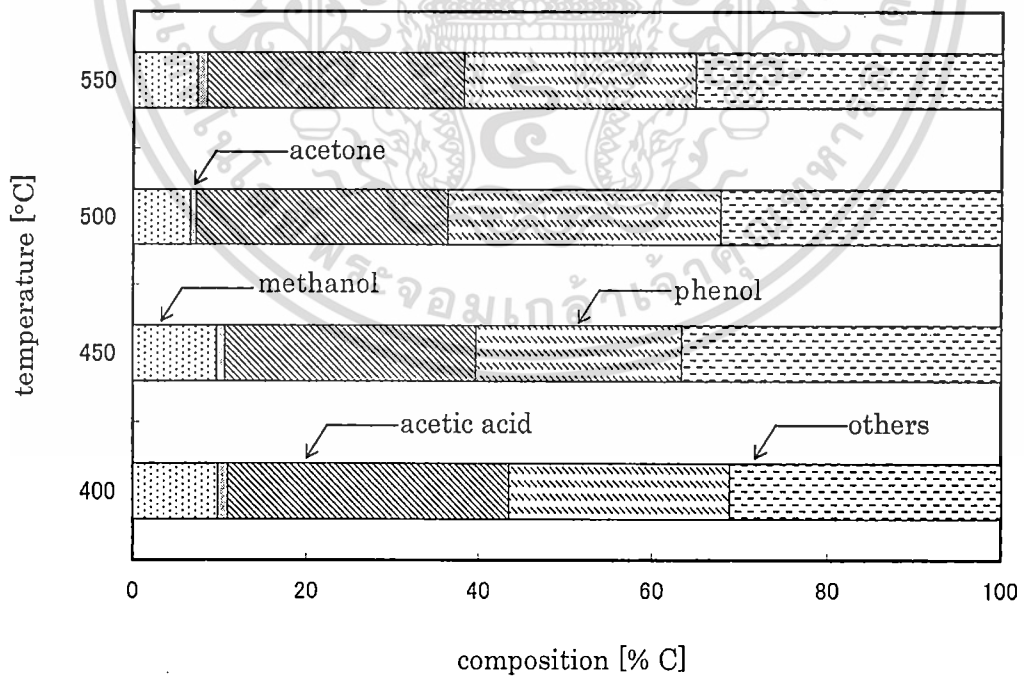
รูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการไฟโรไลซิสเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 400 – 500 องศาเซลเซียส โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 40 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 500 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลวและของแข็งลดลงเล็กน้อย ในขณะที่มีปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายแนวโน้มดังกล่าวได้ว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส สารตั้งต้นที่เป็นของแข็งสามารถเกิดการสลายตัวได้เพิ่มขึ้นและสารประกอบในไอบางชนิดก็สามารถสลายตัวได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดเป็นสารที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กที่ไม่สามารถควบแน่นที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสได้

รูปที่ 8 แสดงสัดส่วนขององค์ประกอบที่มีในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่อุณหภูมิไฟโรไลซิสต่างๆ กัน จะเห็นว่าอุณหภูมิในการไฟโรไลซิสไม่มีผลทำให้องค์ประกอบหลักในผลิตภัณฑ์ของเหลวเปลี่ยนแปลงไป (ทุกสภาวะได้ เมทานอล, อะซีโตน, กรดอะซีติก และฟีนอลเป็นองค์ประกอบหลัก) และมีอิทธิพลต่อปริมาณขององค์ประกอบเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ประกอบกัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไฟโรไลซิส พบว่าควรเลือกใช้อุณหภูมิเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส จึงจะสามารถนำกลับสารเคมีมูลค่าสูง (เมทานอล, ฟีนอล และกรดอะซีติก) ในของเหลวได้ในสัดส่วนที่สูงที่สุดในช่วงที่ทำการศึกษา คือ คิดเป็นประมาณร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก ($0.51 \times (1 - 0.32)$)



รูปที่ 7 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสต่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ขนาดกะลาปาล์ม 0.8 – 1.5 mm., อัตราการป้อนกะลาปาล์ม 20 g/h)



รูปที่ 8 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสต่อสัดส่วนองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว

(ขนาดกะลาปาล์ม 0.8 – 1.5 mm., อัตราการป้อนกะลาปาล์ม 20 g/h)

4.4 ประสิทธิภาพของเครื่องไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องที่ได้เคยรายงานไว้ในงานวิจัยอื่นกับของงานวิจัยนี้ พบว่าเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบในงานวิจัยนี้ (moving bed) สามารถนำกลับผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสกะลาปาล์มได้น้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบ fluidized bed ของ Islam และคณะ (คิดเป็นประมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก) ซึ่งสามารถนำกลับผลิตภัณฑ์ของเหลวได้สูงสุดคิดเป็นร้อยละ 58 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ของแข็งที่เหลือจากการทำไพโรไลซิสมีปริมาณใกล้เคียงกัน (ประมาณร้อยละ 26 โดยน้ำหนัก) อย่างไรก็ตามเครื่องปฏิกรณ์แบบ fluidized bed มีข้อเสียที่สำคัญคือต้องใช้แก๊สเพื่อทำให้เกิด fluidized bed ปริมาณมาก ซึ่งในงานวิจัยของ Islam และคณะ ได้กำหนดให้อัตราการไหลของไนโตรเจนสูงถึง 1.26 m³/h แต่ในงานวิจัยนี้ใช้อัตราการไหลของไนโตรเจนเพียง 0.012 m³/h ซึ่งถือเป็นการประหยัดต้นทุนในการปฏิบัติงานได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้หากต้องการเพิ่มปริมาณการนำกลับของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ให้มากขึ้น ก็สามารถทำได้โดยปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบควบแน่นไอผลิตภัณฑ์ได้อีก

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการนำกลับสารเคมีในผลิตภัณฑ์สำหรับสารตั้งต้นแต่ละชนิด พบว่าชนิดของวัตถุดิบมีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อร้อยละการนำกลับ ดังนั้นหากต้องการนำเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบในงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับวัตถุดิบประเภทอื่นก็ควรทำการทดลองเพื่อหาสภาวะปฏิบัติงานที่เหมาะสมที่สุดก่อนนำไปขยายขนาดต่อไป

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องในงานวิจัยต่าง ๆ

เครื่องปฏิกรณ์	วัตถุดิบ	อุณหภูมิ (°C)	%ผลิตภัณฑ์ (โดยน้ำหนัก)			Ref.
			solid	liquid	gas	
fixed bed	Palm shell	500	29.04	29.99	36.59	[Yang et al., 2006]
Fluidized bed	Palm shell	500	26	58	16	[Islam et al., 1999]
Fluidized bed	white oak	450	20	55	25	[Park et al., 2009]
Fluidized bed	Sawdust	450	30	65	5	[Heo et al., 2009]
Fluidized bed	Washed EFB	500	10.76	72.36	14.7	[Abdullah et al.,2008]
Fluidized bed	Unwashed EFB	500	24.52	49.8	22.31	[Abdullah et al.,2008]
Cyclone	Sawdust	627	10	74	16	[Lede et al.,2007]
Moving bed	Palm shell	500	26.39	50.97	22.64	This work

สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบเครื่องไฟโรไลซิสที่ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และมีประสิทธิภาพในการนำกลับสารเคมีมูลค่าสูงในสถานะของเหลวได้ใกล้เคียงกับการนำกลับด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะซึ่งทำงานที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด (optimum condition) จึงทำให้ประหยัดเวลาในการไฟโรไลซิสโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการกำลังการผลิตสูงและต่อเนื่องในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นหากนำรูปแบบของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ไปขยายขนาดก็จะสามารถพัฒนาให้ใช้งานในระดับอุตสาหกรรมได้โดยง่าย

จากการศึกษาพบว่าตัวแปรปฏิบัติงานทั้งอัตราการป้อนวัตถุดิบและอุณหภูมิในการไฟโรไลซิสมีผลต่อประสิทธิภาพในการไฟโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องทำให้ปริมาณการนำกลับสารเคมีมูลค่าสูงในผลิตภัณฑ์ของเหลวแตกต่างกัน

สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปฏิบัติงานด้วยเครื่องไฟโรไลซิสแบบต่อเนื่องที่ออกแบบขึ้นเพื่อให้ได้สารเคมีในผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุด คือ กำหนดให้อัตราการป้อนวัตถุดิบเท่ากับ 20 กรัมต่อชั่วโมง และอุณหภูมิในการไฟโรไลซิสเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะดังกล่าวจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่มีองค์ประกอบหลัก คือ เมทานอล (6 %C), กรดอะซิติก (29 %C) และฟีนอล (31 %C)

เครื่องไฟโรไลซิสแบบต่อเนื่องที่ออกแบบและสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อไฟโรไลซิสชีวมวลประเภทอื่นได้ แต่อาจจำเป็นต้องทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการปฏิบัติงานเมื่อใช้วัตถุดิบที่เป็นชีวมวลต่างชนิดกัน

หากต้องการเพิ่มปริมาณการนำกลับสารผลิตภัณฑ์เหลวอาจทำได้โดยการปรับปรุงหน่วยควบแน่นให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] H.Yang, R. Yan, T. Chin, D.T. Liang, H. Chen and C. Zheng, Thermogravimetric Analysis-Fourier Transform Infrared Analysis of Palm Oil Waste Pyrolysis, *Energy & Fuels*, 18, 2004, 1814 – 1821.
- [2] S. Yaman, Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks, *Energy Conversion and Management*, 45, 2004, 651 – 671.
- [3] P.Das, T. Sreeelatha and A. Ganesh, Bio oil from pyrolysis of cashew nut shell-characterisation and related properties, *Biomass and Bioenergy*, 27, 2004, 265 – 275.
- [4] F.Ateş, A.E.Pütün and E. Pütün, Pyrolysis of two different biomass samples in a fixed-bed reactor combined with two different catalysts, *Fuel*, 85, 2006, 1851 – 1859.
- [5] เกียรติคุณ ไชยชนะ และ สหพล ชัยอนุรักษ์, กระบวนการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน, ปรินท์ นิตยสารเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549
- [6] F.N. Islam, R. Zailani and F.N. Ani, Pyrolytic oil from fluidised bed pyrolysis of oil palm shell and its characterization, *Renewable energy*, 17, 1999, 73 – 84.
- [7] MD Kawser and F. Nash, Oil Palm Shell as a source of phenol, *Journal of Oil Palm Research*, 45, 2004, 86 – 94.
- [8] M.Predel and W. Kaminsky, Pyrolysis of rape-seed in a fluidized-bed reactor, *Bioresource Technology*, 66, 1998, 113 – 117.
- [9] D.A.E. Butt, Formation of phenols from the low-temperature fast pyrolysis of *Radiata* pine (*Pinus radiata*) Part III. Influence of fluidized bed parameters, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 76, 2006, 55 – 59.
- [10] J. Lede, F. Verzaro, B. Antoine and J. Villiermaux, Flash pyrolysis of wood in a cyclone reactor, *Chemical Engineering and Processing*, 20(6), 1986, 309 - 317.
- [11] J. Lede, F. Broust, F.T. Ndiaye and M. Ferrer, Properties of bio-oils produced by biomass fast pyrolysis in a cyclone reactor, *Fuel*, 86, 2007, 1800 – 1810.

ภาคผนวก

1. อิทธิพลอัตราการป้อนกะลาปาล์มต่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์
(อุณหภูมิเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส)

feed rate (g/h)	Rt of solid (min)	yield (%wt)		
		solid	liquid	gas
15	60	28.60	45.47	25.93
20	45	26.39	50.97	22.64
30	33	31.13	35.45	33.42
40	20	60.17	20.43	19.41

2. อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสต่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์
(อัตราการป้อนกะลาปาล์ม 20 กรัมต่อชั่วโมง)

Temperature (°C)	yield (%wt)		
	solid	liquid	gas
400	25.73	41.33	32.94
450	27.75	43.46	28.79
500	26.39	50.97	22.64
550	20.70	49.09	30.21

3. สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (%C) ที่เกิดขึ้นเมื่ออัตราการป้อนกะลาปาล์มมีค่าต่างๆ (อุณหภูมิไพโรไลซิส = 500°C)

component	feed rate (g/h)			
	40	30	20	15
Methanol	7.36	7.43	6.63	6.70
Acetone	0.79	1.23	0.69	1.16
Acetic acid	32.16	31.29	29.01	27.63
Phenol	28.07	35.44	31.42	29.03
Others	31.63	24.61	32.26	35.48

4. สัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิส มีค่าต่างๆ (อัตราการป้อนกะลาปาล์ม 20 กรัมต่อชั่วโมง)

Component	Temperature (°C)			
	400	450	500	550
Methanol	9.79	9.63	6.63	7.39
Acetone	1.15	0.98	0.69	1.12
Acetic acid	32.55	29.01	29.01	29.60
Phenol	25.32	23.71	31.42	26.71
Others	31.20	36.68	32.26	35.18