

การผลิตน้ำมันชีวภาพโดยการทำให้กะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลวในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต



นางสาวจิราพัชร คำพิเดช

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PRODUCTION OF BIO-OILS BY LIQUEFACTION OF PALM OIL SHELL IN  
SUPERCRITICAL ETHANOL

Miss Chiraphat Kumpidet

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตน้ำมันชีวภาพโดยการทำให้กะลาปาล์มน้ำมันเป็น  
ของเหลวในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต

โดย

นางสาวจิราพัชร คำพิเศษ


สาขาวิชา

เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

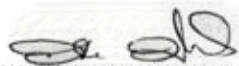
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



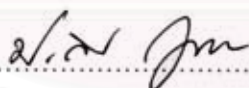
..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานนท์)



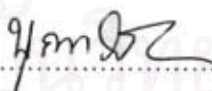
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูขูลธารา)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. บุญญาวัฒน์ อยู่สุข)

สภาบัณฑิตศึกษา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จิราพัชร คำพิเศษ : การผลิตน้ำมันชีวภาพโดยการทำให้กะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลวในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต. (PRODUCTION OF BIO-OILS BY LIQUEFACTION OF PALM OIL SHELL IN SUPERCRITICAL ETHANOL) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ.ดร.ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ, 79 หน้า.

การทำกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลวในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ขนาดความจุ 250 มิลลิลิตร เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพ การทดลองทำให้เป็นของเหลวได้ตรวจสอบผลของอุณหภูมิ ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น เวลา ชนิดของตัวทำละลาย และร้อยละของน้ำในเอทานอลต่อการเปลี่ยนกะลาปาล์มน้ำมัน ผลได้ของเหลวและองค์ประกอบของของเหลว ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาไฮดรอกซิล(II)ซัลไฟด์ ไฮดรอกซิล(II)ซัลเฟต ไฮดรอกซิล(III) ซัลไฟด์บนถ่านกัมมันต์ และแคลเซียมออกไซด์ สำหรับการทำให้เป็นของเหลวโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที และสัดส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มน้ำมันเท่ากับ 7.5 และได้ผลได้ของเหลวสูงสุดถึงร้อยละ 52.6 (daf) สำหรับการทำให้เป็นของเหลวโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาไฮดรอกซิล(II)ซัลไฟด์ และแคลเซียมออกไซด์ ที่สภาวะเดียวกัน ให้ผลได้ของเหลวถึงร้อยละ 57.7 (daf) และ 63.6 (daf) ตามลำดับ ซึ่งประกอบด้วย สารประกอบฟีนอลร้อยละ 41.6 เอสเทอร์ร้อยละ 27.3 อีเทอร์ร้อยละ 10.3 และแอลกอฮอล์ร้อยละ 5.4 สำหรับการวิเคราะห์ด้วย GC-MS ฟีนอลเป็นองค์ประกอบหลักในผลได้ของเหลว

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....จิราพัชร คำพิเศษ  
สาขาวิชา.....เทคโนโลยีเชื้อเพลิง.....ลายมือชื่อที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์.....  
ปีการศึกษา.....2551.....

## 5072330323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORDS: Liquefaction / Supercritical ethanol / Palm oil shell

CHIRAPHAT KUMPIDET : PRODUCTION OF BIO-OILS BY LIQUEFACTION OF  
PALM OIL SHELL IN SUPERCRITICAL ETHANOL. ADVISOR : PROF.  
PATTARAPAN PRASASSARAKICH, Ph.D., 79 pp.

The liquefaction of palm oil shells in supercritical ethanol was performed in a 250 mL batch reactor to evaluate the optimum condition for bio-oil production. Liquefaction experiments were carried out to investigate the effects of temperature, initial hydrogen pressure, time, solvent type and percentages water in ethanol on palm oil shell conversion, liquid yield and liquid composition. The effect of catalysts FeS, FeSO<sub>4</sub>, activated carbon supported Fe<sub>2</sub>S<sub>3</sub> and CaO was also studied. For non-catalytic liquefaction, the optimum condition was temperature of 320°C, initial hydrogen pressure of 4.13 MPa, time of 40 min and ethanol/palm oil shell ratio of 7.5 and the liquid yield reached maximum at 52.6 wt% (daf). For catalytic liquefaction the presence of FeS and CaO catalyst at the same condition the liquid yield reached 57.7 wt% (daf) and 63.6 wt% (daf) respectively which included phenolic compounds 41.6 wt% ester 27.3 wt% ether 10.3 wt% and alcohol 5.4 wt% (GC-MS). For GC-MS analysis, phenol was main component in liquid yield.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department:..... Chemical Technology.. Student's Signature:..... จิราพัชร์ คำพิเชษฐ์ .....

Field of Study:..... Fuel Technology..... Advisor's Signature:..... Prof. P. Pr. .....

Academic Year:.....2008 .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ อาจารย์ที่  
ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำการทำวิจัย ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อ  
ปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ยิ่ง รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านใน  
ภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำ

งานวิจัยเรื่อง “การผลิตน้ำมันชีวภาพโดยการทำให้กะลาปาล์มน้ำมันเป็น  
ของเหลวในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัย  
เชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์ความเป็นเลิศ  
แห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง (National Center of Excellence for  
Petroleum, Petrochemicals and Advance Materials) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุน  
ทุนวิจัยตลอดการศึกษา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการ  
สอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.  
บุญญาวัดณ์ อยู่สุข กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ  
ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้  
มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ นางสาวนงนัท ดวงดี และกรมวิทยาศาสตร์บริการ เป็นอย่างสูง  
ในการอนุเคราะห์ให้การสนับสนุนและให้ความสะดวกในการทำงาน รวมถึงอุปกรณ์ เครื่องมือใน  
การวิเคราะห์ ตลอดจนงานวิจัยนี้ รวมถึงคำแนะนำ และข้อคิดดีๆที่เป็นประโยชน์ในการทำงาน และ  
ขอขอบคุณนางสาวเมธาวิ พุทธิภาพย์ ในความช่วยเหลือ ที่มีมาโดยตลอด จนทำให้งานวิจัยนี้  
สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้กรุณาอำนวยความสะดวก  
ในการใช้ห้องปฏิบัติการและช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ  
ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์  
ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ  
และให้คำสั่งสอน คำแนะนำ และการสนับสนุนด้านต่างๆ เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ชีวมวล.....	4
2.2 องค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวล.....	7
2.3 ส่วนประกอบของชีวมวล.....	8
2.4 กระบวนการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงาน.....	11
2.5 การใช้พลังงานชีวมวล.....	14
2.6 ปาล์มน้ำมัน.....	16
2.7 กะลาปาล์ม.....	18
2.8 ของไหลภาวะเหนือวิกฤต.....	19
2.9 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	21
2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	26
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	26
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	27

บทที่		
3.3	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	28
4	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	33
4.1	การวิเคราะห์สมบัติของกะลาปาล์มเริ่มต้น.....	33
4.2	กระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มให้เป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือ วิกฤตโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	34
4.3	การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย GC/MS.....	52
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	62
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	62
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	63
	รายการอ้างอิง.....	64
	ภาคผนวก.....	67
	ภาคผนวก ก.....	68
	ภาคผนวก ข.....	69
	ภาคผนวก ค.....	72
	ภาคผนวก ง.....	78
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	81

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า	
2.1	สัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิต ทางการเกษตรเป็นชีวมวล.....	5
2.2	สมบัติทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิด.....	9
3.1	คุณหมุมิวิฤต และความดันวิฤตของตัวทำละลายภาวะเหนือวิฤต.....	28
4.1	ผลการวิเคราะห์สมบัติกะลาปาล์มแบบประมาณและแบบแยกธาตุ.....	33
4.2	ผลของเวลาต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลว.....	36
4.3	ผลของคุณหมุมิต่อการระบวณการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลว.....	38
4.4	ผลของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลว.....	41
4.5	ผลของอัตราส่วนเอทานอลกับกะลาปาล์มต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลว.....	42
4.6	ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลว.....	44
4.7	ผลของความเข้มข้นเอทานอลต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลว.....	48
4.8	ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลว.....	51
4.9	ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เหลวที่วิเคราะห์ด้วย GC/MS	53
4.10	ผลของชนิดตัวทำละลายต่อองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เหลวที่วิเคราะห์ด้วย GC/MS .....	54
4.11	ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแปรรูปกะลาปาล์ม.....	56
4.12	ผลของตัวทำละลายต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแปรรูปกะลาปาล์ม.....	57
4.13	องค์ประกอบในตัวทำละลายที่ใช้แล้วที่วิเคราะห์ด้วย GC/MS.....	60
4.14	การวิเคราะห์ GC/MS จากตัวทำละลายที่ผ่านการใช้ในการแปรรูปกะลาปาล์ม....	61

ภาพประกอบ	หน้า	
2.1	วิจัยักรคาร์บอน.....	4
2.2	โครงสร้างของเซลล์ลูไลส.....	7
2.3	โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน.....	8
2.4	ปาล์มน้ำมันและส่วนประกอบของผลปาล์มน้ำมัน.....	17
2.5	กะลาปาล์มน้ำมัน.....	18
2.6	กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม.....	19
2.7	เฟสไดอะแกรมของของไหลภาวะเหนือวิกฤต.....	20
3.1	เครื่องปฏิกรณ์ Parr Reactor Model 4842 .....	26
4.1	ผลของเวลาต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลว: ก) ร้อยละผลได้ของน้ำมัน ข) ร้อยละการเปลี่ยนกะลาปาล์ม: อุณหภูมิ 230, 260 และ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์ม เท่ากับ 7.5 .....	35
4.2	ผลของอุณหภูมิต่อการร้อยผลได้การแปรรูปกะลาปาล์ม ภาวะการทดลอง: ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 (ในวงเล็บ คือ ร้อยละการเปลี่ยน) .....	38
4.3	ผลของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อการร้อยผลได้การแปรรูปกะลาปาล์ม ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 230 และ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 (ในวงเล็บ คือ ร้อยละการเปลี่ยน) .....	40
4.4	ผลของอัตราส่วนของเอทานอลต่อกะลาปาล์มที่มีต่อการร้อยผลได้ของการแปรรูปกะลาปาล์ม ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที (ในวงเล็บ คือ ร้อยละการเปลี่ยน).....	42
4.5	ผลของชนิดตัวทำละลายต่อกะลาปาล์มที่มีต่อการร้อยผลได้ของการแปรรูปกะลาปาล์ม ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เวลา 40 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 (ในวงเล็บ คือ ร้อยละการเปลี่ยน).....	44

4.6	ผลของความเข้มข้นเอทานอลต่อร้อยละผลได้ของการแปรรูปกะลาปาล์ม ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 (ในวงเล็บ คือ ร้อยละการเปลี่ยน) .....	47
4.7	ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของการแปรรูปกะลาปาล์ม ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เวลา 40 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล และอัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 (ในวงเล็บ คือ ร้อยละการเปลี่ยน).....	50
ค1	GC/MS โคโรมาโตแกรมขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว ภาวะการทดลอง: ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนตัวเอทานอลต่อถ่านหินเท่ากับ 7.5.....	70
ค2	GC/MS โคโรมาโตแกรมขององค์ประกอบ ของผลิตภัณฑ์เหลว ภาวะการทดลอง: ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อถ่านหินเท่ากับ 7.5.....	71
ค3	GC/MS โคโรมาโตแกรมขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว ภาวะการทดลอง: ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อถ่านหินเท่ากับ 7.5 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไอร์ออน (II) ซัลไฟด์.....	72
ค4	GC/MS โคโรมาโตแกรมขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว ภาวะการทดลอง: ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อถ่านหินเท่ากับ 7.5 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์.....	73
ค5	GC/MS โคโรมาโตแกรมขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว ภาวะการทดลอง: ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนสารละลายเอทานอล 95% (ทางการค้า) ต่อถ่านหินเท่ากับ 7.5 ...	74
ค6	GC/MS โคโรมาโตแกรมขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว ภาวะการทดลอง: ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนสารละลายเอทานอล 50% ต่อถ่านหินเท่ากับ 7.5 .....	75
ง1	สูตรโครงสร้างปาล์มน้ำมัน.....	76

ง2	สูตรโครงสร้างน้ำมันปาล์มส่วนเคอร์เนล.....	77
ง3	สูตรโครงสร้างองค์ประกอบหลักของสารใน GC/MS ในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก.....	78
ง4	สูตรโครงสร้างองค์ประกอบหลักของสารใน GC/MS ในกลุ่มเอสเตอร์.....	78
ง5	สูตรโครงสร้างองค์ประกอบหลักของสารใน GC/MS ในกลุ่มแอลกอฮอล์.....	78



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโลกเรามีความต้องการใช้พลังงานสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง กอปรกับปริมาณพลังงานสำรองที่ลดลงอย่างมาก ทำให้เกิดการขาดแคลนพลังงานในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานฟอสซิลที่ถือเป็นแหล่งพลังงานหลักของโลก การใช้พลังงานฟอสซิลนี้เป็นต้นเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เกิดปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณมากซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้นอยู่ ณ ขณะนี้ โลกจึงได้หันมาสนใจพลังงานทดแทน หรือ พลังงานหมุนเวียนกันมากขึ้น ตัวอย่างเช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ ลม น้ำ และพลังงานจากชีวมวล เป็นต้น ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม พลังงานชีวมวลจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีแหล่งพลังงานชีวมวลแหล่งใหญ่ รวมถึงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอีกมากมาย เช่น ฟางข้าว แกลบ กากอ้อย และกะลาปาล์ม เป็นต้น ปกติแล้ววัสดุเหล่านี้จะถูกปล่อยทิ้งให้ย่อยสลายเองตามธรรมชาติ หรือ เผาทำลาย ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดการสูญเสียแหล่งพลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์อีกด้วย

กระบวนการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นของเหลวสามารถทำได้ 2 กระบวนการหลัก คือ กระบวนการ แกซิฟิเคชัน/ฟิสเชอร์-ทรอปช์ (Gasification / Fischer Tropsch) และกระบวนการ ไพโรไลซิส (Pyrolysis) โดย 2 กระบวนการดังกล่าวติดปัญหาสำคัญทั้งทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ ซึ่งกระบวนการ Fischer Tropsch จะมีความคุ้มค่าในกรณีที่มีการสร้างระบบผลิตขนาดใหญ่เท่านั้น ส่วนกระบวนการ Pyrolysis จะประสบปัญหาในเรื่องความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษากระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลให้เป็นของเหลวในภาวะตัวทำละลายเหนือวิกฤต ในภาวะเหนือวิกฤตตัวทำละลายที่ใช้ คือ เอทานอลมีสมบัติที่ไม่สามารถแยกได้ว่าเป็นแก๊สหรือของเหลว โมเลกุลของสารที่ต้องการละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลภาวะเหนือวิกฤตเกิดปฏิสัมพันธ์กันตลอดปี เกิดการละลายได้ดี และขณะเดียวกันของไหลภาวะเหนือวิกฤตก็มีความหนืด และการแพร่กระจายใกล้เคียงกับแก๊ส ทำให้สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างภายในของตัวถูกละลายช่วยในการละลายของสารเพิ่มขึ้น โดยทำการหาภาวะที่เหมาะสมในการเปลี่ยน รวมทั้งศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณและคุณภาพสูงสุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษากระบวนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต
2. ศึกษาผลของเวลา อุณหภูมิ ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น ตัวทำละลาย อัตราส่วนตัวทำละลายต่อชีวมวล และตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของชีวมวล คือ การวิเคราะห์แบบประมาณและแยกธาตุ
2. ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆต่อกระบวนการทำให้เป็นของเหลวภาวะเหนือวิกฤต คือ การแปรรูปกะลาปาล์มและปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว
3. วิเคราะห์ค่าความร้อน องค์ประกอบแบบแยกธาตุของผลิตภัณฑ์ของเหลว รวมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี กับแมสเปกโทมิเตอร์

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ค้นหาเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้องที่มีในอดีตทั้งในและต่างประเทศ
2. เตรียมชีวมวล ได้แก่ กะลาปาล์ม และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง โดยบดชีวมวลให้มีขนาด 250 ไมโครเมตร
3. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาฐานเหล็ก (iron-based catalyst)
4. ศึกษาการทำให้เป็นของเหลวโดยของไหลภาวะเหนือวิกฤต ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อ ค่าการแปรรูปกะลาปาล์ม และผลได้ ผลิตภัณฑ์แก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และกากของแข็ง (ตัวทำละลายเช่น เอทานอล เอทิลอะซิเตตและอะซิโตน อุณหภูมิ 230 - 320 องศาเซลเซียส และความดัน 0 - 4.13 เมกะพาสคัล)
5. วิเคราะห์สมบัติของชีวมวลและกากของแข็ง
  - ค่าความร้อน (Gross Calorific Value)
  - องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis ASTM D 3172-3175) : ความชื้น ใ้ถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว
  - องค์ประกอบแยกธาตุ (Ultimate analysis ASTM D3176) : คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน

6. วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้
  - Gas Chromatography / Mass Spectroscopy (GC / MS)
  - ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว (Calorific Value)
  - องค์ประกอบแยกธาตุ (Ultimate analysis ASTM D3176) :คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน
7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเชื้อเพลิงเหลวและสารตั้งต้นของอุตสาหกรรมปิโตรเคมี
2. ได้กระบวนการแปรรูปชีวมวลที่มีราคาถูกให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีราคาสูงขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล หมายถึง สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ โดยทั่วไปหมายถึงสิ่งมีชีวิตประเภทต้นไม้และพืช เช่น ไม้ยางพารา ต้นข้าวโพด ปาล์ม มันสำปะหลัง และ อ้อย ฯลฯ และเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น ชานอ้อย ชังข้าวโพด เปลือกไม้ยูคาลิปตัส แกลบ กากปาล์ม กากมันสำปะหลัง และกะลามะพร้าว รวมถึงพลังงานที่ได้จากสิ่งปฏิภูลของสัตว์ ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำและเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง ได้เป็นแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่าง ๆ ของพืช การนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงจึงได้พลังงานดังกล่าวออกมา และปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับคืนสู่บรรยากาศ วนเวียนเป็นวัฏจักร ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วัฏจักรคาร์บอน

(ที่มา : <http://www.canadianbiofuel.ca/biomassfuel.html>)



ในพจนานุกรมของราชบัณฑิตยสถานไม่ได้ระบุความหมายชีวมวลไว้ ชีวมวลแปลมาจากศัพท์ภาษาอังกฤษว่า “Biomass” ประกอบด้วยคำสองคำคือ ชีว และมวล ชีวคือสิ่งมีชีวิตเช่นมนุษย์ พืชและสัตว์ มวล คือ วัตถุสิ่งของต่างๆ ดังนั้นชีวมวลหมายถึงวัตถุ หรือสสารที่ได้จากสิ่งมีชีวิตเช่นข้าวสาลี รำ แกลบ และฟางข้าวได้มาจากต้นข้าว และมูลสุกรได้มาจากการเลี้ยงสุกร เป็นต้น พลังงานชีวมวลมีทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลวและก๊าซ และชีวมวลมีอยู่ทั่วไปในประเทศไทย เป็นแหล่งพลังงานราคาถูก การนำชีวมวลมาใช้จึงช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ให้กับคนท้องถิ่น นอกจากนี้การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม จะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะและไม่สร้างสภาวะเรือนกระจก เนื่องจากการปลูกทดแทนทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดการหมุนเวียนและไม่มีการปลดปล่อยเพิ่มเติม

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิต ทางการเกษตรเป็นชีวมวล

ชนิด	ผลผลิต	Crop/residue ratio	Energy content(MJ/kg)
อ้อย	ชานอ้อย	0.25 <sup>2/</sup>	9.25 <sup>2/</sup>
ข้าวเปลือก	แกลบ	0.23	14.27
	ฟางข้าว	0.45	10.24
มันสำปะหลัง	ลำต้นมันสำปะหลัง	0.08	18.42
ปาล์มน้ำมัน	ทะลายปาล์ม	0.43	17.86
	เส้นใยปาล์ม	0.15	17.62
	กะลาปาล์ม	0.05	18.46
มะพร้าว	กาบมะพร้าว	0.36	16.23
	กะลามะพร้าว	0.16	17.93

\*ที่มา : 1/ Biomass Energy in Asia: A Study on Selected Technologies and Policy Options, December 1999 โดย กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน

<sup>2/</sup> สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย

### 2.1.1 แหล่งกำเนิดชีวมวล (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2006)

ชีวมวลที่มาจากพืชนั้นถ้าจะแบ่งตามแหล่งที่มา สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

ประเภทแรก ชีวมวลที่หาได้จากตามการแปรรูปสินค้าทางการเกษตร เช่น

1. แกลบได้จากโรงสีข้าว
2. ปีกไม้ เศษไม้และขี้เลื่อยได้จากโรงเลื่อยไม้ โรงงานเฟอร์นิเจอร์ไม้
3. ไบโพลัม ทะลายเปล่าและกะลาปาล์มได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ
4. ชังข้าวโพดได้จากไซโลเก็บข้าวโพด
5. ชานอ้อยได้จากโรงงานน้ำตาล
6. เปลือกมันสำปะหลังได้จากโรงงานแป้งมัน
7. เปลือกไม้ยูคาลิปตัสได้จากโรงไม้สับเป็นต้น

ชีวมวลประเภทนี้เป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมทั่วไปเนื่องจากรวบรวมได้ง่าย

ประเภทที่สอง ชีวมวลที่หาได้จากตามไร่ สวน และนาข้าว เช่น

8. ฟางข้าวอยู่ในนาข้าว
9. ปลายไม้ และรากไม้หรือตอไม้ยางพาราอยู่ในสวนยางพารา
10. ใบอ้อยและยอดอ้อยอยู่ในไร่อ้อย
11. เหว้งมันสำปะหลังอยู่ในไร่มันสำปะหลัง
12. ทางปาล์มหรือไบโพลัมอยู่ในสวนปาล์มน้ำมัน
13. ชังข้าวโพดได้จากไร่ข้าวโพดเป็นต้น

การนำชีวมวลประเภทนี้มาใช้งานต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บและรวบรวมเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ราคาต่อค่าความร้อนสูงกว่าประเภทแรก จึงถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงในสัดส่วนที่น้อยมาก ดังนั้นสวนใหญ่ถูกเผาทิ้งอยู่ทุกปี

ประเภทที่สาม ชีวมวลที่ปลูกใหม่เพื่อเป็นพลังงานโดยเฉพาะเช่น การปลูกไม้โตเร็วเพื่อนำไม้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า วิธีนี้ยังไม่เป็นที่นิยมในประเทศไทย เพราะ ไม่คุ้มต่อการลงทุน

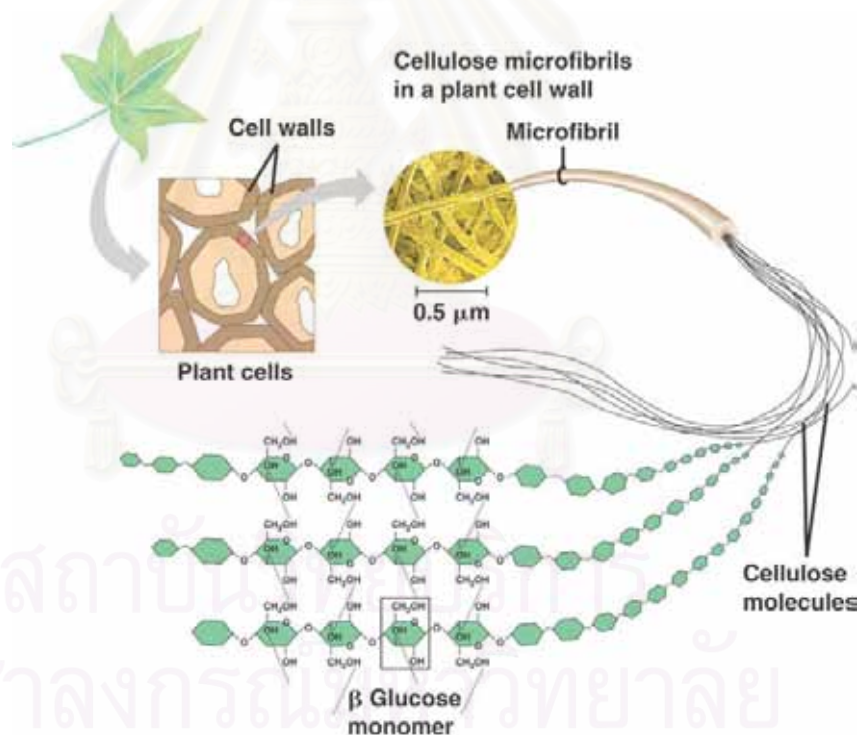
## 2.2 องค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวล

([http://www.rdi.ku.ac.th/kasetresearch52/11-excellence/Oil\\_palm/excellence\\_00.html](http://www.rdi.ku.ac.th/kasetresearch52/11-excellence/Oil_palm/excellence_00.html))

ชีวมวลเป็นวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) 25-50% เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) 20-35% และลิกนิน (Lignin) 18-35% ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่มีน้ำตาลและพอลิเมอร์ของน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเรียกว่า พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides)

### 1. เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นเส้นใยของพอลิแซคคาไรด์ที่เป็นส่วนประกอบหลักในผนังเซลล์ของพืช และเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมากที่สุด เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักในไม้ ปอ และฟาง สมบัติทางเคมีที่สำคัญของเซลลูโลส คือ เป็นตัวที่ไม่ละลายและไม่ทำปฏิกิริยาโดยเฉพาะไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) โครงสร้างของเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเซลลูโลส

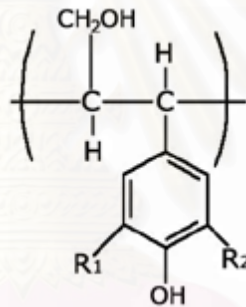
(ที่มา : [learners.in.th/file/dawood/view/83293](http://learners.in.th/file/dawood/view/83293))

## 2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่เกิดขึ้นร่วมกับพวกเซลลูโลส แต่อยู่ในรูป อัดแน่นฐานที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมทางเคมีต่างกับพวกเซลลูโลส คือ สายพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส มีลักษณะเป็นเฮเทอโรจีนัส (Heterogenous) ประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์หลายชนิดปนกัน คือ เพนโตแซน (Pentosan) เฮกโซแซน (Hexosan) และพอลิยูโรนไนด์ (Polyuronides) และเฮมิเซลลูโลสมีมวลโมเลกุลต่ำกว่า จึงละลายได้ดีกว่าเซลลูโลส

## 3. ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในพืช ประกอบด้วยโครงสร้างอะโรแมติกของหน่วยฟีนิลโพรเพนที่เชื่อมต่อกันด้วยคาร์บอนสายตรง (Aliphatic chain) ลิกนินมีคุณลักษณะที่เหมาะสมในการเป็นผนังเซลล์ของพืชที่เป็นเสมือนกาวยึดและเพิ่มความแข็งแรงของเซลล์พืช ลิกนินอยู่ในรูปอัดแน่น และละลายได้ดีกว่าเซลลูโลส สามารถแยกออกจากเนื้อไม้ได้โดยใช้ไอน้ำ ลิกนินมีความต้านทานต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และไม่สามารถถูกย่อยโดยแบคทีเรียโครงสร้างทางเคมีของลิกนินแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน

(ที่มา : <http://bugs.bio.usyd.edu.au/Mycology/Feeding/extracellDigestion.shtml>)

## 2.3 ส่วนประกอบของชีวมวล

ส่วนประกอบของชีวมวลหรือสสารทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ

**ความชื้น (Moisture)** ความชื้นหมายถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ ชีวมวลส่วนมากจะมีความชื้นค่อนข้างสูง เพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการนำชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ ความชื้นไม่ควรเกิน 50 เปอร์เซ็นต์

**ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance)** ส่วนที่เผาไหม้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ Volatile matter และ Fixed Carbon Volatile matter คือส่วนที่ถูกเผาไหม้ได้ง่าย ดังนั้นชีวมวลใดที่มีค่า Volatile matter สูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย

ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ คือเถ้า (Ash) ซึ่งมวลส่วนใหญ่มีเถ้าประมาณ 1 - 3 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นแกลบและฟางข้าว มีสัดส่วนเถ้าประมาณ 10 - 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะมีปัญหาในการเผาไหม้ และกำจัดพอสมควร

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิด

Proximate analysis	แกลบ	ฟางข้าว	ชานอ้อย	ใบอ้อย	ไม้ ยางพารา	ไย ปาล์ม	กะลา ปาล์ม
Moisture, %	12.0	10.0	50.7	9.2	45.0	38.50	12.0
Ash, %	12.7	10.4	1.4	6.1	1.6	4.4	3.5
Volatile Matter, %	56.5	60.7	42.0	67.8	45.7	42.7	68.2
Fixed Carbon, %	18.9	18.9	5.9	16.9	7.7	14.4	16.3
<b>Ultimate Analysis</b>							
Carbon, %	37.5	38.2	21.3	41.6	25.6	30.8	44.4
Hydrogen, %	4.4	5.0	3.1	5.1	3.2	3.7	5.0
Oxygen, %	33.3	35.3	23.3	37.4	24.5	21.6	34.7
Nitrogen, %	0.2	0.6	0.1	0.4	0.1	0.8	0.3
Sulfur, %	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
Chlorine, %	0.1	na	na	0.0	0.0	0.1	0.0
Ash, %	12.7	10.4	1.4	6.1	1.6	4.4	3.5
Moisture, %	12.0	10.0	50.7	9.2	45.0	38.5	12.0
<b>Other Characteristics</b>							
Bulk Density, kg/m <sup>3</sup>	150	125	120	100	450	250	400
Higher heating value, kJ/kg	14,755	13,650	9,243	16,794	10,365	13,127	18,267
Lower heating value, kJ/kg	13,517	12,330	7,368	15,479	8,600	11,400	16,900

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

Proximate analysis	ทะลาย ปาล์ม	ลำต้น ปาล์ม	ทาง ปาล์ม	ซัง ข้าวโพด	ลำต้น ข้าวโพด	เหง้ามัน สำปะหลัง	เปลือกไม้ ยูคา
Moisture, %	58.6	48.4	78.4	40.0	41.7	59.4	60.0
Ash, %	2.0	1.2	0.7	0.9	3.7	1.5	2.4
Volatile Matter, %	30.5	38.7	16.3	45.4	46.5	31.0	28.0
Fixed Carbon, %	8.9	11.7	4.6	13.7	8.1	8.1	9.6
<b>Ultimate Analysis</b>							
Carbon, %	21.2	23.9	10.1	28.2	27.8	18.8	18.6
Hydrogen, %	2.6	3.0	1.3	3.4	4.1	2.5	2.1
Oxygen, %	15.3	22.9	9.4	27.4	22.5	17.5	16.7
Nitrogen, %	0.3	0.6	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2
Sulfur, %	0.0	0.1	0.0	0.0	na	0.0	0.0
Chlorine, %	0.2	na	0.1	0.1	na	0.1	0.1
Ash, %	2.0	1.2	0.7	0.9	3.7	1.5	2.4
Moisture, %	58.6	48.4	78.4	40.0	41.7	59.4	60.0
<b>Other Characteristics</b>							
Bulk Density, kg/m <sup>3</sup>	380	na	na	na	na	250	na
Higher heating value, kJ/kg	9,196	9,370	3,908	11,298	11,704	7,451	6,811
Lower heating value, kJ/kg	7,240	7,556	1,760	9,615	9,830	5,494	4,917

\* ที่มา : <http://www.efe.or.th>

## 2.4 กระบวนการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงาน (วรรณุช แจงสว่าง, 2551)

การแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน คือ กระบวนการที่จะนำพลังงานจากชีวมวลมาใช้ประโยชน์ โดยการทำให้เกิดการแตกตัวของอินทรีย์สารที่อยู่ในชีวมวล และผลิตพลังงานออกมา เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานแบ่งเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อน และกระบวนการแปรรูปทางชีวเคมี ซึ่งแต่ละกระบวนการจะมีวิธีการหลายรูปแบบ และให้ผลิตภัณฑ์ออกมาในรูปแบบที่ต่างกันไป

## 2.4.1 กระบวนการทางเคมีความร้อน

การเปลี่ยนชีวมวลต่างๆ ให้เป็นพลังงาน โดยอาศัยกระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานความร้อนมาทำให้โครงสร้างทางเคมีของชีวมวลนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานตามความต้องการ โดยเริ่มจากวิธีที่ง่ายที่สุด คือ การเผาไหม้โดยตรง การย่อยสลายด้วยความร้อน และการแปรรูปเป็นก๊าซชีวมวล วิธีการที่แตกต่างกันจะให้ผลิตภัณฑ์ออกมาที่แตกต่างกันซึ่งอาจอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซแล้วแต่กรณี กระบวนการทางเคมีความร้อนอาจแบ่งออกเป็น 4 วิธีคือ

### 1. การเผาไหม้ (Combustion)

การเผาไหม้โดยตรง เป็นกระบวนการแปรรูปชีวมวลโดยใช้ความร้อนในที่ที่มีอากาศ เพื่อให้เกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์ สารอินทรีย์ในชีวมวลจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานออกมา วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ในชนบทในรูปแบบของการใช้ฟืนและถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิงการหุงต้ม ไม้ฟืนที่นำมาใช้อาจเป็นไม้จากป่าธรรมชาติ ป่าที่ปลูกเพื่อผลิตพลังงาน หรือเศษไม้ที่เหลือจากอุตสาหกรรมไม้ การใช้ไม้จากป่าธรรมชาติก่อให้เกิดปัญหาการตัดไม้ทำลายป่าทำให้ป่าไม้ลดลง ดังนั้นจึงควรมีการปลูกป่าทดแทนและปลูกไม้โตเร็วเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ เช่น ปริมาณความชื้นของชีวมวล เต้าเผา ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ และอุณหภูมิในการเผาไหม้ เนื่องจากเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงพลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปในการระเหยน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ต่ำ องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งประกอบไปด้วยส่วนที่ติดไฟ 2 ส่วน คือ สารระเหยง่าย และคาร์บอน ในกระบวนการเผาไหม้สารระเหยง่ายมักสูญเสียไป โดยทั่วไปเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีพลังงานอยู่ในสารระเหยง่ายถึง 3 ใน 4 ส่วนของพลังงานทั้งหมด ถ้าไม่มีการเก็บสารระเหยนี้กลับมา ก็จะทำให้สูญเสียพลังงานไปในรูปของสารระเหย

กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะเกิดขึ้นสองช่วง ในช่วงแรกเป็นการเผาไหม้ของสารระเหยซึ่งเกิดขึ้นในวัฏภาคแก๊สเป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับแก๊ส ช่วงหลังเป็นการเผาไหม้ของกากของแข็งที่เหลืออยู่ คือ ถ่านชาร์ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ช้ากว่าที่ใช้ดำเนินการ คืออุณหภูมิตั้งแต่ 800 - 1400 องศาเซลเซียส ระบบการเผาไหม้โดยทั่วไปจะใช้อากาศเกินพอเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ทั้งนี้ยังมีผลการสูญเสียความร้อน เนื่องจากการใช้อากาศเกินพอน้อยเกินไปจนทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเรียกว่า การสูญเสียศักยภาพทางความร้อน (Potential heat loss) อยู่ในรูปขององค์ประกอบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หรือ คาร์บอน (C)

## 2. การทำให้เป็นก๊าซ (Gasification)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนสภาพทางเคมีโดยการสลายคาร์บอนในเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นก๊าซ โดยการเผาชีวมวลในอุปกรณ์ที่ควบคุมปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ก๊าซที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่า ก๊าซชีวมวลหรือโพรวินเซอร์ก๊าซ ซึ่งจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์สันดาปภายใน หรือเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน ก๊าซชีวมวลที่ได้ประกอบไปด้วยก๊าซไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังมีก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ กระบวนการแปรรูปชีวมวลเป็นก๊าซชีวมวลเป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องมาจากกระบวนการย่อยสลายชีวมวลด้วยความร้อน แต่จะเกิดที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 600 องศาเซลเซียสขึ้นไป การผลิตก๊าซชีวมวลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบในด้านต่างๆ ได้แก่ ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นของเตาเผา สารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวมวล และลักษณะของเตาที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวมวล

## 3. การแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis)

เป็นกระบวนการย่อยสลายชีวมวลโดยใช้ความร้อนในที่ที่มีอากาศปริมาณจำกัด ซึ่งจะเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงในรูปของแข็ง ของเหลว และก๊าซ การย่อยสลายด้วยความร้อนเป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible chemical process) ที่ใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 150 องศาเซลเซียสขึ้นไป และจะต้องป้อนอากาศในปริมาณจำกัด ก๊าซที่ได้จากกระบวนการนี้ ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) และเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆอีกเล็กน้อย ของแข็งที่เหลือจากกระบวนการนี้ ได้แก่ ถ่าน และขี้เถ้า (Ash) สำหรับส่วนที่เป็นของเหลว ได้แก่ น้ำมัน น้ำ และน้ำมันดิน (Tar)

การย่อยสลายด้วยความร้อนแบบดั้งเดิม (Conventional pyrolysis) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส เช่น กระบวนการเผาถ่าน ซึ่งก็คือการย่อยสลายไม้ด้วยความร้อน เป็นวิธีที่ทำกันมาแต่โบราณ ก๊าซและไอน้ำที่ได้จากกระบวนการจะระเหยไป ปริมาณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เป็นตัวแปรที่สำคัญ และมีผลต่อทั้งอุณหภูมิและผลิตภัณฑ์ที่ได้

## 4. การทำให้เป็นของเหลว (Liquefaction)

เป็นกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel) ผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากชีวมวลทำได้โดยการแยกคาร์บอนออกหรือการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) เรียกกระบวนการนี้ว่า Liquefaction เชื้อเพลิงเหลวที่ได้สามารถนำมากลั่นในกระบวนการกลั่นน้ำมัน จะได้น้ำมันสำหรับรถยนต์ และผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น พลาสติก และสารละลายต่างๆ (Solvent) กระบวนการการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยตรง



(Direct liquefaction) เป็นการแปรรูปชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยใช้กระบวนการเดี่ยว (Single process) และการผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยทางอ้อม (Indirect liquefaction) เป็นการนำ ชีวมวลมาผ่านกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สก่อน ในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงเหลวนี้นี้โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ เวลา อุณหภูมิ และความดันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา รวมถึงอาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็นของเหลวได้รวดเร็วมีปริมาณมากขึ้น ภาวะที่ใช้ดำเนินการอยู่ที่ 350 ถึง 500 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 500 ถึง 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการส่วนใหญ่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ และต้องให้อัตราการเพิ่มความร้อนอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการรวมตัวของโมเลกุลที่แตกตัวจากการให้ความร้อนกลายเป็นพอลิเมอร์

#### 2.4.2 กระบวนการทางชีวเคมี

การเปลี่ยนชีวมวลต่างๆ ให้เป็นพลังงานในรูปแบบต่างๆ โดยอาศัยกระบวนการทางชีวเคมี (Biochemical conversion) เป็นการใช้ประโยชน์จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนหรือออกซิเจน กระบวนการนี้อาจแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ

##### 1. การย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน

กระบวนการย่อยสลายในที่ที่ไม่มีอากาศ (Anaerobic digestion) เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของชีวมวล โดยกระบวนการชีวเคมีในที่ที่ไม่มีอากาศให้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซ เรียกว่า ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นก๊าซผสมระหว่างมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และอาจมีก๊าซอื่นปนอยู่บ้างเล็กน้อย เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) และไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) ค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพที่ได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซมีเทนในก๊าซผสม ปกติก๊าซมีเทนบริสุทธิ์มีค่าความร้อน 8,500 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร ก๊าซมีเทนที่พบในก๊าซชีวภาพเป็นชนิดเดียวกับที่พบในก๊าซธรรมชาติ ในก๊าซธรรมชาติมีก๊าซมีเทนร้อยละ 80 ในก๊าซชีวภาพมีมีเทนร้อยละ 50 – 75 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ และสภาวะแวดล้อมที่เกิดการย่อยสลาย ค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซมีเทนถ้าก๊าซมีเทนมีเป็นองค์ประกอบร้อยละ 60 จะมีค่าความร้อนประมาณ 5,700 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร การนำก๊าซชีวภาพมาเป็นพลังงานสามารถใช้ได้หลายอย่าง เช่น เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มและให้แสงสว่าง เป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันเตาในการผลิตไอน้ำในหม้อไอน้ำ หรือใช้ในการผลิตไฟฟ้า

## 2. การหมัก (Fermentation)

กระบวนการหมักเพื่อผลิตแอลกอฮอล์ (Alcoholic fermentation) คือ การแตกตัวของสารประเภทไฮโดรคาร์บอนเป็นเอทิลแอลกอฮอล์ (เอทานอล) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เอทานอลที่เกิดขึ้นสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้โดยผสมกับก๊าซโซลีนในอัตราส่วนร้อยละ 10 ต่อ 90 หรือ 20 ต่อ 80 ก๊าซที่ได้เรียกว่า ก๊าซโซฮอล

กระบวนการผลิตเอทานอลจากวัสดุการเกษตรโดยผ่านการหมักประกอบไปด้วยกระบวนการหลัก 4 ขั้นตอน สรุปได้ดังนี้

- (1) การจัดหาวัตถุดิบในการผลิต วัตถุดิบที่นิยมใช้จะเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ พวกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ เช่น มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวโพด พวกที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ เช่น อ้อย ข้าวฟ่างหวาน กากน้ำตาล โดยถ้าวัตถุดิบเป็นน้ำตาลสามารถใช้ในการหมักได้ทันที แต่ถ้าเป็นแป้งต้องเปลี่ยนน้ำตาลเสียก่อน
- (2) กระบวนการหมัก กระบวนการหมักจะต้องใช้ยีสต์ซึ่งเป็นจุลินทรีย์พวกหนึ่งใส่ลงในถังหมักโดยไม่ต้องมีอากาศ ยีสต์จะผลิตเอทานอลออกมา กระบวนการหมักใช้เวลา 1 – 2 วัน ซึ่งจะได้เอทานอลมีความเข้มข้นร้อยละ 80
- (3) กระบวนการกลั่น เอทานอลที่ได้จากการหมัก เมื่อต้องการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงจะต้องไม่มีน้ำปนอยู่ ในการหมักจะได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นต่ำ จึงต้องทำให้เอทานอลมีความเข้มข้นมากขึ้น โดยการกลั่นลำดับส่วนเอาน้ำออก เมื่อนำเอทานอลที่มีน้ำปนไปกลั่น เมื่อถึงอุณหภูมิจุดเดือดของเอทานอลที่ 78 องศาเซลเซียส เอทานอลจะเดือดกลายเป็นไอแยกออกมาจากน้ำแล้วจึงนำไอของ เอทานอลไปควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 78 องศาเซลเซียส ก็จะได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นสูง
- (4) การกำจัดของเสีย หลังจากแยกเอทานอลออกไปกลั่นแล้วจะเหลือส่วนของสารละลายที่เรียกว่า น้ำกากส่า ซึ่งจะมีน้ำตาล สารอินทรีย์ และเซลล์ยีสต์ปนอยู่มากมายก่อนที่จะปล่อยทิ้งลงสู่แม่น้ำลำคลองต้องมีการบำบัดเสียก่อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.5 การใช้พลังงานจากชีวมวล

(<http://charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/chevamul.php>)

### 2.5.1 ประโยชน์และข้อดีของพลังงานชีวมวล

#### ก) ประโยชน์ของพลังงานชีวมวล

- เศรษฐกิจชุมชนจะเจริญเติบโต เนื่องจาก โครงการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก เชื้อเพลิงชีวมวล สามารถช่วยพัฒนาอุตสาหกรรม ต่อเนื่องในท้องถิ่น จะเป็นการช่วยสร้างงานในพื้นที่นั้นๆ และก่อให้เกิดรายได้กับชุมชนผ่านทางภาษีท้องถิ่น
- เกษตรกรจะมีรายได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถขายได้ทั้งผลผลิตการเกษตร และเศษวัสดุการเกษตรที่เคยทิ้ง จะกลับมามีราคาขายได้
- เป็นทางเลือกใหม่ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- ความมั่นคงในการผลิตกระแสไฟฟ้าของประเทศจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีโรงไฟฟ้าพลังชีวมวลขนาดเล็ก กระจายอยู่ทั่วประเทศ ปัญหาไฟดับไฟดับในพื้นที่ห่างไกลจะลดลงหากมี โรงไฟฟ้าขนาดเล็กไปอยู่ใกล้ๆ

#### ข) ข้อดีของเชื้อเพลิงชีวมวล

- มีปริมาณกำมะถันต่ำ
- ราคาถูกกว่าพลังงานเชิงพาณิชย์อื่น ต่อหน่วยความร้อนที่เท่ากัน
- มีแหล่งผลิตอยู่ในประเทศ
- พลังงานจากชีวมวลจะไม่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจก และแทบจะไม่ทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศหรืออากาศเป็นพิษเลยในกรณีที่มีการปลูกทดแทน

### 2.5.2 ปัญหาการใช้พลังงานจากชีวมวล

พลังงานจากชีวมวลมีข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงประเภทถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมันเตา หลายประการ และเป็นเหตุผลที่ทำให้การผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานหมุนเวียนไม่แพร่หลายเท่าที่ควร เช่น

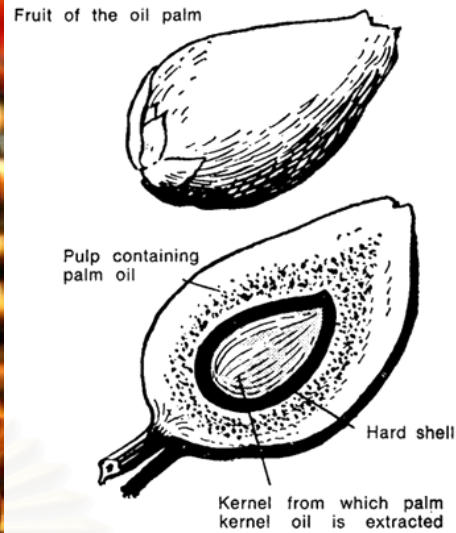
1. ชีวมวลมีปริมาณที่ไม่แน่นอน เนื่องจาก
  - ชีวมวลแต่ละชนิดปลูกเพียงตามฤดูกาลเท่านั้น และผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ
  - เกษตรกรเปลี่ยนชนิดของผลผลิตไปตามความต้องการของตลาด
  - พื้นที่การเกษตรลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพไปสู่มะเข็ญ

- ชีวมวลมีอยู่มากแต่อยู่อย่างกระจัดกระจาย ทำให้รวบรวมได้ยาก เช่น กะลามะพร้าว เศษไม้ ชังข้าวโพด ยอดอ้อยที่อยู่ตามท้องไร่ท้องนาและแถบตามโรงสีเล็กๆ
- 2. ปริมาณชีวมวลที่มีใช้ในโรงงาน และพื้นที่ใกล้เคียง มีไม่เพียงพอที่จะนำไปผลิตพลังงาน ที่ให้ผลตอบแทนในการลงทุนดีพอและเมื่อต้องการชีวมวลประเภทอื่น หรือจากแหล่งอื่นมาเสริม ก็จะมีปัญหาในเรื่องต่างๆ ดังนี้
  - ค่าขนส่งจากแหล่งชีวมวลมาสู่โรงงาน ถ้ายังอยู่ไกลพื้นที่ตั้งของโรงงานก็ยิ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง
  - เทคโนโลยีที่สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงชีวมวลหลายๆ ชนิด มีราคาแพง
  - มีความเสี่ยงสูงในการรวบรวมชีวมวลจากแหล่งต่างๆ ให้ได้ปริมาณตามต้องการ
- 3. โรงงานขาดความเชื่อมั่นที่จะลงทุน เนื่องจาก
  - ขาดการสนับสนุนการลงทุนจากสถาบันการเงิน เนื่องจากความไม่แน่นอนของชีวมวล
  - ขาดความมั่นใจด้านเทคโนโลยี ด้วยยังขาดการสาธิตเทคโนโลยี
  - ไม่มีผู้ให้คำปรึกษาทางเทคนิค
  - ขาดบุคลากรที่จะเป็นผู้ดำเนินการและบำรุงรักษาโรงงานผลิต

## 2.6 ปาล์มน้ำมัน (Palm oil) (<http://th.wikipedia.org>)

ปาล์มน้ำมัน (Oil palm) เป็นพืชตระกูลปาล์มลักษณะลำต้นเดี่ยว ขนาดลำต้นประมาณ 12-20 นิ้ว เมื่ออายุประมาณ 1-3 ปี ลำต้นจะถูกหุ้มด้วยโคนกาบใบ แต่เมื่ออายุมากขึ้นโคนกาบใบจะหลุดร่วงเห็นลำต้นชัดเจน ผิวของลำต้นคล้ายๆ ต้นตาล ลักษณะใบเป็นรูปก้างปลา โคนกาบใบจะมีลักษณะเป็นซี่ คล้ายหนามแต่ไม่คมมาก เมื่อไปถึงกลางใบหนามดังกล่าวจะพัฒนาเป็นใบการออกดอกเป็นพืชที่แยกเพศ คือต้นที่เป็นเพศผู้จะให้เกสรตัวผู้อย่างเดียว ต้นที่ให้เกสรตัวเมียจึงจะติดผล

ลักษณะผลเป็นทะลายผลจะเกาะติดกันแน่นจนไม่สามารถสอดนิ้วมือเข้าไปที่ก้านผลได้ เวลาเก็บผลปาล์มจึงต้องใช้มีดงอเกี่ยวที่โคนทะลายแล้วดึงให้ขาด ก่อนที่จะตัดทะลายปาล์มต้องตัดทางปาล์มก่อนเพราะผลปาล์มจะตั้งอยู่บนทางปาล์ม กระบวนการตัดทาง(ใบ)ปาล์มและตัดเอาทะลายปาล์มลง เรียกรวมๆ ว่า ทางปาล์ม ปาล์มน้ำมันจัดเป็น พืชเศรษฐกิจ มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา เป็นพืชที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าพืชน้ำมันทุกชนิด



#### รูปที่ 2.4 ปาล์มน้ำมันและส่วนประกอบของผลปาล์มน้ำมัน

(ที่มา : [www.fao.org/docrep/006/t0309e/t0309e01.htm](http://www.fao.org/docrep/006/t0309e/t0309e01.htm) )

สามารถนำมาแปรรูปทำเป็นน้ำมันปาล์มประกอบอาหาร เนย รวมถึงเป็นส่วนผสมในไบโอดีเซลด้วย ไบโอมาบดเป็นอาหารสัตว์ กะลาปาล์มเป็นวัตถุดิบเชื้อเพลิง ทะลายปาล์มใช้เพาะเห็ด และกระถังการปลูกลงดินไปแล้วก็ช่วยในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในการช่วยลดภาวะโลกร้อนได้อีก

ในประเทศไทยมีการปลูกทั้งทางภาคใต้และภาคตะวันออก พันธุ์ปาล์มน้ำมันที่ส่งเสริมให้เกษตรกรปลูก เป็นปาล์มน้ำมันลูกผสมเทเนอรา โดยเฉพาะที่สามจังหวัดชายแดนภาคใต้ ช่วงปี 2547 - 2550 มีการส่งเสริมการปลูกปาล์มน้ำมันในพื้นที่นาร้าง โดยกรมพัฒนาที่ดิน มีการชุดร่องให้ฟรี ให้พันธุ์และปุ๋ย โดยให้เหตุผลในการส่งเสริมการปลูกเนื่องจากเป็นปาล์มที่ให้น้ำมันใช้ได้ทั้งการบริโภคและใช้เป็นไบโอดีเซลได้

ปัจจุบัน ประเทศที่ผลิตและส่งออกน้ำมันปาล์มรายใหญ่ที่สุดในโลกคือประเทศมาเลเซีย ผลิตเป็นสัดส่วนมากถึงร้อยละ 47 ของการผลิตของโลก

ปาล์มน้ำมันที่เป็นพืชที่ให้น้ำมัน 2 ชนิด คือ น้ำมันปาล์มจากเปลือกผลปาล์ม ซึ่งมีปริมาณน้ำมันประมาณ 22% ของน้ำหนักทะลาย น้ำมันปาล์มมีองค์ประกอบทางเคมีเกี่ยวข้องกับวิตามินที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ วิตามินอี และสารแคโรทีนอยด์ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสร้างวิตามินเอ มีปริมาณสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ

น้ำมันปาล์มมีกรดไขมันอิ่มตัว (กรดลอริก, ไมริสติก, บัลมิติกและสเตียริก) รวมกันประมาณ 52% และมีกรดไขมันไม่อิ่มตัว (โอเลอิก, ลิโนลิก และลิโนลิอิก) รวมกันประมาณ 48% ดังแสดงสูตรโครงสร้างในภาคผนวก ง1 น้ำมันปาล์มและน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่สกัดได้จาก

โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เป็นน้ำมันดิบยังไม่สามารถบริโภคได้ต้องนำไปทำการกลั่นให้เป็นน้ำมันบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการแยกยางเหนียว ลดกรด ฟอกสี และดูดกลิ่น ได้เป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และมีผลพลอยได้ คือ กรดไขมัน ซึ่งผลผลิตทั้งหมดนี้เรานำไปใช้ เพื่อการอุปโภคบริโภคได้อย่างมากมาย เช่น ทำเป็นน้ำมันปรุงอาหาร น้ำมันทอด ผลิตภัณฑ์ขนม ไอศกรีม เนยเทียม เนยขาว ไข่ขนมปังกรอบ เนยโกโก้ ครีมเทียม คอฟฟี่เมท ไขมันทำขนมปัง สบู่ เทียนไข ผงซักฟอก ยาสีฟัน และใช้ในอุตสาหกรรมโพลิโอเคมีคัลอย่างกว้างขวาง และที่สำคัญที่สุดในยุคน้ำมันปิโตรเลียมแพง ก็คือ ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล หรือที่เรานิยมเรียกว่า ไบโอดีเซล นั่นเอง ซึ่งการผลิตเมทิลเอสเทอร์จะเป็นการนำเอาน้ำมันปาล์มมาทำปฏิกิริยากับ เมทานอล โดยมีโซดาไฟเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ เรียกว่าปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันได้เป็น เมทิลเอสเทอร์ และกรีเซอร์อลเป็นผลพลอยได้

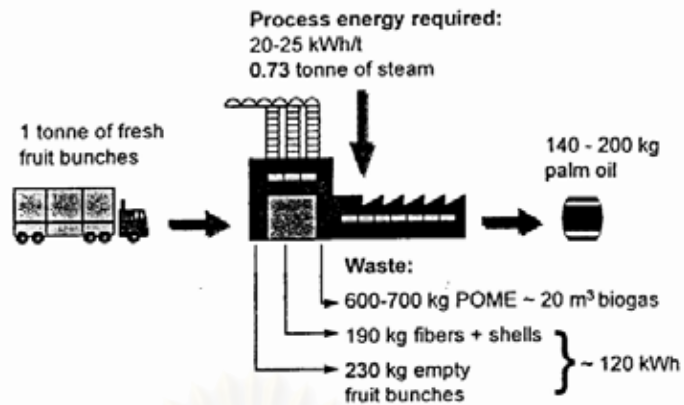
## 2.7 กะลาปาล์ม (Palm oil shells)

(<http://charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/chevamul.php>)

กะลาปาล์ม (รูป 2.5) และทลายปาล์ม เป็นชีวมวลที่ได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เมื่อนำปาล์ม 1 ตัน ผ่านกระบวนการแปรรูปต่างๆ แล้ว จะใช้พลังงานทั้งสิ้น 20 - 25 กิโลวัตต์ และใช้ไอน้ำอีก 0.73 ตัน เพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มประมาณ 140 - 200 กิโลกรัม และจะมีวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตหรือ เปลือกปาล์ม กะลาปาล์ม ประมาณ 190 กิโลกรัม และได้เป็นทลายปาล์ม 230 กิโลกรัม หรือเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้าได้ 120 กิโลวัตต์ และมีน้ำเสียจากโรงงานคิดเทียบเท่า ก๊าซชีวภาพได้ 20 ลูกบาศก์เมตร แสดงแผนภาพดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 กะลาปาล์มน้ำมัน



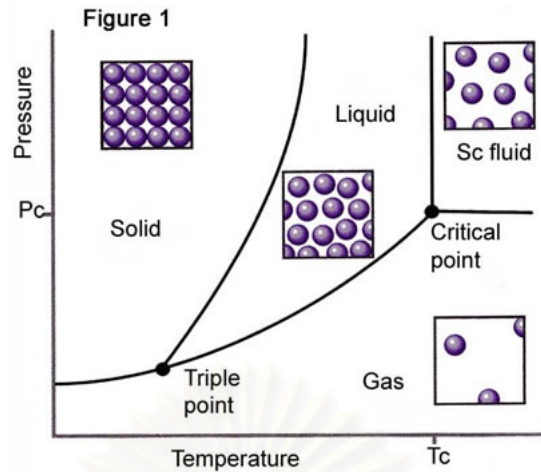
รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม

(ที่มา : charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/chevamul.php)

## 2.8 ของไหลภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical Fluid, SCF) (Sothanapan ,1993)

สารใด ๆ ในภาวะซึ่งจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือของเหลว เมื่อพิจารณาถึงแก๊สที่สามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวได้ซึ่งมี 2 วิธีโดยการเพิ่มความดัน หรือลดอุณหภูมิเพื่อลดพลังงานจลน์ ทำให้ระยะทางระหว่างโมเลกุลลดลงเกิดแรงดึงดูดระหว่างกันควบแน่นเป็นของเหลว แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุด ๆ หนึ่ง โมเลกุลของแก๊สจะมีพลังงานจลน์มากแม้จะให้ความดันเท่าใด ก็ไม่สามารถทำให้แก๊สเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวได้ อุณหภูมิสูงสุดที่แก๊สยังสามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature,  $T_c$ ) และความดันที่จุดนี้เรียกว่า ความดันวิกฤต (Critical Pressure,  $P_c$ ) จุดที่มีอุณหภูมิเท่ากับ  $T_c$  และความดันเท่ากับ  $P_c$  เรียกว่า จุดวิกฤต (Critical Point, CP) แสดงดังรูปที่ 2.7

ที่อุณหภูมิมากกว่า อุณหภูมิ  $T_c$  และความดันมากกว่า  $P_c$  สารจะอยู่ในภาวะที่มีสมบัติจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือของเหลว เรียกสารที่อยู่ในภาวะนี้ว่า ของไหลภาวะเหนือวิกฤต ซึ่งมีสมบัติอยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลวคือมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับของเหลว เมื่อนำมาใช้เป็นตัวทำละลาย โมเลกุลของสารที่ต้องการละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลภาวะเหนือวิกฤตเกิดปฏิสัมพันธ์ (Interaction) กัน ลดเอนทัลปี เกิดการละลายได้ดี และขณะเดียวกันของไหลภาวะเหนือวิกฤตก็มีความหนืด และการแพร่กระจายใกล้เคียงกับแก๊ส ทำให้สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างภายในของตัวถูกละลาย (Solute Matrix) ได้ดี ด้วยสมบัติเหล่านี้จึงนำของไหลภาวะเหนือวิกฤต มาใช้เป็นตัวทำละลายซึ่งมีข้อดีเหนือตัวทำละลายที่เป็นของเหลวคือ มีอัตราการถ่ายโอนมวลเร็วกว่าและมีความสามารถในการทำละลาย (Solvent Power) ที่ดีกว่า



รูปที่ 2.7 เฟสไดอะแกรมของของไหลภาวะเหนือวิกฤต

(ที่มา : [http://www.le.ac.uk/chemistry/greenchem/supercritical\\_fluids.html](http://www.le.ac.uk/chemistry/greenchem/supercritical_fluids.html))

### สมบัติของของไหลภาวะเหนือวิกฤต

ก. สมบัติการถ่ายโอน (Transport properties) จากการที่ของไหลภาวะเหนือวิกฤตมีความหนืดต่ำและสัมประสิทธิ์การแพร่สูงทำให้สามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง สามารถแทรกซึม (Penetrate) เข้าไปในโครงสร้างภายในของตัวถูกละลายได้ดี ทำให้ตัวถูกละลายที่ละลายเข้าไปในของไหลภาวะเหนือวิกฤตและกระจายออกจากบริเวณที่เกิดการสกัดไปบริเวณอื่นได้ง่าย คือมีอัตราการถ่ายโอนมวลดี ส่งผลให้ของไหลภาวะเหนือวิกฤตเป็นตัวทำละลายที่ดี อย่างไรก็ตาม ความหนืด และสัมประสิทธิ์การแพร่ของของไหลภาวะเหนือวิกฤต มีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลายประการเช่น อุณหภูมิ ความดัน และชนิดของของไหลภาวะเหนือวิกฤต จึงต้องมีการปรับภาวะให้เหมาะสมเพื่อให้สกัดสารที่ต้องการได้ดีที่สุด

ข. ความสามารถในการทำละลาย (Solvent Power) เป็นสมบัติเด่นประการหนึ่งของของไหลภาวะเหนือวิกฤตกว่าตัวทำละลายที่เป็นของเหลวทั่วไปเนื่องจากสามารถปรับให้มีค่ามากหรือน้อยได้ง่ายโดยการปรับภาวะที่ให้

ภาวะหรือตัวแปร ประการแรกคือ อุณหภูมิ โดยทั่ว ๆ ไปการเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวทำละลายที่เป็นของเหลว จะทำให้มีการละลายเพิ่มขึ้น แต่ในของไหลภาวะเหนือวิกฤต การเพิ่มอุณหภูมิ จะก่อให้เกิดผล 2 ประการที่ขัดแย้งกัน

1. เพิ่มการละลายของตัวถูกละลาย
2. ลดความหนาแน่น ทำให้โมเลกุลของของไหลภาวะเหนือวิกฤตกับตัวถูกละลายอยู่ห่างกัน การละลายของตัวถูกละลายจึงลดลง



ผลรวมของผลที่ขัดแย้งกัน 2 ประการนี้คือความสามารถในการทำละลายของของไหล ภาวะเหนือวิกฤต ซึ่งข้อขัดแย้งในประการที่สอง สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ความดันกับของไหล ภาวะเหนือวิกฤต เพื่อคงสภาพความหนาแน่นให้ใกล้เคียงกับสภาวะเดิมก่อนที่จะมีการเพิ่ม อุณหภูมิ กล่าวโดยสรุปคือ ตัวแปรที่มีผลโดยตรงต่อความสามารถในการละลาย คือ อุณหภูมิและ ความหนาแน่น และความดันจะมีผลทางอ้อม โดยส่งผ่านความหนาแน่น

ค. สมบัติการเลือก (Selectivity Properties) เป็นสมบัติของของไหลภาวะเหนือวิกฤต ที่ สามารถปรับอุณหภูมิและความดัน เพื่อให้มีความสามารถในการทำละลายที่เหมาะสมเฉพาะกับ สารที่ต้องการสกัดให้มีการสกัดที่มากที่สุด โดยที่มีสารที่ไม่ต้องการปนออกมาให้น้อยที่สุด

## 2.9 ตัวเร่งปฏิกิริยา (วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ, 2547)

คำจำกัดความของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับสมดุลเคมีได้กล่าวไว้ว่า “ตำแหน่งของการ เกิดสมดุลทางเคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาหนึ่งๆ เป็นตำแหน่งเดียวกับสมดุลเคมีที่ไม่มีตัวเร่ง ปฏิกิริยา” คำจำกัดความเช่นนี้จึงใช้เป็นพื้นฐานการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยถือเอา ความแตกต่างระหว่างสถานะเริ่มต้นและสถานะสุดท้ายของค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยา เท่านั้นเป็นตัวคำนวณ หรืออาจกล่าวในอีกแง่หนึ่งได้ว่า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ การเปลี่ยนแปลง ค่ามาตรฐานของเอนโทรปีและเอนทัลปีของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาหรือไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ย่อมมีค่าเท่ากันเสมอ ดังนั้นการวัดการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีของปฏิกิริยาเคมีจึงมีประโยชน์ อย่างมากในการศึกษาปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

### 2.9.1 การจำแนกระบบที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาจำแนกได้เป็น 3 ชนิด โดยพิจารณาจากเฟส (Phase) ของตัวเร่งปฏิกิริยากับเฟสของสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแรกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเฟสแตกต่างจากสารตั้งต้น หรือไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเรียกว่า “ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเฮเทอโรจีเนียส” (Heterogeneous catalyst) ชนิดที่สองเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีขอบเขตของเฟส โดยเฟสของตัวเร่งปฏิกิริยากับเฟสของสารตั้งต้นสามารถรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเรียกว่า “ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโฮโมจีเนียส” (Homogeneous catalyst) ส่วนชนิดที่สาม ได้แก่ เอนไซม์ (Enzyme) อันเป็นสารประกอบโปรตีน ซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้ปฏิกิริยาเลือกเฉพาะสูงและมีอัตราเร็ว ในการเกิดปฏิกิริยาสูงมาก สำหรับเอนไซม์นั้นเกี่ยวกับปฏิกิริยาทางชีวเคมีเป็นสำคัญ

## 2.9.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา (Alvin and Theadore, 1995)

โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

### 1. วิธีการตกตะกอน (Precipitation method)

เป็นวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรมน้อยกว่าวิธีการแบบฝังตัว แต่มีข้อได้เปรียบคือสามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้มีเปอร์เซ็นต์สูงขึ้นได้ โดยวิธีการตกตะกอนมี 2 วิธี คือ

ก. วิธีการตกตะกอน เพื่อให้ได้โลหะออกไซด์เพียงอย่างเดียว โดยเติมสารละลายที่เป็นเกลือของ โลหะลงไปในสารละลายพวกอัลคาไลด์ไฮดรอกไซด์

ข. การตกตะกอนร่วม (Coprecipitation) คล้ายกับวิธีการตกตะกอน แต่แทนที่จะใช้โลหะเกลือ เพียงชนิดเดียว ต้องใช้เกลือของโลหะมากกว่า 2 ชนิด เพื่อให้เกิดสารละลายเชิงซ้อน ที่ เรียกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาพรีเคอร์เซอร์ (Catalyst precursor) ข้อควรระวังในการเตรียมตัวเร่ง ปฏิกิริยาแบบตกตะกอน คือ การควบคุมภาวะใน การเตรียม เช่น pH ในสารละลาย อัตราการผสม อัตราการเติมสารที่ทำให้ตกตะกอน ตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างมาก

### 2. วิธีการแบบฝังตัว (Impregnation method)

เป็นวิธีที่ง่ายและใช้กันมากที่สุด ทำได้โดยการเติมตัวรองรับลงในสารละลายเกลือของโลหะ เกลือโลหะจะแพร่เข้าสู่ตัวรองรับ จากนั้นทำให้เกลือของโลหะร้อน เพื่อให้เกลือของโลหะที่อยู่บนตัว รองรับสลายตัวให้ออกไซด์เกาะบนตัวรองรับ ซึ่งการเตรียมสามารถแบ่งได้ 2 วิธี คือ

ก. การฝังตัวแบบเปียก (Wet impregnation) วิธีนี้เติมตัวรองรับลงในสารละลายของเกลือโลหะ ที่มีปริมาณมากเกินพอ ดังนั้นปริมาณเกลือโลหะที่เกาะอยู่บนตัวรองรับจะรู้จักต่อเมื่อรู้ปริมาณเกลือโลหะก่อนและหลังเตรียม ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่สะดวกนัก

ข. การฝังตัวแบบแห้ง (Dry impregnation หรือ Impregnation to incipient wetness) นิยมใช้ใน ทางอุตสาหกรรม ตัวรองรับจะถูกทำให้กระจายตัว และพ่นด้วยสารละลายที่มีความเข้มข้นที่ เหมาะสม โดยปริมาตรของสารละลายที่ต้องใช้ต้องมีปริมาณเท่ากับ ปริมาตรของรูพรุน ทั้งหมดของตัวรองรับ หรือน้อยกว่าเล็กน้อย ซึ่งเป็น การควบคุม ปริมาณองค์ประกอบที่ว่องไว ที่เกาะบนตัวรองรับได้อย่างถูกต้อง แต่ปริมาณสูงสุดของการเกาะแต่ละครั้งถูกจำกัดด้วย ความสามารถในการละลายของสารหลังจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จะถูกทำให้แห้ง และนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง ปริมาณและการแจกแจงของเกลือโลหะบนพื้นผิวภายในของตัวรองรับ มีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นซึ่ง

ปริมาณและการแลกเปลี่ยนขึ้นอยู่กับลักษณะ การดูดซับของเกลือที่เข้าไปอยู่ในรูพรุนของตัวรองรับ

## 2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Xu et al. (2008) ศึกษาการแปรรูปไม้ซีววมวล (Jack pine powder) ให้เป็นของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ขนาด 14 มิลลิลิตร โดยใช้ภาวะต่ำกว่าวิกฤต/เหนือกว่าวิกฤต ในช่วงอุณหภูมิ 280 - 380 องศาเซลเซียส น้ำมันหนักที่ได้มีค่าความร้อนสูงถึง 30 - 35 MJ/Kg (มากกว่าไม้ตัวอย่างเริ่มต้น) และ น้ำมันที่ละลายน้ำที่มีค่าความร้อน 19 - 25 MJ/kg ผลได้ของค่าความร้อนและผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมมีแนวโน้มสูงสุดในช่วงอุณหภูมิ 280 - 340 องศาเซลเซียส ในส่วนของการทำการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  และ  $\text{FeSO}_4$  พบว่ามีประสิทธิภาพในการช่วยการเกิดผลิตภัณฑ์น้ำมันหนักที่อุณหภูมิ 280 - 340 องศาเซลเซียส และช่วยส่งเสริม การเกิดพอกก๊าซและน้ำที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า 340 องศาเซลเซียส น้ำมันหนักที่ได้ในการดำเนินการที่ภาวะ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพิ่มขึ้นจากกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (30%) เป็น 45% โดยใช้  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  ในการดำเนินการโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผลได้สูงสุดของผลิตภัณฑ์น้ำมันรวมสูงถึง 51% และเพิ่มสูงขึ้นไปถึง 65% เมื่อใช้  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วย GC/MS แสดงให้เห็นว่าน้ำมันหนักประกอบด้วย กรดคาร์บอกซิลิก สารประกอบฟีนอล และอนุพันธ์ และ อัลเคนสายโซ่ยาว เป็นองค์ประกอบหลัก

Xu et al. (2008) ศึกษาการแปรรูปปี้ตให้เป็นเชื้อเพลิงในรูปของก๊าซและเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 380 - 440 องศาเซลเซียส กรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วงอุณหภูมิ 350 - 440 องศาเซลเซียส ผลได้ 5 - 10% เป็น Water Soluble Oil (WSO) ,15% เป็น Heavy Oil (HO), 20 - 27% เป็น ก๊าซ และ 20 - 30% เป็นถ่านชาร์ โดยในการดำเนินการที่อุณหภูมิสูงจะเพิ่มผลได้เป็นก๊าซ น้ำมันและถ่านชาร์จะลดลง ภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้ Heavy oil คือ เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยและสัดส่วนของ น้ำ/พีทต่ำ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดสอบคือ 0.1 M  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , 0.1 M  $\text{FeSO}_4$ , 0.1 M  $\text{RuO}_2$  และ 0.1 M และ 1.0 M  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 0.1 M  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  มีประสิทธิภาพในการเพิ่มผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันเหลว Heavy oil และ Water soluble oil โดยตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0 M  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่ 410 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็น  $\text{CO}_2$  ต่ำสุด เนื่องจากเกิดการ adsorption ของ  $\text{CO}_2$  บนตัวเร่งปฏิกิริยา และได้  $\text{H}_2$  เพิ่มเป็น 4 เท่า ทำให้ก๊าซที่ได้มีคุณภาพสูงคือมีค่าความร้อน HHV 27.7 MJ/kg ซึ่งตรงกันข้ามกับก๊าซที่ได้จากการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าเพียง

2.81 MJ/kg ตัวเร่งปฏิกิริยา RuO<sub>2</sub> เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดในการปรับปรุงคุณภาพฟิทให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซไฮโดรเจนปริมาณสูงถึง 2.44 mmol/g ที่ 0.1 M RuO<sub>2</sub> ที่ 410 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ HO มีสารประกอบฟีนอลและกรดไขมันมาก ค่าความร้อนที่ได้สูงกว่าผงฟิทเริ่มต้นมาก (Heavy oil:HHV>33-35MJ/kg/ผงฟิท:HHV>21MJ/kg)

Yuan et al. (2007) ศึกษาการแปรรูปฟางข้าวให้เป็นของเหลวในตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอล (เอทานอลกับน้ำ และ 2-โพรพานอลกับน้ำ) ในภาวะต่ำกว่าและเหนือวิกฤต ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1000 มิลลิลิตร ที่ 533 - 623 เคลวิน ความดัน 6 -18 เมกะพาสคัล ผลได้สูงสุดของไบโอเอทอลคือ 39.7% ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของ 2-โพรพานอลกับน้ำเท่ากับ 5 ต่อ 5 ที่ อุณหภูมิ 573 เคลวิน และค่าความร้อน (HHV) ของไบโอเอทอลเพิ่มตามอุณหภูมิและอัตราส่วนโดยปริมาตรตัวทำละลายที่เพิ่มขึ้น ในการใช้ตัวทำละลายผสมช่วยลดการเกิดกากและช่วยเพิ่ม conversion ฟางข้าวต่อตัวทำละลายที่สัดส่วน 1 ต่อ 9 ถึง สัดส่วน 5 ต่อ 5 นอกจากนี้การใช้สารละลายผสมนั้นสามารถยับยั้งการเกิดกากของส่วนที่เหลือ น้ำมันที่ได้นำมาวิเคราะห์ด้วย GC/MS และ Elemental Analyzer ส่วนกากที่เหลือนำมาวิเคราะห์ด้วย SEM เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและส่วนประกอบ

Liu et al. (2008) ศึกษาการแปรรูปไม้สนให้เป็นของเหลวในตัวทำละลายต่างๆกัน ได้แก่ น้ำ อะซิโตน และ เอทานอล โดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ในช่วงอุณหภูมิ 523 - 723 เคลวิน ความดันเริ่มต้น 1 เมกะพาสคัล ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ใช้ชีวมวล 10 กรัม และใช้ตัวทำละลาย 60 กรัม ผลิตภัณฑ์เหลวและกากของแข็งที่ได้จะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS และ FTIR ผลการทดลองที่ได้คือ องค์ประกอบผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ขึ้นกับชนิดตัวทำละลาย ซึ่งในการใช้อะซิโตนเป็นสารสกัดได้ 4-เมทิล-1,2-เบนซีนไดออล เป็นองค์ประกอบหลัก ขณะที่ถ้าใช้เอทานอล จะได้ 2-เมทอกซี-4-(1-โพรพิล)-ฟีนอล เป็นองค์ประกอบหลัก และน้ำจะได้ผลิตภัณฑ์ที่กระจายตัวแคบ ใน 3 ตัวทำละลาย อะซิโตน ให้ร้อยละการเปลี่ยนสูงที่สุด โดยปริมาณน้ำมันสูงที่สุด คือ 26.5%

Wang et al. (2007) ศึกษาการแปรรูปซีลี้อยู่ให้เป็นของเหลวในเตตระลินโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่ช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นอยู่ในช่วง 4 ถึง 10 เมกะพาสคัล เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 ถึง 100 นาที ผลการทดลองที่ได้คือ ปริมาณน้ำมันอยู่ในช่วง 6.8 ถึง 67.1% ขึ้นกับภาวะการทดลอง อุณหภูมิมีผลมากกว่าความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้น และระยะเวลาในกระบวนการ ในการเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการเพิ่ม conversion ผลได้ที่เป็นก๊าซ และ แอสฟัลทีน (Preasphaltene+Asphaltene, PA+A) ค่าความร้อน (HHV) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็สูงกว่าวัตถุดิบเริ่มต้น ในการเพิ่มความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น conversion และผลได้ที่เป็นก๊าซเกือบไม่เปลี่ยนแปลง ผลได้น้ำมันเพิ่มขึ้น (36.86 - 57.06%) ขณะที่ ผลได้ของ PA+P ลดลง (28.07 - 16.27%) ส่วนการเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ทั้ง conversion และ การกระจายของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย นั่นคือ การมีไฮโดรเจนหรือเตตระลินอยู่นั้นช่วยปรับปรุงทั้ง conversion ของซีลี้อยู่ และ ผลได้ที่เป็นน้ำมัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของตัวแปรต่างที่มีต่อกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มให้เป็นของเหลว เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยทำการทดลอง ที่อุณหภูมิ 230 - 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 0 - 4.13 เมกะพาสคัล ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูป คือ ของเหลว แก๊ส และกากของแข็ง จากนั้นทำการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย GC/MS และค่าความร้อน

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องบดกะลาปาล์มชนิดละเอียด Retsch
2. ตะแกรงร่อนขนาด 250 ไมครอน (เบอร์ 60)
3. เครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) ผลิตโดย Parr Instrument Company Model 4842 ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ทำจากเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิม SUS 316 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ประกอบไปด้วย เทอร์โมคัปเปิลพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) อุปกรณ์วัดความดันประกอบด้วยมาตรวัดความดันและอุปกรณ์ควบคุมความดัน (Pressure Transducer) อุปกรณ์การกวนประกอบด้วยใบกวนพร้อมชุดกำหนดและวัดความเร็วรอบของใบกวน เครื่องปฏิกรณ์สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส และความดันสูงสุดไม่เกิน 34 เมกะพาสคัล



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ Parr Reactor Model 4842

- 3.เตาอบ (Oven) WTB Binder Model ED-115i
4. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) Agilent 6890N คอลัมน์ HP-5MS ที่ประกอบกับเครื่อง Mass Spectroscopy (Agilent 5973) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลว
5. เครื่อง CHN Analyzer รุ่น CHN-2000 ยี่ห้อ Leco เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาหาร้อยละคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน
6. เครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary Evaporator) Bunchi Rotavapor R-200
7. เครื่องแคลอรีมิเตอร์ (Oxygen Bomb Calorimeter) ผลิตโดยบริษัท Parr Instrument Company model 1341EE
8. อุปกรณ์การกรองประกอบด้วย กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel) ขวดกรอง (Suction or filter flask) เครื่องดูดอากาศ (Aspirator) พร้อมกระดาษกรอง Whatman No. 4
9. เดซิกเคเตอร์ ภายในบรรจุซิลิกาเจล (Silliga gel) ดูดความชื้น

### 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

1. กะลาปาล์มบดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 250 ไมครอน (เบอร์ 60)
2. แก๊สไนโตรเจน 99.99% จาก บริษัท ไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด (มหาชน)
3. เอทานอล (Ethanol) 99.9 % จาก บริษัท Merck
4. เอทานอล (Ethanol) 95 % จาก บริษัท Fluka
5. อะซิโตน (Acetone) จาก QReC™
6. เอทิลอะซิเตต (Ethyl acetate) จาก ห้างหุ้นส่วน จำกัด เคมีกิจ
7. ปีโตรเลียมอีเธอร์ (Petroleum ether) จาก BDH AnalarR<sup>®</sup>
8. โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) จากบริษัท Panreac Quimica
9. ไอร์ออน (III) คลอไรด์ ( $\text{Fe}_2\text{Cl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) จาก BDH AnalarR<sup>®</sup>
10. ไอร์ออน (II) ซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ ) จาก Scharlau
11. ไอร์ออน (II) ซัลไฟด์ ( $\text{FeS}$ ) จาก บริษัท Ajax Finechem
12. แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) จาก marble small lumps
13. ซิลิกาเจล จาก บริษัท วิทยาศาสตร์ จำกัด
14. ถ่านกัมมันต์

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 การเตรียมการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาตัวแปรต่างๆต่อกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤตที่สามารถให้ไฮโดรเจนแก่ระบบและมีความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนให้แก่สารตั้งต้นเป็นอย่างดี

ตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤตที่ใช้ในการทดลองมี 5 ชนิด คือ เอทานอล 99.99% เอทานอล 95% อะซิโตน เอทิลอะซิเตด และสารละลายเอทานอล 95% 90% 70% และ 50% ซึ่งคุณสมบัติวิกฤตของตัวทำละลายชนิดต่างๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

คุณสมบัติวิกฤตของสารละลายเอทานอลได้จากการคำนวณผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ HYSIS ver.2.4.1 ของบริษัท Hyprotech สำหรับการคำนวณใช้สมการสถานะของ Peng-Robinson ในการหาคุณสมบัติวิกฤต และความดันวิกฤต

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติวิกฤต และความดันวิกฤตของตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

ตัวทำละลาย	เอทานอล (%โดยปริมาตร)	คุณสมบัติวิกฤต (องศาเซลเซียส)	ความดันวิกฤต (เมกะพาสคัล)
เอทานอล 99.9%	-	243.2	6.38
เอทานอล/น้ำ	95	245.7	6.85
	90	251.2	10.34
	70	278.6	10.69
	50	310.7	14.45
อะซิโตน	-	235.5	4.72
เอทิลอะซิเตด	-	250.0	3.90

#### 3.3.2 การเตรียมตัวอย่างกะลาปาล์ม

1. บดกะลาปาล์มโดยใช้เครื่องบดอย่างละเอียด
2. ร่อนกะลาปาล์มด้วยตะแกรงเบอร์ 60 ให้มีขนาดเล็กกว่า 250 ไมครอน
3. นำกะลาปาล์มที่ได้อบในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. เก็บไว้ในเดซิเคเตอร์เพื่อป้องกันความชื้น จากนั้นนำมาวิเคราะห์เบื้องต้น หรือดำเนินการทดลองต่อไป



### 3.3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองมี 4 ตัว คือ ไอร์ออน(II)ซัลเฟต ไอร์ออน(II)ซัลไฟด์ ไอร์ออน(III)ซัลไฟด์บนถ่านกัมมันต์ และแคลเซียมออกไซด์

#### ก) การเตรียมไอร์ออน(II)ซัลเฟต

1. นำไอร์ออน(II)ซัลเฟต จากภาชนะบรรจุทำการบดด้วยครกกระเบื้อง ให้มีมวลละเอียด 1 มิลลิเมตร
2. ทำการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. เก็บไว้ในเดซิکเคเตอร์

#### ข) การเตรียมไอร์ออน(II)ซัลไฟด์

1. นำไอร์ออน(II)ซัลไฟด์ จากภาชนะบรรจุทำการบดด้วยครกกระเบื้อง ให้มีมวลละเอียด 1 มิลลิเมตร
2. ทำการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. เก็บไว้ในเดซิกเคเตอร์

#### ค) การเตรียมไอร์ออน(III)ซัลไฟด์ (อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์) (Liu Z., et.al., 1996) มีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้

1. ปริมาณเหล็กบนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 2.5 เตรียมโดยชั่งถ่านหิน 20 กรัม  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  3.2 กรัม และ  $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  2.4 กรัม ดังปฏิกิริยา



2. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้มาละลายในน้ำ 15 มิลลิลิตร ให้หมด
3. นำถ่านกัมมันต์ใส่ภาชนะพร้อมกับเติมสารละลาย  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  กวนส่วนผสมเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมสารละลาย  $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ลงไปในส่วนผสมพร้อมทั้งกวนต่อไปอีก 2 ชั่วโมง
4. กรองถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลาย จากนั้นอบถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้เป็นเวลา 1 คืนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเก็บไว้ในเดซิกเคเตอร์สำหรับการทดลองต่อไป

#### ง) การเตรียมแคลเซียมออกไซด์

1. นำแคลเซียมออกไซด์จากภาชนะบรรจุทำการบดด้วยครกกระเบื้อง
2. ทำการอบที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
3. เก็บไว้ในเดซิกเคเตอร์

### 3.3.4 การวิเคราะห์สมบัติของกะลาปาล์ม

#### 1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

วิเคราะห์ตามมาตรฐานของ ASTM D3172 - 3175 ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยได้ และปริมาณคาร์บอนคงตัว

#### 2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

วิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ด้วยเครื่อง CHN analyzer

#### 3. การหาค่าความร้อน (Heating Value)

วิเคราะห์หาค่าความร้อนของกะลาปาล์ม ด้วยเครื่อง Bomb calorimeter ตาม ASTM D3177-02 Method B : Bomb Washing Method)

### 3.3.5 ศึกษาผลของตัวแปร อุณหภูมิ ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น เวลา ชนิดตัวทำละลาย อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกะลาปาล์ม และชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 1. ผลของเวลา

ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 230, 260 และ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 20 - 60 นาที อัตราส่วนส่วนของเอทานอลและกะลาปาล์มคือ 7.5

#### 2. ผลของอุณหภูมิ

ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 230 - 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนส่วนของเอทานอลและกะลาปาล์มคือ 7.5

#### 3. ผลของไฮโดรเจนเริ่มต้น

ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 230 และ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 0 - 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนส่วนของเอทานอลและกะลาปาล์มคือ 7.5

#### 4. ผลของอัตราส่วนของเอทานอลต่อกะลาปาล์ม

ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนส่วนของเอทานอลและกะลาปาล์มคือ 7.5 - 30 ตัวทำละลายที่ใช้ คือ เอทานอล 99.99%

#### 5. ผลของชนิดของตัวทำละลาย

ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนส่วนของตัวทำละลายและกะลาปาล์มคือ 7.5 ตัวทำละลายที่ใช้ คือ เอทานอล 99.99% อะซิโตน และเอทิลอะซิเตด

#### 6. ผลของความเข้มข้นของเอทานอล

ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนส่วนของตัวทำละลายและกะลาปาล์มคือ 7.5 ตัวทำละลายที่ใช้คือ สารละลายเอทานอล 95% 90% 70% และ 50%

#### 7. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนของเอทานอลและกะลาปาล์มคือ 7.5 - 30 ตัวเร่งปฏิกิริยา ไอร์รอน(II)ซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ ), ไอร์รอน(II)ซัลไฟด์ ( $\text{FeS}$ ) ไอร์รอน(III)ซัลไฟด์บนถ่านกัมมันต์ และ แคลเซียมออกไซด์

### 3.3.6 การแปรรูปกะลาปาล์มให้เป็นของเหลว

1. ชั่งกะลาปาล์ม 5 - 20 กรัม ลงในเครื่องปฏิกรณ์ เติมตัวทำละลาย 150 มิลลิลิตร และ เติมตัวเร่งปฏิกิริยาในกรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ประกอบเครื่องปฏิกรณ์ใส่อากาศภายในเครื่องด้วยแก๊สไฮโดรเจนและอัดแก๊สไฮโดรเจนตามความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นที่กำหนด คือ 0 - 4.13 เมกะพาสคัล
3. ทดสอบรอยรั่ว จากนั้นประกอบเครื่องปฏิกรณ์กับเครื่องให้ความร้อน ตั้งค่าอุณหภูมิ โดยระบบของเครื่องควบคุมอุณหภูมิมีอัตราการให้ความร้อนประมาณ 6 องศาเซลเซียสต่อนาที ตั้งค่าความเร็วรอบของใบกวนเป็น 100 รอบต่อนาที ใช้เวลา 40 นาที
4. เมื่อครบเวลา ทำการลดอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ จนเหลือ 80 องศาเซลเซียส ยกเครื่องปฏิกรณ์ออกจากอุปกรณ์ให้ความร้อน เป่าเครื่องปฏิกรณ์ด้วยพัดลมไฟฟ้า จนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นค่อยๆ ปลดปล่อยแก๊สที่ค้างอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ออกในตู้ดูดควัน
5. นำผลิตภัณฑ์ของเหลวและการของแข็งออกมา ชะล้างด้วยอะซิโตน 20 มิลลิลิตร จนหมดพร้อมทั้งเทส่วนชะล้างไปผสมลงในผลิตภัณฑ์
6. ทำการแยกส่วนผลิตภัณฑ์เหลวออกจากกากของแข็งโดยการกรองด้วยอุปกรณ์การกรองสุญญากาศ และล้างของแข็งด้วยอะซิโตน นำน้ำล้างรวมกับส่วนของเหลวที่กรองได้
7. นำสารละลายของเหลวที่ได้ไประเหยเพื่อแยกตัวทำละลายออกจากผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่องระเหยแบบหมุน

- แยกตัวทำละลายอะซิโตนและเอทานอลออกที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ 400 มิลลิบาร์
    - แยกน้ำที่ยังคงอยู่ในผลิตภัณฑ์เหลวออกให้หมดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ความดัน 400 มิลลิบาร์
  - ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ของเหลวที่แยกได้ และเก็บผลิตภัณฑ์ของเหลวไว้ในขวดเพื่อนำไปคำนวณและรอการวิเคราะห์ต่อไป
8. ชั่งน้ำหนักของแข็งที่ได้พร้อมกระดาษกรองบนกระจกนาฬิกา นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์
9. ชั่งน้ำหนักของแข็งที่แยกได้ เพื่อนำไปคำนวณและรอการวิเคราะห์ต่อไป

### 3.3.7 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่องGC/MS

การวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) Agilent 6890N คอลัมน์ HP-5MS นำผลิตภัณฑ์เหลวมาละลายในตัวทำละลายเอทิลอะซิเตด จนมีความเข้มข้น 1000 ppm จากนั้นฉีดสารละลายนี้เข้าเครื่องที่ตำแหน่งฉีดสารที่มีอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเตาอบ เริ่มจาก 50 องศาเซลเซียส คงที่ 1 นาที สิ้นสุดที่ 250 องศาเซลเซียส คงที่เป็นเวลา 10 นาที ด้วยอัตราการเพิ่ม 10 องศาเซลเซียส/นาที มีแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สพาด้วยอัตราเร็ว 1 มิลลิลิตร/นาที สัดส่วนการแบ่งฉีดเป็น 20:1 ที่ประกอบกับเครื่อง Mass Spectroscopy (Agilent 5973) อุณหภูมิส่วนถ่ายโอน 280 องศาเซลเซียส MS Source อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส Solvent delay 3 นาที

### 3.3.8 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ของเหลว ได้แก่

1. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)
2. ค่าความร้อน (ASTM D 2015)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต โดยทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการ คือ เวลา อุณหภูมิ ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกะลาปาล์ม ชนิดของตัวทำละลายที่ใช้ อัตราส่วนของตัวทำละลายผสมระหว่างเอทานอลและน้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงผลของแต่ละตัวแปรด้วย ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว ร้อยละผลได้ของกากของแข็ง และ(แก๊ส+น้ำ) ร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์ม และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ผลได้จากการทดลองนำไปวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และค่าความร้อน

#### 4.4 การวิเคราะห์สมบัติของกะลาปาล์มเริ่มต้น

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D 3173-75 และผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ตามมาตรฐาน ASTM D 5291-96 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (CHN Elemental Analyzer) ผลวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจน ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติกะลาปาล์มแบบประมาณและแบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
ความชื้น (Moisture)	4.6
สารระเหย (Volatile matter)	57.6
คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)	27.0
เถ้า (Ash)	10.8
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (dry basis)	
คาร์บอน (C)	42.5
ไฮโดรเจน (H)	5.2
ไนโตรเจน (N)	0.4
ออกซิเจน (O)	51.9
ค่าความร้อน (MJ/kg)	15.8

## 4.2 กระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มให้เป็นของเหลวโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

### 4.2.1 ผลของเวลา (Effect of time)

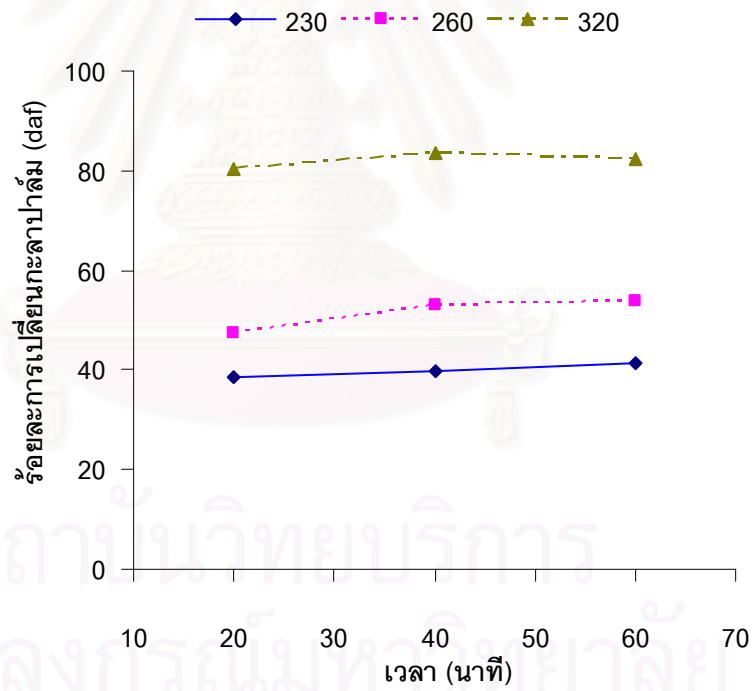
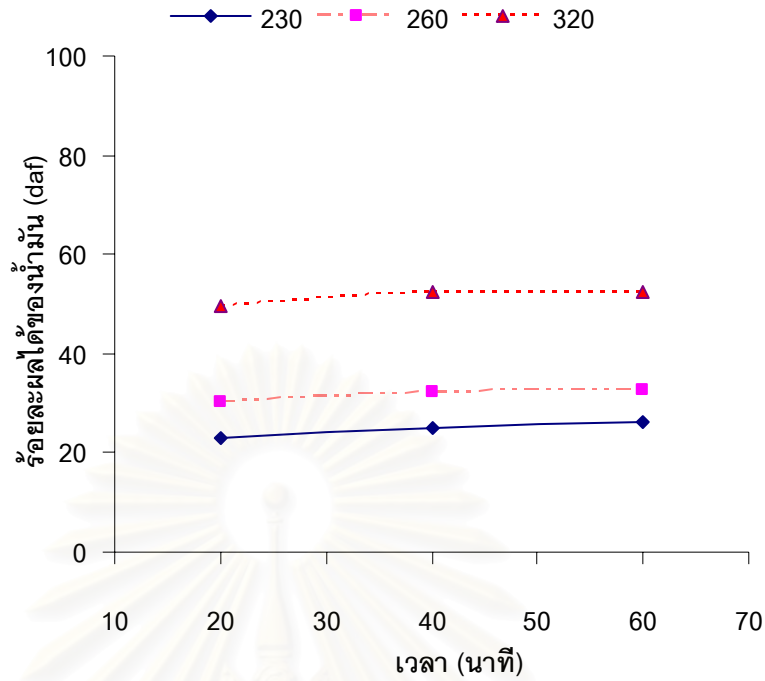
การศึกษาผลของเวลาที่มีต่อกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มให้เป็นของเหลว โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 230, 260 และ 320 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 20, 40 และ 60 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.2

ในช่วงเวลา 20 - 60 นาที (รูป 4.1 ก) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลา 20 - 40 นาที นั่นคือ จากร้อยละ 49.6 เป็นร้อยละ 52.6 (การทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส) แต่เมื่อใช้เวลา 60 นาที ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวกลับคงที่ เนื่องจากการเกิดเป็นแก๊สและน้ำเพิ่มขึ้นด้วยปฏิกิริยาการแตกกิ่ง (Cracking) และดีไฮเดรชัน (Dehydration) (Chunbao et al., 2007) ในส่วนร้อยละกากของแข็งลดลงตามเวลา หากแต่การลดลงนี้น้อยลงเมื่อมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น (ตารางที่ 4.2)

ร้อยละการเปลี่ยน (Conversion) ที่คำนวณจากผลรวมของผลิตภัณฑ์น้ำมันและผลิตภัณฑ์ของแก๊สรวมกับน้ำนั้น เพิ่มขึ้นตามเวลาเพียงเล็กน้อย (ตารางที่ 4.2) และการเพิ่มมีอัตราการลดลงเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนที่ใช้เวลา 60 นาที มีค่าน้อยกว่าที่ 40 นาที นั่นคือ จากร้อยละ 83.5 เหลือเพียง ร้อยละ 82.4 ทั้งนี้เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สเกิดปฏิกิริยารวมตัวกลายเป็นกากของแข็งมากขึ้นดังที่จะอธิบายต่อไปในส่วนของผลของอุณหภูมิ ซึ่งร้อยละการเปลี่ยนมีค่าลดลงในการทดลองที่อุณหภูมิสูง

เมื่อใช้เวลา 20 - 40 นาที (ตารางที่ 4.2) ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ค่อนข้างคงที่ นั่นคือ 31 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (การทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส) และค่าความร้อนลดลงเมื่อการทดลองใช้เวลา 60 นาที เหลือ 29.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

จากผลที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้นอาจกล่าวได้ว่า เวลาที่มีผลต่อการแปรรูปกะลาปาล์มไปเป็นผลิตภัณฑ์เหลวในภาวะตัวทำละลายเหนือวิกฤต



**รูปที่ 4.1** ผลของเวลาต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต: ก) ร้อยละผลได้ของน้ำมัน ข) ร้อยละการเปลี่ยนกะลาปาล์ม: อุณหภูมิ 230, 260 และ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5

ตารางที่ 4.2 ผลของเวลาต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

อุณหภูมิ (°C)	230			260			320		
เวลา (min)	20	40	60	20	40	60	20	40	60
ร้อยละการเปลี่ยน	38.5	39.9	41.3	47.3	53.1	53.8	80.3	83.5	82.4
ร้อยละผลได้ (daf)									
น้ำมัน	23.0	25.0	26.3	30.2	32.2	32.6	49.6	52.6	52.3
แก๊ส + น้ำ	15.5	14.9	15.0	17.1	21.0	21.2	30.7	30.9	30.1
ของแข็ง	61.5	60.1	58.7	52.7	46.9	46.2	19.7	16.5	17.6
ค่าความร้อน (MJ/Kg)									
น้ำมัน	26.2	26.4	24.2	25.1	25.8	24.8	31.0	31.0	29.5
ของแข็ง	16.7	20.2	16.6	16.7	16.6	17.0	13.8	15.8	13.1

\*ภาวะการทดลอง คือ อุณหภูมิ 230, 260 และ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5

#### 4.2.2 ผลของอุณหภูมิ (Effect of temperature)

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลว โดยทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 230 - 320 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.3

ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงอุณหภูมิ 260-290 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียสมีร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันสูงสุดเท่ากับ 52.6 (ตารางที่ 4.3) เนื่องจากระหว่างการแปรรูปกะลาปาล์มให้เป็นของเหลวนั้น กะลาปาล์มได้ถูกสลายและเกิดการรีโพลีเมอไรเซชัน (Repolymerization) ไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กและไม่เสถียร จึงมีการจัดเรียงตัวใหม่ โดยผ่านปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation) ปฏิกิริยาไซคลิเซชัน (Cyclization) และ พอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) เพื่อเกิดเป็นสารประกอบใหม่ (Yuan et al., 2007) ซึ่งสอดคล้องกับผลของร้อยละของผลิตภัณฑ์กากของแข็งที่มีปริมาณลดลงตามการเพิ่มของอุณหภูมิ โดยร้อยละต่ำสุดเท่ากับ 16.5 ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส แต่จะเห็นได้ว่าพอหลังจากอุณหภูมิ 290 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มขึ้นของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันมีแนวโน้มลดลง อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของการเกิดเป็นชาร์ที่อุณหภูมิสูงโดยเกิดปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation) และปฏิกิริยาไซคลิเซชัน (Cyclization) ของ

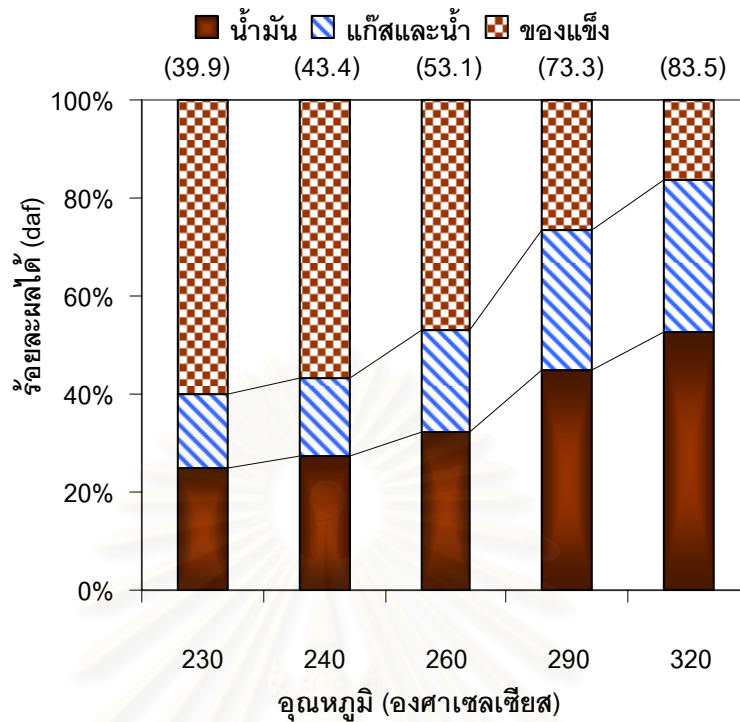


น้ำมัน และปฏิกิริยาการแครกกิง (Cracking) เกิดไปเป็นไฮโดรคาร์บอนแก๊ส และอีกสาเหตุหนึ่งก็คือ เกิดการดีเกรเดชัน (Degradation) ของสารประกอบเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemi-cellulose) และ ลิกนิน (Lignin) เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสเกิดเกิดการดีเกรเดชัน (Degradation) สลายตัว ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการดูดกลืนความร้อน (Endothermic reaction) เกิดที่อุณหภูมิต่ำ (ไม่เกิน 270 องศาเซลเซียส) และที่อุณหภูมิ 270 – 400 องศาเซลเซียส ซึ่งมวลสลายตัวด้วยตัวเองจากปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) อันเกิดจากความร้อนที่สะสมไว้ทั้งเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งทำให้ผลที่ได้ออกมาที่อุณหภูมิสูงขัดแย้งกับความต้องทางเทอร์โมไดนามิก (Thermodynamic) ส่งผลให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง (Molten et al., 1983)

จากตารางที่ 4.3 พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าความร้อนสูงขึ้น นั่นคือที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสมีค่าความร้อน 26.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 320 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีค่าความร้อน 31.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และเมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนของกะลาปาล์ม (ตาราง 4.1) พบว่า ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีค่าความร้อนที่สูงกว่ากะลาปาล์มตั้งต้น ที่มีค่าความร้อน 15.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhong et al. (2004) ที่ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำชีวมวล 4 ชนิดเป็นของเหลว พบว่า เมื่ออุณหภูมิมียผลต่อค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ ส่วนการวิเคราะห์แบบประมาณของผลิตภัณฑ์กากของแข็ง พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์กากของแข็งมีค่าสารระเหยลดลง เถ้าและคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับร้อยละผลได้ของน้ำมันและกากของแข็งที่ได้ ซึ่งมีการอภิปรายไว้ในผลของ GC/MS

จากข้อมูลข้างต้นเห็นได้ชัดว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการแปรรูปกะลาปาล์มไปเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวในตัวทำละลายเหนือวิกฤต

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**รูปที่ 4.2** ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้การแปรรูปกะลาปาล์มในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต ภาวะการทดลอง: ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 (ในวงเล็บ คือ ร้อยละการเปลี่ยน)

**ตารางที่ 4.3** ผลของอุณหภูมิต่อกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

อุณหภูมิ (°C)	230	240	260	290	320
<b>ร้อยละการเปลี่ยน</b>	39.9	43.4	53.1	73.3	83.5
<b>ร้อยละผลได้ (daf)</b>					
น้ำมัน	25.0	27.2	32.2	45.0	52.6
แก๊ส + น้ำ	14.9	16.2	21.0	28.4	30.9
ของแข็ง	60.1	56.6	46.9	26.7	16.5
<b>ค่าความร้อน (MJ/Kg)</b>					
น้ำมัน	26.4	24.4	25.8	25.6	31.0
ของแข็ง	20.2	16.3	16.6	21.9	15.8

\*ภาวะการทดลอง คือ ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5

#### 4.2.3 ผลของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (Effect of initial H<sub>2</sub> pressure)

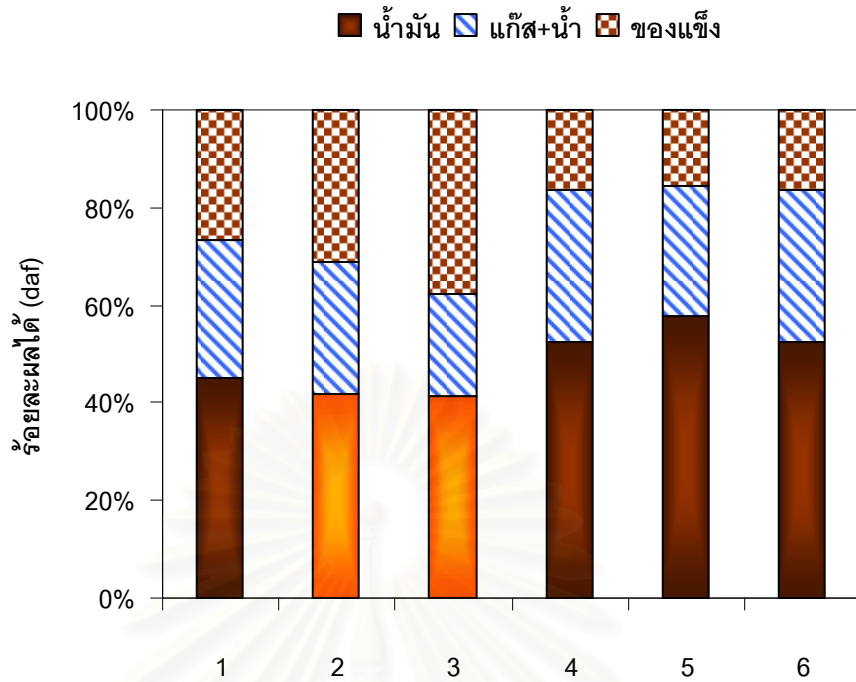
การศึกษาผลของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นที่มีต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลว โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 230 และ 320 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 0 - 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.4

ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากที่ไม่มีความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น มีความดันไฮโดรเจน 2.07 และ 4.13 เมกะพาสคัล (ตารางที่ 4.4) ได้ร้อยละผลได้น้ำมันเท่ากับ 46.5, 48.1 และ 52.6 ตามลำดับ (ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส) ซึ่งสอดคล้องกับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์กากของแข็งที่มีค่าลดลงตามการเพิ่มความดัน เนื่องจากความดันไฮโดรเจนมีส่วนช่วยในการแตกโมเลกุล โดยการไฮโดรเจนร่วม (Hydro-cracking) ตัดโซ่ยาวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา (Intermediates) ก่อนได้ผลิตภัณฑ์เหลว สารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยาหรืออินเทอร์มีเดียต เช่น สารอนุมูลอิสระอะโรมาติก (Aromatic free radical, Ar<sup>•</sup>) ที่แตกตัวจากลิกนินถูกทำให้เสถียรอย่างรวดเร็วด้วยไฮโดรเจนหรือสารอนุมูลอิสระไฮโดรเจน (Hydrogen free radical, H<sup>•</sup>) เกิดเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เสถียรโดยผ่านกลไกดังต่อไปนี้ (Demirbas, 2000)



ซึ่งมักเกิดขึ้นในขณะการสลายตัวของเซลลูโลสและลิกนินที่อุณหภูมิสูงเป็นการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation) ของอนุมูลอิสระ (Kucuk and Agirtas, 1999) ในทางกลับกัน ความดันไฮโดรเจนบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์ช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation) ไซคลิกเซชัน (Cyclization) และรีโพลีเมอไรเซชัน (Repolymerisation) ของอินเทอร์มีเดียต และผลิตภัณฑ์เหลว และลดการสร้างชาร์ (Char) (Schobert, 1990) เนื่องจากอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวเมื่อได้รับความร้อนถูกเติมไฮโดรเจนทำให้มีเสถียรภาพได้เป็นโมเลกุลที่อยู่ในสถานะของเหลวเพิ่มขึ้น

การเพิ่มความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นช่วยเพิ่มร้อยละการแปรรูปของกะลาปาล์ม นั่นคือ ที่ไม่มีความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น มีความดันไฮโดรเจน 2.07 และ 4.13 เมกะพาสคัล (ในตารางที่ 4.4) มีร้อยละการเปลี่ยนเท่ากับ 78.9, 80.4 และ 83.5 (ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส) ซึ่งสอดคล้องกับผลร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น



**รูปที่ 4.3** ผลของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้การแปรรูปกะลาปาล์มในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 230 และ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 (ในวงเล็บ คือ ร้อยละการเปลี่ยน)

ในส่วนของค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าค่อนข้างคงที่ทั้ง 2 อุณหภูมิ คือ ที่การแปรรูปที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ได้น้ำมันมีค่าความร้อน 26 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ส่วนที่การแปรรูปที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ได้น้ำมันมีค่าความร้อน 31 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งจะอธิบายเหตุผลในส่วนการวิเคราะห์น้ำมันด้วย GC/MS

จากเหตุผลข้างต้นทั้งหมดทำให้เห็นได้ว่าความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นมีผลต่อการแปรรูปกะลาปาล์ม

ตารางที่ 4.4 ผลของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

อุณหภูมิ (°C)	230			320		
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (MPa)	ไม่มี H <sub>2</sub>	2.07	4.13	ไม่มี H <sub>2</sub>	2.07	4.13
ร้อยละการเปลี่ยน	26.3	35.8	39.9	78.9	80.4	83.5
ร้อยละผลได้ (daf)						
น้ำมัน	15.3	23.0	25.0	46.5	48.1	52.6
แก๊ส + น้ำ	11.0	12.8	14.9	32.4	32.3	30.9
ของแข็ง	73.7	64.2	60.1	21.1	19.6	16.5
ค่าความร้อน (MJ/Kg)						
น้ำมัน	26.0	25.6	26.4	31.0	28.3	31.0
ของแข็ง	17.2	16.1	20.2	16.5	14.8	15.8

\*ภาวะการทดลอง คือ อุณหภูมิ 230 และ 320 องศาเซลเซียส เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5

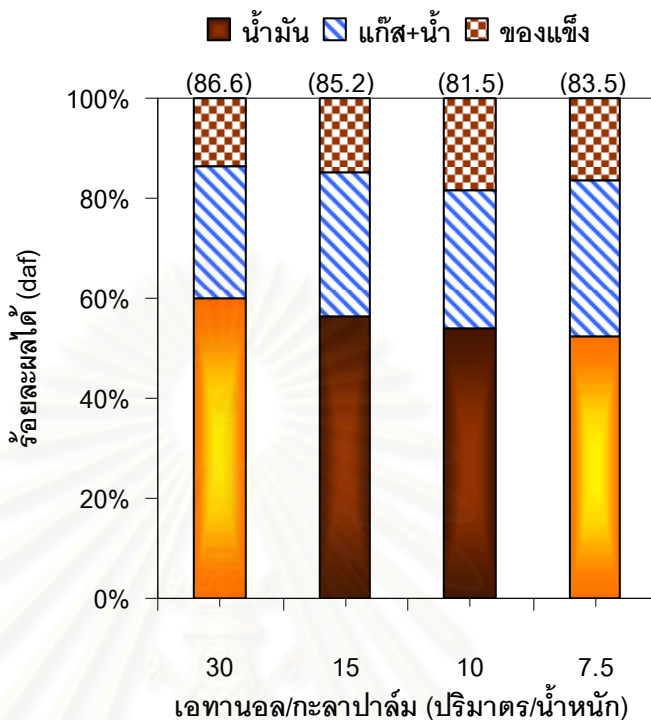
#### 4.2.4 ผลของอัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์ม

การศึกษาผลของอัตราส่วนตัวทำละลายต่อกะลาปาล์มที่มีต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลว โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.5

ผลของอัตราส่วนกะลาปาล์มต่อเอทานอลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันพบว่า เมื่อใช้อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 ได้ร้อยละผลได้ของน้ำมัน 52.6 (ตารางที่ 4.5) และเมื่อลดปริมาณกะลาปาล์มทำให้อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเพิ่มเป็น 30 ได้ร้อยละผลได้ของน้ำมันเพิ่มขึ้นเป็น 60.1 ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราส่วน 30 ตัวทำละลายเอทานอลให้สามารถให้ไฮโดรเจนที่เพียงพอสำหรับกะลาปาล์มที่แตกตัวด้วยความร้อน ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Qu et al. (2003) กับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์กากของแข็งที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มลดลง คือ ที่อัตราส่วน 30 มีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์กากของแข็งเท่ากับ 13.5 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 16.5 ที่อัตราส่วน 7.5

เมื่อเพิ่มปริมาณกะลาปาล์มทำให้อัตราส่วนการเปลี่ยนของกะลาปาล์มลดลงซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ นั่นคือ ที่อัตราส่วนเอทานอลต่อ

กะลาปาล์ม 30 ให้ร้อยละการแปรรูปของกะลาปาล์มเท่ากับ 86.6 ส่วนอัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มที่ 7.5 ให้ร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์มเท่ากับ 83.5



**รูปที่ 4.4** ผลของอัตราส่วนของเอทานอลต่อกะลาปาล์มที่มีต่อร้อยละผลได้ของการแปรรูปกะลาปาล์มในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที (ในวงเล็บ คือ ร้อยละการเปลี่ยน)

**ตารางที่ 4.5** ผลของอัตราส่วนเอทานอลกับกะลาปาล์มต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

เอทานอล / กะลาปาล์ม (ปริมาตร/น้ำหนัก)	30	15	10	7.5
ปริมาณกะลาปาล์ม (กรัม)	5	10	15	20
ร้อยละการเปลี่ยน	86.6	85.2	81.5	83.5
ร้อยละผลได้ (daf)				
น้ำมัน	60.1	56.5	53.9	52.6
แก๊ส + น้ำ	26.4	28.7	27.6	30.9
ของแข็ง	13.5	14.8	18.5	16.5

\*ภาวะที่การทดลอง คือ อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นเท่ากับ 4.13 เวลาที่ใช้ 40 นาที

จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนระหว่างเอทานอลและกะลาปาล์มมีผลต่อการแปรรูปกะลาปาล์ม

#### 4.2.5 ผลของชนิดตัวทำละลาย

การศึกษาผลของชนิดตัวทำละลายที่มีต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลว โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 ตัวทำละลายที่ใช้ คือ เอทานอลบริสุทธิ์ อะซิโตน และเอทิลอะซิเตต ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.6

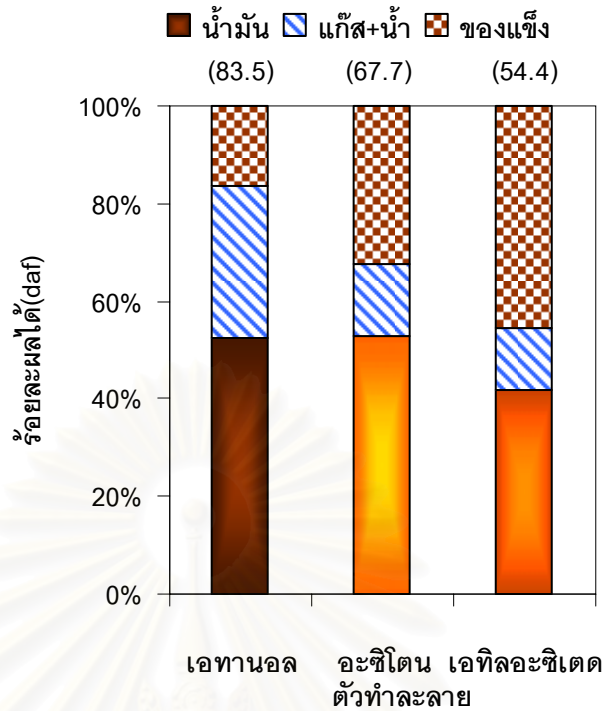
ร้อยละของผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเปลี่ยนแปลงตามชนิดตัวทำละลายที่ใช้ โดยตัวทำละลายเอทานอลบริสุทธิ์ และอะซิโตน ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเท่ากับ 52.6 และ 52.9 (ตารางที่ 4.6) ซึ่งสูงกว่าตัวทำละลายเอทิลอะซิเตตที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเท่ากับ 41.7 แต่ในส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ในตัวทำละลายอะซิโตนต่ำกว่าในตัวทำละลายเอทานอลอย่างเห็นได้ชัดคือเอทานอลและอะซิโตนให้ร้อยละเท่ากับ 16.5 และ 32.4 ตามลำดับ ส่วนตัวทำละลายเอทิลอะซิเตตให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็งเท่ากับ 41.7

นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าร้อยละของการเปลี่ยนกะลาปาล์มนั้นมีความสอดคล้องกับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว โดยสามารถเรียงจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ คือ อะซิโตน เอทานอล และ เอทิลอะซิเตต โดยมีร้อยละของการเปลี่ยนกะลาปาล์มเท่ากับ 67.7, 67.0 และ 54.4 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.7)

สำหรับการใช้ตัวทำละลายเอทานอล อะซิโตน และเอทิลอะซิเตตน้ำมันมีค่าความร้อนเท่ากับ 31.0, 33.2 และ 24.7 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.6) ซึ่งจากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่า การใช้ตัวทำละลายอะซิโตนน้ำมันมีค่าความร้อนสูงสุด แต่เกิดเป็นองค์ประกอบที่ไม่ต้องการ ดังจะอธิบายในผลการวิเคราะห์ GC/MS ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

ด้วยข้อมูลดังกล่าวข้างต้นนี้ ทำให้สามารถทราบได้ว่าชนิดของตัวทำละลาย มีผลต่อการแปรรูปกะลาปาล์มไปเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวในภาวะเหนือวิกฤต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**รูปที่ 4.5** ผลของชนิดตัวทำละลายต่อกะลาปาล์มที่มีต่อร้อยละผลได้ของการแปรรูปกะลาปาล์มในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เวลา 40 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 (ในวงเล็บ คือ ร้อยละการเปลี่ยน)

**ตารางที่ 4.6** ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

ชนิดตัวทำละลาย	เอทานอล	อะซีโตน	เอทิลอะซีเตด
ร้อยละการเปลี่ยน	83.5	67.7	54.4
ร้อยละผลได้ (daf)			
น้ำมัน	52.6	52.9	41.7
แก๊ส + น้ำ	30.9	14.7	12.7
ของแข็ง	16.5	32.4	45.6
ค่าความร้อน (MJ/Kg)			
น้ำมัน	31.0	33.2	24.7
ของแข็ง	15.8	18.4	20.2

\*ภาวะการทดลอง คือ อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5



#### 4.2.6 ผลของตัวทำละลายผสม (เอทานอล/น้ำ)

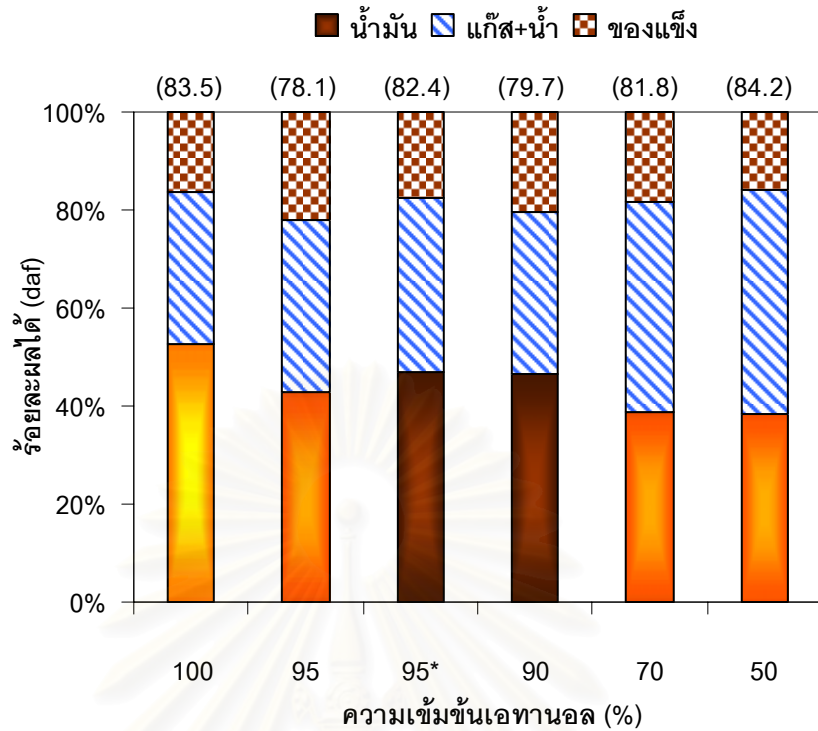
การศึกษาผลของชนิดตัวทำละลายที่มีต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลว โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 ตัวทำละลายที่ใช้ คือ สารละลายเอทานอล ความเข้มข้นต่างๆ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.7

จากผลการทดลอง (ตารางที่ 4.7) พบว่าการใช้ตัวทำละลายที่เป็นสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นลดลงจะให้ร้อยละของผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงตามไปด้วย นั่นคือ สารละลายเอทานอล 95 % ให้ร้อยละของผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเท่ากับ 42.9 ซึ่งสูงกว่า สารละลายเอทานอล 50 % ที่ให้ร้อยละของผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเท่ากับ 38.5 ที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้จากงานวิจัยการแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลว ที่ว่าเมื่อถ่านหินถูกทำให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายที่ให้ไฮโดรเจน (Hydrogen donor) สามารถทำให้อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นเสถียรได้ และลดการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (Repolymerization) ความสามารถในการให้ไฮโดรเจนในตัวทำละลายเอทานอล ในภาวะเหนือวิกฤตเป็นตัวทำให้อนุมูลอิสระที่เกิดจากการแปรรูปกะลาปาล์มให้เป็นของเหลว และการเกิดเป็นสารประกอบเล็กๆที่มีความเสถียรขึ้น (Toshiaki et al., 1991 และ Sangon et al., 2006) ดังนั้นในการใช้สารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นลดลงเป็นตัวทำละลายส่งผลในการลดสัดส่วนตัวให้ไฮโดรเจน ในตัวทำละลายทำให้ตัวทำละลายให้ไฮโดรเจนเจือจางด้วยน้ำ และความสามารถในการเป็นตัวให้ไฮโดรเจนอ่อนลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้เอทานอล บริสุทธิ์ ส่วนสารละลายเอทานอล 95% (ทางการค้า) กับ สารละลายเอทานอล 95% (เตรียมเอง) พบว่า สารละลายเอทานอล 95% (ทางการค้า) ให้อัตราผลผลิตผลิตภัณฑ์น้ำมันเท่ากับร้อยละ 46.7 ซึ่งสูงกว่าการใช้สารละลายเอทานอล 95% (เตรียมเอง) ในส่วนของกากของแข็งที่ได้จากการแปรรูปกะลาปาล์มนั้น เห็นได้ว่าเมื่อใช้สารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นลดลงช่วยยับยั้งการเกิดกากของแข็ง เป็นผลจากตัวให้ไฮโดรเจน (Yuan et al., 2007) นั่นคือ การใช้สารละลายเอทานอล 50 % ให้อัตราการเกิดของแข็งต่ำสุดร้อยละ 15.8 และให้อัตราผลผลิตผลิตภัณฑ์แก๊สและน้ำสูงสุด 45.7 ดังนั้นการใช้ตัวทำละลายตัวทำละลายความเข้มข้นต่ำช่วยสนับสนุนการแปรรูปกะลาปาล์มไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น

สำหรับร้อยละการเปลี่ยนกะลาปาล์มเพิ่มตามความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล โดยร้อยละการเปลี่ยนสูงสุดได้เมื่อใช้ความเข้มข้นเอทานอล 50 % ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของร้อยละปริมาณกากของแข็ง และมีค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบในส่วนการใช้สารละลาย เอทานอล 95 % (เตรียมเอง) ให้อัตราการเปลี่ยน 78.1 (ตารางที่ 4.7) กับ สารละลายเอทานอล 95 % (ทางการค้า) ให้อัตราการเปลี่ยน 82.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ตัวทำละลายเอทานอล 95% (ทางการค้า) ให้อัตราการเปลี่ยนสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด

ในส่วนของคุณค่าความร้อนผลิตภัณฑ์น้ำมันพบว่า การใช้เอทานอลความเข้มข้นสูงให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันค่าความร้อนสูงกว่า (ตารางที่ 4.7) ดังจะเห็นได้จากการใช้เอทานอลบริสุทธิ์ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีค่าความร้อนเท่ากับ 31.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ในขณะที่ การใช้สารละลายเอทานอล 50% ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันค่าความร้อนเท่ากับ 28.2 ซึ่งจะอธิบายต่อไปในผลการวิเคราะห์ GC/MS ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

จากตารางที่ 4.7 เมื่อเปรียบเทียบกะลาปาล์มกับผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการทำให้เป็นของเหลว พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่า เป็นผลให้ค่าความร้อน (Heating value) ที่ได้มีค่าสูงขึ้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น นั้นแสดงว่าการทำกะลาปาล์มให้เป็นของเหลวช่วยเพิ่มคุณภาพของเชื้อเพลิงให้มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าการที่ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลลดลงส่งผลต่อปริมาณออกซิเจนในผลิตภัณฑ์น้ำมันมีค่าลดลงตามไปด้วย เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) และเกิดผลิตภัณฑ์เป็น คาร์บอนไดออกไซด์ หรือ คาร์บอนมอนอกไซด์ (Chunbao et al.,2007) การใช้เอทานอลบริสุทธิ์เป็นตัวทำละลายนั้นให้อัตราส่วน H/C มีค่าต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าความร้อนที่มีค่าสูงสุด แต่การที่สารละลายเอทานอลให้อัตราส่วน H/C สูงกว่าโดยที่ค่าความร้อนที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับกรณีการใช้เอทานอลบริสุทธิ์นั้น เป็นผลจากปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงและอาจเป็นผลจากโครงสร้างขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ซึ่งจะอธิบายในผลของ GC/MS ต่อไป



**รูปที่ 4.6** ผลของความเข้มข้นเอทานอลต่อร้อยละผลได้ของการแปรรูปกะลาปาล์มในตัว ทำละลายภาวะเหนือวิกฤต ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 (ใน วงเล็บ คือ ร้อยละการเปลี่ยน)

ตารางที่ 4.7 ผลของความเข้มข้นเอทานอลต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

ความเข้มข้นเอทานอล (%)	100	95	95*	90	70	50
ร้อยละการเปลี่ยน	83.5	78.1	82.4	79.7	81.8	84.2
ร้อยละผลได้ (daf)						
น้ำมัน	52.6	42.9	46.7	46.4	38.8	38.5
แก๊ส + น้ำ	30.9	35.2	35.7	33.4	43.0	45.7
ของแข็ง	16.5	21.9	17.6	20.3	18.2	15.8
ค่าความร้อน (MJ/Kg)						
น้ำมัน	31.0	29.7	30.8	26.9	29.1	28.2
ของแข็ง	15.8	-	-	-	-	-
วิเคราะห์น้ำมันแบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (dry basis)						
คาร์บอน(C)	43.7	66.3	66.2	48.8	66.5	63.2
ไฮโดรเจน (H)	2.8	7.0	7.6	8.0	7.2	6.2
ไนโตรเจน (N)	0.4	0.9	0.7	0.6	1.0	1.0
ออกซิเจน (O)	53.1	25.8	25.6	42.7	25.4	29.6

\*สารละลายเอทานอล 95% ทางการค้า

\*\*ภาวะการทดลอง คือ อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5

#### 4.2.7 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาผลของชนิดตัวเร่งที่มีต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลว โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 230, 290 และ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ ไอร์ออน(III) ซัลไฟด์ร้อยละ 2.5 บนถ่านกัมมันต์ ไอร์ออน(II)ซัลไฟด์ ไอร์ออน(II)ซัลเฟต และแคลเซียมออกไซด์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.8

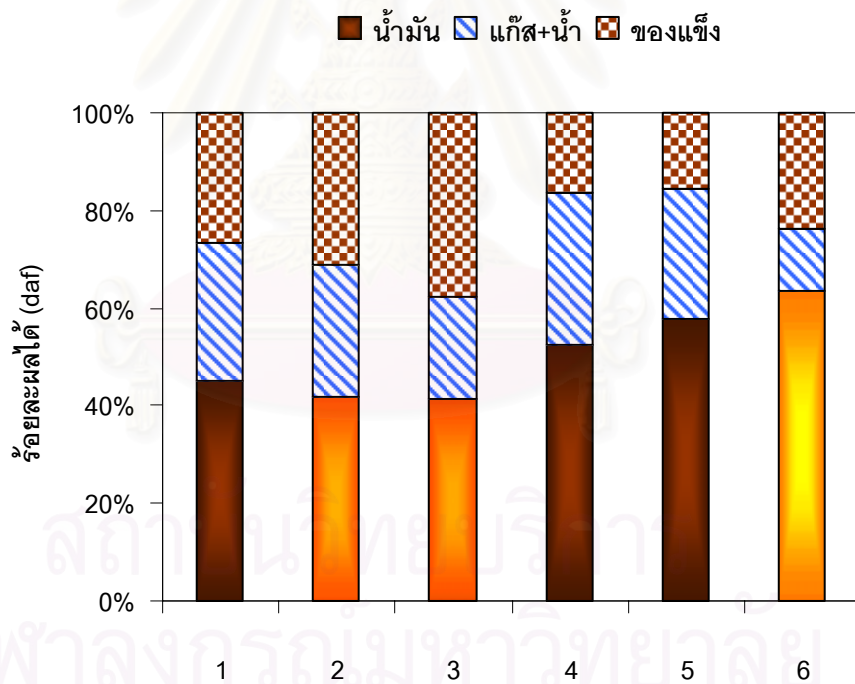
เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมากขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยา ไอร์ออน(II)ซัลไฟด์ และแคลเซียมออกไซด์ให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพิ่มเป็น 57.7 และ 63.6 ตามลำดับ จากร้อยละ 52.6 (กรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา) ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังตารางที่ 4.8 สำหรับการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ไอร์ออน(II)ซัลไฟด์ร้อยละ 2.5 บนถ่านกัมมันต์ ให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันเป็น 53.3 และตัวเร่งปฏิกิริยาไอร์ออน(II)ซัลเฟต ให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเป็น 53.7 ซึ่งจะเห็นว่าเพิ่มจากกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีการเปลี่ยน ในกรณีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้อนุมูลอิสระจากกะลาปาล์มรับไฮโดรเจนได้ดี โดยเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม ในส่วนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์กากของแข็งมีค่าลดลง เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา (ตารางที่ 4.8) จากร้อยละ 33 (กรณีไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา) สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา ไอร์ออน(II)ซัลเฟต ไอร์ออน(III)ซัลไฟด์ร้อยละ 2.5 บนถ่านกัมมันต์ ไอร์ออน(II)ซัลไฟด์ และแคลเซียมออกไซด์ ผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลงเป็น 25.3, 19.9, 15.6 และ 23.6 ตามลำดับ

เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฐานเหล็กทั้ง 4 ชนิด จะช่วยให้ร้อยละการเปลี่ยนสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (ตารางที่ 4.8) จากเดิมร้อยละ 67 (ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา) เพิ่มเป็น ร้อยละ 74.7, 80.2, 84.4 และ 76.4 สำหรับการใส่ตัวเร่ง ไอร์ออน(II)ซัลเฟต ไอร์ออน(III)ซัลไฟด์ร้อยละ 2.5 บนถ่านกัมมันต์ ไอร์ออน(II)ซัลไฟด์ และแคลเซียมออกไซด์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าร้อยละการเปลี่ยนกะลาปาล์มสูงสุด คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไอร์ออน(II)ซัลไฟด์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al. (2001) และ Kaneko et al. (2000) ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาฐานเหล็กต่อกระบวนการแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลว พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาฐานเหล็กมีผลต่อร้อยละการเปลี่ยน นั่นคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาฐานเหล็กช่วยสนับสนุนการเกิดผลิตภัณฑ์ (แก๊ส+น้ำ) มากกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่จะสนับสนุนการเกิดผลิตภัณฑ์น้ำมัน

จากตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ขึ้นกับอุณหภูมิ สำหรับกรณีใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีค่าความร้อนสูงสุด คือ 31.6 เมกะจูล ต่อ กิโลกรัม กรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ในการแปรรูปที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการอภิปรายต่อไปในผลการวิเคราะห์ GC/MS ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

อันเนื่องมาจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแปรรูปทำให้เป็นของเหลวมีปริมาณ ออกซิเจนลดลงอันเนื่องมาจากการรีดักชัน (Reduction) ออกซิเจนกับน้ำ ด้วยไฮโดรเจน (ตารางที่ 4.8) ในกะลาปาล์มและตัวทำละลาย ซึ่งส่งผลต่อค่าความร้อนดังได้กล่าวมาข้างต้น (Yuan et al., 2007) ยกเว้นในกรณีที่ไมใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าอัตราส่วน H/C ของผลิตภัณฑ์ น้ำมันลดลง (ยกเว้นที่ไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา) ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ นั่นคือ ตัวเร่งปฏิกิริยา ทุกตัวในการทดลองมีความหวังใจในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็น ของเหลวในภาวะตัวทำละลายเหนือวิกฤต โดยส่งผลทั้งร้อยละการเปลี่ยนกะลาปาล์ม และร้อยละ ผลได้ของผลิตภัณฑ์



**รูปที่ 4.7** ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของการแปรรูปกะลาปาล์ม ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เวลา 40 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล และอัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 (ในวงเล็บ คือ ร้อยละการเปลี่ยน)

ตารางที่ 4.8 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

ตัวเร่งปฏิกิริยา	-			FeS			FeSO <sub>4</sub>			Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub> /C			CaO		
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	230	290	320	230	290	320	230	290	320	230	290	320	230	290	320
ร้อยละการเปลี่ยนแปลง	39.9	73.3	67.0	39.5	68.7	84.4	43.7	73.1	74.7	40.1	68.6	80.2	25.4	62.2	76.4
ร้อยละผลได้ (daf)															
น้ำมัน	25.0	45.0	52.6	25.1	41.9	57.7	25.1	43.1	53.7	25.6	40.6	53.3	12.6	41.5	63.6
แก๊ส + น้ำ	14.9	28.4	14.4	14.4	26.9	26.7	18.6	30.1	21.0	14.5	28.1	26.8	12.8	20.7	12.8
ของแข็ง	60.1	26.7	33.0	60.5	31.3	15.6	56.3	26.9	25.3	59.9	31.4	19.9	74.6	37.8	23.6
ค่าความร้อน (MJ/Kg)															
น้ำมัน	26.4	25.6	31.0	25.6	28.8	30.0	24.6	27.1	27.7	24.8	31.7	29.9	27.6	29.6	31.6
ของแข็ง	15.8	11.6	12.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
วิเคราะห์น้ำมันแบบแยกธาตุ(ร้อยละโดยน้ำหนัก) (dry basis)															
คาร์บอน(C)	44.7	44.3	43.7	52.7	54.3	65.5	46.2	58.1	58.5	56.4	60.2	65.9	59.4	56.9	66.7
ไฮโดรเจน (H)	4.3	3.5	2.8	5.8	6.5	7.8	5.6	6.8	6.7	7.4	7.2	7.6	7.5	7.4	8.0
ไนโตรเจน (N)	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.5	0.5
ออกซิเจน (O)	50.6	51.8	53.1	40.9	38.6	26.2	47.8	34.6	34.3	35.6	32.1	25.9	32.4	35.2	24.8

\*ภาวะการทดลองคือ อุณหภูมิ 230, 290 และ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5

### 4.3 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วย GC/MS

#### 4.3.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการแปรรูปกะลาปาล์มให้เป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 230 และ 320 องศาเซลเซียส เวลา 40 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ ไอร์ออน(III)ซัลไฟด์ บนถ่านกัมมันต์ ไอร์ออน(II)ซัลไฟด์ ไอร์ออน(II)ซัลเฟต และแคลเซียมออกไซด์ ผลิตภัณฑ์น้ำมันถูกนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง GC/MS พบว่ากลุ่มผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มีลักษณะคล้ายกัน และแตกต่างกันบ้างขึ้นกับชนิดตัวทำละลายดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปในภาคผนวก ค

สำหรับกรณีการแปรรูปกะลาปาล์มที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่ากลุ่มผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มีลักษณะคล้ายกัน จะแตกต่างกันบ้าง ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ที่มีการแบ่งตามหมู่ฟังก์ชัน

จากตารางที่ 4.9 พบว่าผลิตภัณฑ์หลักในน้ำมันที่ได้ คือ กลุ่มของสารประกอบฟีนอลิก และเอสเทอร์ กรณีการแปรรูปที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีสารประกอบฟีนอลิกเป็นองค์ประกอบหลักมีสูงถึงร้อยละ 63.9 เนื่องจากลิกนินในกะลาปาล์มมีหน่วยของฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane unit) สูง ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของการเกิดสารประกอบฟีนอล (Yuan et al., 2007) ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า ลิกนินสามารถสลายตัวเป็นสารตั้งต้นในการใช้ผลิตอนุพันธ์ฟีนอลิก

จากผลการแปรรูปที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าตัวเร่ง ไอร์ออน(II)ซัลไฟด์ ช่วยเพิ่มปริมาณสารประกอบฟีนอลิกได้สูงสุด เป็นร้อยละ 41.6 เมื่อเทียบกับกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละ 36.2) ส่วนการแปรรูปที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไอร์ออน(III)ซัลไฟด์ร้อยละ 2.5 บนถ่านกัมมันต์ ช่วยเพิ่มร้อยละของสารในกลุ่มเอสเทอร์ได้สูงสุดเป็น 44.9 เมื่อเทียบกับกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละ 21.4)



ตารางที่ 4.9 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เหลวที่วิเคราะห์ด้วย GC/MS

Solvent	Ethanol					
	230		320			
Catalyst	No Cat.	No Cat.	Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub> /C	FeSO <sub>4</sub>	FeS	CaO
Area%						
Phenolic compound	63.9	36.2	36.5	40.3	41.6	29.0
Alcohol	1.2	-	-	-	5.4	-
Ether	-	7.8	-	-	10.3	-
Ester	12.0	27.4	44.9	29.1	27.3	43.4
Silane	-	7.1	-	7.7	8.6	-
Ketone	-	-	1.8	-	-	0.9
<i>Total</i>	77.1	78.5	83.2	77.1	93.2	73.3

#### 4.3.2 ผลของตัวทำละลาย

จากการแปรรูปกะลาปาล์มให้เป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เวลา 40 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 ความเข้มข้นเอทานอล 50%, 70%, 90%, 95% และ 95%\* (เอทานอลทางการค้า) นอกจากนี้ยังมีเอทานอลบริสุทธิ์ อะซิโตน และเอทิลอะซิเตตเป็นตัวทำละลาย กรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์น้ำมันถูกนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง GC/MS พบว่ากลุ่มผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มีลักษณะคล้ายกัน และแตกต่างกันบ้างขึ้นกับชนิดตัวทำละลายดังแสดงในตารางที่ 4.10

จากตารางที่ 4.10 การแปรรูปกะลาปาล์มโดยใช้ตัวทำละลาย เอทานอล และเอทิลอะซิเตต ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีสารประกอบฟีนอลิกและเอสเทอร์เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนการแปรรูปใช้ตัวทำละลายอะซิโตนให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีองค์ประกอบหลักอยู่ในกลุ่มคีโตนสูงถึงร้อยละ 54.7 ต่างจากการแปรรูปใช้ตัวทำละลายเอทานอลและเอทิลอะซิเตตที่ไม่มีสารประกอบในกลุ่มคีโตน เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกันเองของอะซิโตน (Aldol condensation) ในสภาวะการทดลองนี้ ทำให้ลดสมบัติในการเป็นตัวทำละลาย สารประกอบในผลิตภัณฑ์น้ำมันจึงลดลง เห็นได้จากน้ำมันมีสารประกอบฟีนอลิกที่เหลือเพียงร้อยละ 18.8 ซึ่งถ้าหากการแปรรูปใช้ตัวทำละลายเอทานอล และเอทิลอะซิเตตจะให้น้ำมันมีสารประกอบฟีนอลิกสูงถึงร้อยละ 36.2 และ 61.4 ตามลำดับ

ในส่วนของการแปรรูปใช้สารละลายเอทานอล 50% ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีสารประกอบฟีนอลสูงถึงร้อยละ 73.6 และมีเอสเทอร์เพียงร้อยละ 11.1 ดังนั้นหากต้องการผลิตภัณฑ์ที่มี

ตารางที่ 4.10 ผลของชนิดตัวทำละลายต่อองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เหลวที่วิเคราะห์ด้วย GC/MS

Solvent	Ethanol	Ethyl acetate	Acetone	Ethanol Solution				
				Concentration (%)	95	95*	90	70
				Area%				
Phenolic compound	36.2	61.4	18.8	50.0	46.1	61.9	58.0	73.6
Alcohol	-	-	4.9	-	-	-	-	-
Ether	7.8	3.0	-	-	-	-	-	-
Ester	27.4	10.2	-	23.9	23.1	18.3	23.9	11.1
Silane	7.1	-	-	-	4.9	-	-	-
Amide	-	1.1	-	-	-	-	-	-
Ketone	-	-	54.7	-	3.9	4.6	3.7	-
Benzene	-	-	5.4	-	3.4	-	2.2	-
Benzoic acid	-	-	-	-	-	-	-	-
Pyrimidine	-	-	2.8	-	-	-	-	-
Alkyne	-	-	-	0.6	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>78.5</b>	<b>75.7</b>	<b>86.6</b>	<b>74.5</b>	<b>81.4</b>	<b>84.8</b>	<b>87.8</b>	<b>84.7</b>

\*สารละลายเอทานอล 95% ทางการค้า

สารประกอบในกลุ่มฟีนอลเป็นผลิตภัณฑ์ กระบวนการแปรรูปที่เหมาะสม คือ ใช้สารละลายเอทานอล 50%

จากตารางที่ 4.13 จะเห็นได้ว่ามีฟีนอลเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในผลิตภัณฑ์ของเหลว ซึ่งถือเป็นสารเคมีที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรม ในช่วงแรกพบในอุตสาหกรรมสี ย้อม และการผลิตยา แอสไพริน และใช้เป็นสารฆ่าเชื้อ ส่วนอนุพันธ์ถูกใช้ในการผลิต อีพอกซีเรซิน พอลีคาร์บอนเนต พลาสติก นอกจากนี้ยังใช้ผลิตเครื่องสำอางและยาที่ต้องการให้เซลล์ที่ตายแล้วหลุดออกไป รวมถึงผลิตภัณฑ์ป้องกันแดด เป็นต้น โดยตัวอย่างโครงสร้างสารประกอบหลักแสดงไว้ใน ภาคผนวก ง3

จากการแปรรูปที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส นอกจากองค์ประกอบหลักเป็นฟีนอลที่มีความบริสุทธิ์สูงแล้ว ยังมีเอทิลพาราเบน ที่ใช้เป็นสารแอนตี้ไมโครไบโอด ซึ่งช่วยรักษาสภาพของเครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์อาหารและยา อีกด้วย

จากตารางที่ 4.11 แสดงผลตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ไอร์ออน(II)ซัลไฟด์ ช่วยเพิ่มสัดส่วนของฟีนอล เป็น 29.9 เทียบกับกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (23.4) ตามมาด้วย ไอร์ออน(II)ซัลเฟต

ส่วน ไอร์ออน(III)ซัลไฟด์ร้อยละ 2.5 บนถ่านกัมมันต์ และ แคลเซียมออกไซด์มีสัดส่วนของฟีนอลลดลงเหลือเพียง 22.8 และ 16.2 ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.12 แสดงผลของตัวทำละลายต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยองค์ประกอบหลักที่ได้คือ ฟีนอล จะเห็นได้ว่า ตัวทำละลายเอทิลอะซิเตดให้ร้อยละของฟีนอลสูงสุด คือ ร้อยละ 54.9 ดังนั้นหากต้องการผลิตฟีนอลให้ได้ปริมาณสูงอาจต้องเลือกใช้เอทิลอะซิเตดเป็นตัวทำละลาย

ในส่วนของสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 90% ให้ร้อยละฟีนอลสูงสุด คือร้อยละ 33.6 ตามมาด้วยสารละลายเอทานอล 50%, 70% และ 95% แต่ในการใช้สารละลายเอทานอล 95%\* ทางการค้านี้กลับให้ปริมาณฟีนอลที่ลดลง

#### 4.3.4 องค์ประกอบสารที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย GC/MS โดยละเอียด

จากแบบจำลองโครงสร้างของสายโพลีเมอริคินิน (รูปที่ 2.3) จะสังเกตได้ว่า สารประกอบฟีนอลิกที่ได้ ตัวอย่างเช่น 2-Methoxyphenol และ 4-Ethyl-2-methoxyphenol เป็นตัวต้นๆ ที่เกิดจากการสลายของลิกนิน ในส่วนของสารประกอบเอสเทอร์ได้จากสารประกอบเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส (Chunbao, 2007)

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ในการแปรรูปกะลาปาล์มไปเป็นผลิตภัณฑ์เหลวช่วยเพิ่มการแตกตัวขององค์ประกอบภายในกะลาปาล์มที่มีอยู่ในองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มและน้ำมันเคอร์เนลออกมา (ภาคผนวก ง1-ง2) โดยผ่านกระบวนการเช่นเดียวกับการผลิตน้ำมันปาล์ม ทำให้องค์ประกอบเอสเทอร์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่วนสารประกอบในฟีนอลิกมีปริมาณลดลง ซึ่งเห็นได้ชัดในส่วนของสารประกอบฟีนอล ที่เหลือเพียงร้อยละ 16.2 ดังตาราง 4.11 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาฐานเหล็ก ปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ได้สูงกว่ากรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

จากตารางที่ 4.12 และภาคผนวก ค พบว่าผลของสารละลายเอทานอลต่อผลิตภัณฑ์ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีองค์ประกอบต่างกันเล็กน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่ำจะทำให้ สารประกอบฟีนอลิกเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีการดึงน้ำออกจากโครงสร้างตั้งต้นแล้วจัดเรียงตัวใหม่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบลดลงส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้มีค่าสูงขึ้นถึงแม้อัตราส่วน H/C จะมีค่าต่ำกว่าการใช้เอทานอลบริสุทธิ์ก็ตาม

ตารางที่ 4.11 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแปรรูปกะลาปาล์ม

Functional Group	Solvent	Ethanol					
		Temperature (°C)	230		320		
			Catalyst	-	-	Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub> /C	FeSO <sub>4</sub>
Area%							
<b>Phenolic compound</b>							
	Phenol	63.9	23.4	22.8	26.8	29.9	16.2
	2-Methylphenol	-	-	-	-	-	1.0
	2-Methoxyphenol	-	3.2	2.9	3.5	3.3	2.6
	2-Ethylphenol	-	2.4	3.3	2.8	2.7	4.0
	2-methoxy-4-methylphenol	-	1.9	2.0	2.1	1.5	1.6
	4-Ethyl-2-methoxyphenol	-	2.5	2.8	2.6	2.0	2.3
	2-methoxy-4-propyl-phenol	-	2.8	2.6	2.7	2.2	1.3
<b>Alcohol</b>							
	3-methyl-2-Pentanol	-	-	-	-	5.4	-
	2-Furylmethanol	1.2	-	-	-	-	-
<b>Ether</b>							
	2-ethoxy-butane	-	7.8	-	-	10.3	-
<b>Ester</b>							
	Ethyl .alpha.-hydroxybutyrate	-	2.4	1.0	3.1	3.1	3.5
	Ethyl ethoxyacetate	-	1.5	1.0	1.6	1.7	-
	Butyrolactone	-	1.0	-	1.1	-	-
	Ethyl 3-hexenoate	-	-	0.5	0.5	-	1.4
	Ethyl 2-hexenoate	-	1.1	1.0	1.3	2.3	2.4
	Ethyl levulinate	-	-	0.7	-	-	-
	Isobutyl butanoate	-	7.1	5.9	7.0	8.1	13.4
	Ethyl benzoate	-	0.9	1.1	0.9	1.0	1.2
	Diethylsuccinate	-	2.3	2.3	2.2	2.4	1.2
	Diethylglutarate	-	3.2	2.8	3.0	3.1	0.6
	Ethyl 4-methoxybenzoate	-	0.5	0.7	-	-	1.7
	Ethylparaben	12.0	2.1	1.3	1.9	-	-
	Ethyl laurate	-	-	2.9	2.4	-	1.8

Functional Group	Solvent	Ethanol					
		Temperature (°C)		320			
		230		Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub> /C	FeSO <sub>4</sub>	FeS	CaO
Catalyst		-	-	-	-	-	-
Area%							
	Ethyl undecanoate	-	2.5	-	-	2.8	-
	Ethyl phthalate	-	-	18.8	-	-	12.2
	Ethyl myristate	-	-	1.0	0.8	-	0.9
	Ethyl palmitate	-	2.8	4.0	3.4	2.8	3.2
<b>Silane</b>							
	Triethylsilane	-	7.1	-	7.7	8.6	-
<b>Ketone</b>							
	2,3-Dimethyl-2-cyclopentenone	-	-	1.8	-	-	-
	3,5,5-Trimethyl-2-cyclohexenone	-	-	-	-	-	0.9
<b>Total area</b>		77.0	78.5	83.1	77.0	93.2	73.2

ตารางที่ 4.12 ผลของตัวทำละลายต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแปรรูปกะลาปาล์ม

Functional Group	Solvent	EtOH	EtOAc	Acetone	Ethanol Solution				
					Concentration (%)				
					95	95*	90	70	50
Temperature (°C)		320							
Area%									
<b>Phenolic compound</b>									
	Phenol	23.4	54.9	16.6	23.9	22.9	33.6	25.9	30.4
	2-Methylphenol	-	-	-	1.2	1.3	1.1	0.5	-
	4-Methylphenol	-	-	-	-	-	-	0.6	-
	2-Methoxyphenol	3.2	4.5	2.2	4.3	4.2	6.3	4.9	5.2
	2-Ethylphenol	2.4	-	-	2.4	2.5	2.5	1.1	1.6
	4-ethylphenol	-	-	-	-	0.4	-	-	-
	4-ethylphenol	-	-	-	-	-	0.7	1.0	1.3
	2-methoxy-4-methylphenol	1.9	-	-	2.7	2.6	3.3	2.0	2.8
	4-Ethyl-2-methoxyphenol	2.5	2.0	-	4.2	4.3	5.5	5.7	6.4

Functional Group	Solvent	EtOH	EtOAc	Acetone	Ethanol Solution				
					95	95*	90	70	50
Concentration (%)									
Temperature (°C)		320							
Area%									
	2,6-Dimethoxyphenol	-	-	-	3.5	3.4	3.7	12.0	16.1
	2-methoxy-4-propyl-phenol	2.8	-	-	4.9	4.5	5.3	4.3	5.4
	2,6-Dihydroxy-4-methoxyacetophenone	-	-	-	2.8	-	-	-	4.4
<b>Alcohol</b>									
	Diacetone alcohol	-	-	4.9	-	-	-	-	-
<b>Ether</b>									
	2-ethoxy-butane	7.8	-	-	-	-	-	-	-
	Phenyl propyl ether	-	3.0	-	-	-	-	-	-
<b>Ester</b>									
	Butyl acetate	-	-	-	-	-	1.3	-	-
	Ethyl .alpha.-hydroxybutyrate	2.4	-	-	-	1.0	-	-	-
	Ethyl ethoxyacetate	1.5	-	-	1.2	1.5	0.9	-	-
	Butyrolactone	1.0	-	-	0.5	-	-	0.5	-
	Ethyl 2-hexenoate	1.1	-	-	-	0.6	-	-	-
	Ethyl levulinate	-	-	-	0.9	0.8	0.6	0.9	-
	Isobutyl butanoate	7.1	-	-	-	-	-	-	-
	Ethyl benzoate	0.9	1.7	-	0.8	0.9	0.8	-	-
	Diethylsuccinate	2.3	1.8	-	1.9	1.8	2.1	0.7	-
	Diethyl methylsuccinate	-	-	-	0.7	0.6	-	-	-
	Diethylglutarate	3.2	-	-	2.2	2.2	1.6	1.2	-
	3-Methoxy-4-Hydroxybenzoic acid	-	-	-	1.1	0.9	-	1.9	2.1
	Ethyl 4-methoxybenzoate	0.5	-	-	0.6	0.6	-	-	-
	Ethylparaben	2.1	-	-	1.0	0.8	-	-	-
	Ethyl laurate	-	-	-	4.0	3.4	4.1	3.5	2.8
	Ethyl undecanoate	2.5	3.3	-	-	-	-	-	-
	Ethyl myristate	-	-	-	1.9	1.5	1.7	2.1	1.2
	Ethyl palmitate	2.8	3.5	-	5.2	4.6	5.2	5.8	3.8

Functional Group	Solvent	EtOH	EtOAc	Acetone	Ethanol Solution				
					Concentration (%)	95	95*	90	70
					Temperature (°C)				
					320				
					Area%				
	Ethyl Oleate	-	-	-	2.0	2.0	-	3.7	1.2
	Ethyl Stearate	-	-	-	-	-	-	3.7	-
<b>Silane</b>									
	Triethylsilane	7.1	-	-	-	4.9	-	-	-
<b>Ketone</b>									
	Isobutenyl methyl ketone	-	-	39.7	-	-	-	-	-
	3-Methyl-2-cyclopentenone	-	-	-	-	-	1.4	-	-
	2,3-Dimethyl-2-cyclopentenone	-	-	-	-	1.3	1.1	-	-
	3,5-dimethyl-2-cyclohexen-1-one	-	-	2.8	-	-	-	-	-
	2,6-dimethyl-2,5-Heptadien-4-one	-	-	2.8	-	-	-	-	-
	3,5,5-Trimethyl-2-cyclohexenone	-	-	9.5	-	-	-	-	-
	Hydroquinone mono-TMS	-	-	-	-	2.6	2.2	3.7	-
<b>Benzene</b>									
	1,2,3-Trimethylbenzene	-	-	5.4	-	-	-	-	-
	1,2-Dihydroxy-3-methoxybenzene	-	-	-	-	-	-	2.2	-
	1,1'-propylidenebisbenzene	-	-	-	-	3.4	-	-	-
<b>Aromatic Hydrocarbon</b>									
	2-ethyldiphenylmethane	-	-	-	-	-	-	-	6.3
<b>Pyrimidine</b>									
	2,6-Dimethyl-4-aminopyrimidine	-	-	2.8	-	-	-	-	-
<b>Alkyne</b>									
	1-Ethyl-2-propylacetylene	-	-	-	0.6	-	-	-	-
<b>Total area</b>		78.5	75.7	86.5	74.4	81.4	84.8	87.9	91.0

### 4.3.3 ตัวทำละลายที่ใช้แล้ว

จากการนำตัวทำละลายที่ใช้แล้วมาวิเคราะห์ GC/MS ดังแสดงในตารางที่ 4.12 เพื่อหาองค์ประกอบพบว่าองค์ประกอบหลักที่มีในตัวทำละลายอยู่ในกลุ่มแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นกลุ่มเดียวกับตัวทำละลายตั้งต้น ตามมาด้วยกลุ่มของคีโตนที่มาจากการใช้ชะล้างผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนการถ่ายสาร และมีสารประกอบเอสเทอร์เล็กน้อย เนื่องจากอาจมีผลิตภัณฑ์บางส่วนออกมาพร้อมกับการระเหยในระบบสุญญากาศเพื่อแยกตัวทำละลาย

จากตารางที่ 4.14 พบว่าเอทานอลซึ่งเป็นตัวทำละลายในแปรรูปเป็นองค์ประกอบหลักอยู่สูงกว่าร้อยละ 50 และมีส่วนของอะซิโตนซึ่งเป็นตัวชะล้างผลิตภัณฑ์อยู่ร่วมด้วยร้อยละ 25 - 40 และมีองค์ประกอบอื่นเล็กน้อย ไม่ว่าจะเป็นเอสเทอร์ อีเทอร์ และแอลดีไฮด์ ซึ่งเป็นส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ออกมาพร้อมกับตัวทำละลายในการระเหยระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบในตัวทำละลายที่ใช้แล้วที่วิเคราะห์ด้วย GC/MS

Solvent	Ethanol Solution	Ethanol		
Concentration (%)	90	-		
Temperature (°C)	320			
Catalyst	-	FeSO <sub>4</sub>	FeS	
		Area%		
Alcohol	54.4	57.1	50.8	50.8
Ether	1.4	-	1.9	2.6
Ester	7.7	9.2	8.1	10.0
Aldehyde	-	0.6	-	-
Ketone	24.8	29.1	39.2	35.9
<i>Total</i>	88.3	96.0	100.0	99.3



ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ GC/MS จากตัวทำละลายที่ผ่านการใช้ในการแปรรูปกะลาปาล์ม

Functional Group	Solvent	Ethanol			
		Concentration (%)	90	-	
	Temperature (°C)	320			
	Catalyst	-	Fe <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	FeS	
		Area%			
Alcohol	Ethanol	54.4	57.1	50.8	50.8
Ether	1,1-Diethoxyethane	1.4	-	1.1	-
	1,2-Diethoxyethane	-	-	-	1.9
	2,2 Diethoxypropane	-	-	0.8	0.7
Ester	Ethyl acetate	7.7	9.2	8.2	10.0
Aldehyde	Propylene aldehyde	-	0.6	-	-
Ketone	Acetone	24.8	29.1	39.2	35.9
<i>Total area</i>		88.4	96.0	100.0	99.3

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษากระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต ในช่วงอุณหภูมิ 230 - 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 0 - 4.13 เมกะพาสคัล อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกะลาปาล์มตั้งแต่ 7.5 - 30 เวลา 20 - 60 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ไอร์รอน(III)ซัลไฟด์บนถ่านกัมมันต์ ไอร์รอน(II)ซัลไฟด์ ไอร์รอน(II)ซัลเฟต และแคลเซียมออกไซด์

##### 1. ผลของตัวแปรต่อปริมาณน้ำมัน

- การเพิ่มเวลามีผลต่อการเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวเพียงเล็กน้อย
- การเพิ่มความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นมีผลทำให้ร้อยละการเปลี่ยนกะลาปาล์ม และผลได้ของของเหลวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สัดส่วนการกระจายตัวผลิตภัณฑ์ของเหลวและแก๊สค่อนข้างคงที่
- การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์มและร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้น จนถึงอุณหภูมิอุณหภูมิหนึ่งร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกะลาปาล์มลดลง แต่ร้อยละผลได้ของเหลวยังคงสูงขึ้น

##### 2. ผลของตัวทำละลาย

- อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกะลาปาล์มที่ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดคือ 30
- ชนิดของตัวทำละลายที่เหมาะสมจากการศึกษานี้คือ เอทานอล 99.99%
- ตัวทำละลายผสมที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวสูงคือ เอทานอล 95% ทางการค้า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับตัวทำละลาย เอทานอล 99.99% ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลวที่ต่ำกว่า

##### 3. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

- การเติมตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ไอร์รอน(III)ซัลไฟด์ร้อยละ 2.5 บนถ่านกัมมันต์ ไอร์รอน(II)ซัลไฟด์ ไอร์รอน(II)ซัลเฟต และแคลเซียมออกไซด์ ช่วยเพิ่มร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลว โดย ไอร์รอน(III)ซัลไฟด์ร้อยละ 2.5 บนถ่านกัมมันต์ และ ไอร์รอน(II)ซัลเฟต

ให้ผลเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ตามด้วย ไฮดรอกซิด (OH) ซัลไฟด์ และ แคลเซียมออกไซด์ทำให้  
ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นสูงสุด

4. ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแปรรูปกะลาปาล์มด้วยการทำให้เป็นของเหลวในตัวทำละลายเหนือภาวะวิกฤต ช่วยเพิ่มค่าความร้อนให้แก่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากเดิมกะลาปาล์มมีค่าความร้อนเพียง 15.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม แต่เมื่อเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์เหลวมีค่าความร้อน 24.2 - 31.7 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

5. องค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่สังเคราะห์ได้คือ สารประกอบฟีนอลิก สารประกอบเอสเทอร์ และสารประกอบอีเทอร์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกลือโลหะแอลคาไลน์ที่ใช้ในกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในน้ำมันปาล์ม เช่น โพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ), โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เป็นต้น โดยศึกษาการเตรียมแคลเซียมออกไซด์บนตัวรองรับเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีตัวรองรับ
2. ศึกษากระบวนการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยการลดปริมาณออกซิเจน คือ Catalytic hydrodeoxygenation เพื่อเพิ่มค่าความร้อนผลิตภัณฑ์น้ำมัน
3. ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์โดยการขยายขนาดการทดลองใหญ่ขึ้น

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. การผลิตเอทานอลจากชีวมวลปาล์มน้ำมัน[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.rdi.ku.ac.th>. [2552, มีนาคม 22]
- มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. ชีวมวล[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.efe.or.th>. [2552, มีนาคม 22]
- วรรณุช แจ้งสว่าง. พลังงานหมุนเวียน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท แอคทิฟ พรีนซ์ จำกัด, 2551.
- วิกิพีเดีย. สารานุกรมเสรี. ปาล์มน้ำมัน[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://th.wikipedia.org>. [2552, มีนาคม 22]
- วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. ปฏิกิริยาเร่งเคมีเกี่ยวกับผิวและปิโตรเคมี. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2547.
- ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล. ชีวมวล. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : คิว พรีนซ์ แมเนจเม้นท์, 2549.
- ไทยซูมิ. บริษัท. การส่งเสริมการใช้พลังงานจากชีวมวลของประเทศไทย[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/chevamul.php>. [2552, มีนาคม 22]

### ภาษาอังกฤษ

- Available from : <http://www.canadianbiofuel.ca/biomassfuel.html>
- Available from : [learners.in.th/file/dawood/view/83293](http://learners.in.th/file/dawood/view/83293)
- Available from : [www.fao.org/docrep/006/t0309e/t0309e01.htm](http://www.fao.org/docrep/006/t0309e/t0309e01.htm)
- Available from : [charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/chevamul.php](http://charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/chevamul.php)
- Available from : [http://www.le.ac.uk/chemistry/greenchem/supercritical\\_fluids.htm](http://www.le.ac.uk/chemistry/greenchem/supercritical_fluids.htm)
- ASTM Standard, D2015. Gross Calorific Values of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter : American Standard Society for Testing and Materials. U.S.A., 1989.
- ASTM Standard, D3173. Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke : American Society for Testing and Materials. U.S.A., 1989.
- ASTM Standard, D3174. Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke : American Society for Testing and Materials. U.S.A., 1989.

- ASTM Standard, D3175. Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke : American Society for Testing and Materials. U.S.A., 1989.
- Sothanapan U. and Pavowat R., Principle of Supercritical Fluid. J. STRECU 3 (1993): 37.
- Alvin B. S. and Theodore A. K. Catalyst Manufacture. 2 nd ed. New York : Marcell Dekker, 1995.
- Antal MJ., Allen S., Schulman D., Xu X., Divilio RJ., Biomass gasification in supercritical water. Ind Eng Chem. 39, 2000, 4040-53.
- Chunbao X., Timothy E., Hydro-liquefaction of woody biomass in sub- and super-critical ethanol with iron-based catalysts. Fuel 87 (2008): 335–345.
- Liu Z., Zhang F., Effects of various solvents on the liquefaction of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. Energy Conversion and Management 49 (2008): 3498-3504.
- Sangon S., Ratanavaraha S., Ngamprasertsith S., Prasassarakich P., Coal liquefaction using supercritical toluene-tetralin mixture in a semi-continuous reactor. Fuel Process Technol 87 (2006): 201-207.
- Selhan K., Thallada B., Akinori M., Yusaku S., Azhar U., Low temperature hydrothermal treatment of biomass: effect of reaction parameters on products and boiling point distributions. Energy Fuels 18 (2004): 234-41.
- Thring RW., Breau J., Hydrocracking of solvolysis lignin in a batch reactor, Fuel (75): 1996, 795-800.
- Toshiaki K., Atsushi I., Yasushi D., Tritium as a tracer in coal liquefaction. 1. Hydrogen mobility of tetralin under coal liquefaction conditions. Ind Eng Chem 30 (1991): 1755-9.
- Wang G., Li W., Chen H., Li B., The direct liquefaction of sawdust in tetralin. Energy Sources, Part A 29 (2007): 1221-1231.
- Xu C., Donald J., Upgrading peat to gas and liquid fuels in supercritical water with catalysts. Fuel, 2008, (In press).
- Xu C., Lad N., Production of Heavy Oils with High Calorific Values by Direct Liquefaction of Woody Biomass in Sub/Near- critical Water. Energy & Fuels (2008): 635–642.
- Xu X., Matsumura Y., Stenberg J., Antal MJ. JR, Carbon-catalyzed gasification of organic feedstocks in supercritical water. Ind Eng Chem 35 (1996): 2522-30.

Yuan X.Z., Li H., Zeng G.M., Tong J.Y. and Xie W., Sub- and supercritical liquefaction of rice straw in the presence of ethanol-water and 2-propanol-water mixture. Energy 32 (2007): 2081-2088.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### การคำนวณและข้อมูลการทดลอง

#### 1. การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนกะลาปาล์ม

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์ม (daf)} = 100 [(W_{\text{daf}} - W_{\text{R}}) / W_{\text{daf}}]$$

#### 2. การคำนวณร้อยละผลได้ของเหลว

$$\text{ร้อยละผลได้ของเหลว (daf)} = 100 [W_{\text{Liq}} / W_{\text{daf}}]$$

#### 3. การคำนวณร้อยละผลได้ของแข็ง

$$\text{ร้อยละผลได้ของแข็ง (daf)} = 100 [W_{\text{R}} / W_{\text{daf}}]$$

#### 4. การคำนวณร้อยละผลได้แก๊สผลิตภัณฑ์

$$\text{ร้อยละผลได้แก๊สผลิตภัณฑ์ (daf)} = 100 - \text{ร้อยละผลได้ของเหลว} - \text{ร้อยละผลได้ของแข็ง}$$

โดย

$$W_{\text{daf}} = \text{น้ำหนักถ่านหินที่ปราศจากความชื้นและเถ้า}$$

$$W_{\text{R}} = \text{น้ำหนักกากที่ปราศจากความชื้นและเถ้า}$$

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

#### ตัวอย่างการคำนวณ

ภาวะของการทดลอง; อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อกะลาปาล์มเท่ากับ 7.5 ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา

#### การคำนวณ

$$\text{น้ำหนักกะลาปาล์ม (Dry and ash free basis)} = 17.80 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักผลได้ของเหลว} = 9.508 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักกากของแข็ง (Dry and ash free basis)} = 2.881 \text{ กรัม}$$

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์ม} = \frac{100 \times (17.80 - 2.881)}{17.80} = 83.81$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของเหลว} = \frac{100 \times (9.508 / 17.80)}{17.80} = 53.41$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของแข็ง} = \frac{100 \times (2.881 / 17.80)}{17.80} = 16.19$$

$$\text{ร้อยละผลได้แก๊ส} = 100 - 53.41 - 16.19 = 30.40$$



## ภาคผนวก ข

### วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของกะลาปาล์ม

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

##### 1.1 ความชื้น (Moisture): ASTM D3173

###### หลักการ

นำตัวอย่างกะลาปาล์มบด ที่ร่อนผ่านตะแกรง 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไอน้ำระเหยจากกะลาปาล์ม ค่าความชื้นคำนวณได้จากน้ำหนักกะลาปาล์มที่หายไป

###### เครื่องมือ

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

###### วิธีการทดลอง

1. อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying oven) 104 - 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิคเคเตอร์ (Desiccator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งแล้วบันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนักแล้ว บันทึกน้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน
3. นำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104 - 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักตัวอย่างคงที่
4. นำถาดอลูมิเนียมออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง แล้วนำเข้าเดสิคเคเตอร์ประมาณ 15 นาที แล้วชั่งถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างอบแล้วอยู่ภายในบันทึกผล

###### การคำนวณ

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$M = 100(W_1 - W_2) / W$$

- เมื่อ M = ร้อยละของความชื้น
- $W_1$  = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นก่อนอบ(กรัม)
- $W_2$  = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นหลังอบ(กรัม)
- W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

## 1.2 เถ้า (Ash): ASTM D3174

### หลักการ

นำตัวอย่างกะลาปาล์มที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ร้อยละปริมาณเถ้าคำนวณจากน้ำหนักที่เหลืออยู่หลังจากการเผา

### เครื่องมือ

1. เตาเผา
2. ถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา
3. เดสิคเคเตอร์

### วิธีการทดลอง

1. เเผครูชีเบลพร้อมฝาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครูชีเบลพร้อมฝา
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ครูชีเบล ประมาณ 1 กรัม
3. นำไปเผาบนตะเกียงบนเซนจนควันระเหยหมด
4. ใส่ครูชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่
5. นำครูชีเบลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิคเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

### การคำนวณ

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = 100(W_3 - W_4) / W$$

- เมื่อ A = ร้อยละของเถ้า
- $W_3$  = น้ำหนักของครูชีเบลพร้อมฝาที่มีเถ้า (กรัม)
- $W_4$  = น้ำหนักของครูชีเบลพร้อมฝา (กรัม)
- W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

### 1.3 ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter): ASTM D3175

#### หลักการ

นำตัวอย่างกะลาปาล์มที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร ให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อ (Tubular Furnace) ปริมาณสารระเหยคำนวณได้จากน้ำหนักของตัวอย่างถ่านหินที่หายไป

#### เครื่องมือ

1. เตาเผาแบบท่อ
2. ครูชีเบลทำจากนิเกิลพร้อมฝา
3. เดสิคเคเตอร์

#### วิธีการทดลอง

1. เมาครูชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักครูชีเบลพร้อมฝา บันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างใส่ในครูชีเบลประมาณ 1 กรัม แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
3. นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา (Tubular Furnace) อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
4. หย่อนครูชีเบลให้อยู่บริเวณปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
5. หย่อนครูชีเบลให้อยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที
6. นำครูชีเบลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นใส่ในเดสิคเคเตอร์ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกผล

#### การคำนวณ

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = [100(W_5 - W_6) / W] - M$$

- เมื่อ V = ร้อยละของสารระเหย
- $W_5$  = น้ำหนักของครูชีเบลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)
- $W_6$  = น้ำหนักของครูชีเบลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)
- W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)
- M = ร้อยละของความชื้น

### 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

#### การคำนวณ

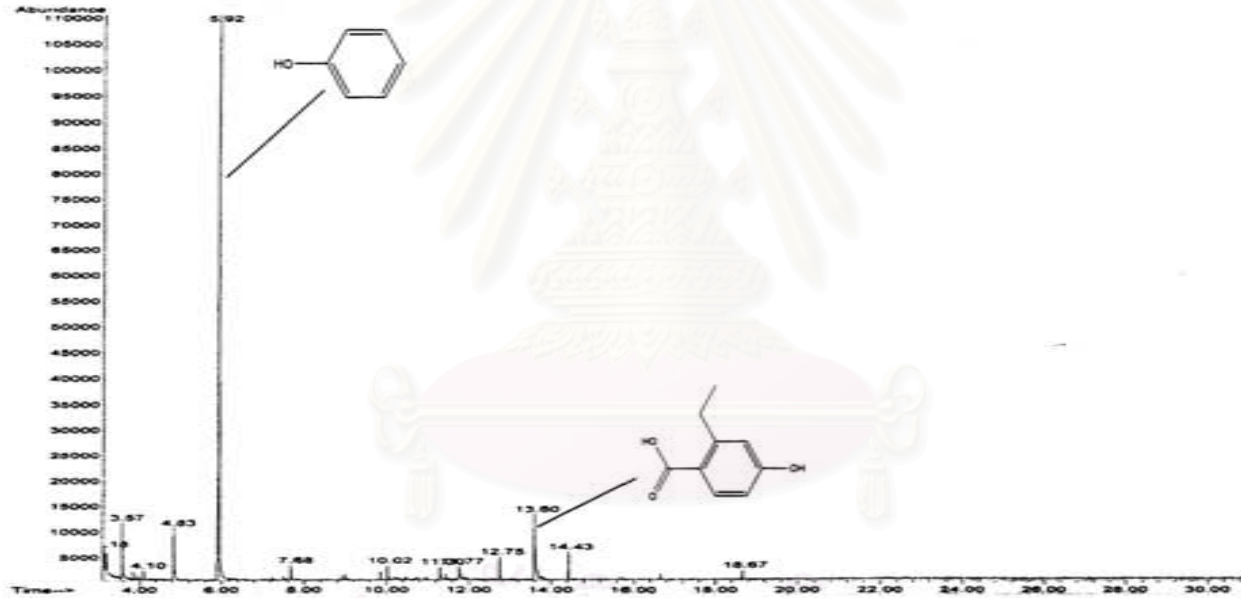
สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - M - A - V$$

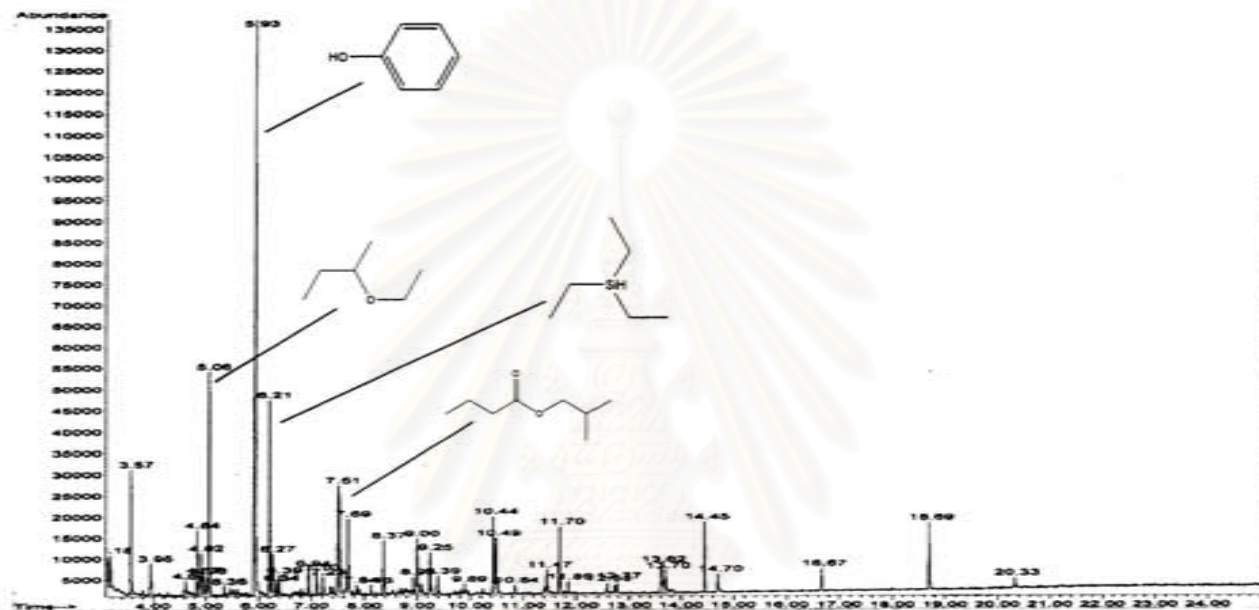
ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว

โครมาโตแกรมแสดงผลการแยกผลิตภัณฑ์ของเหลว

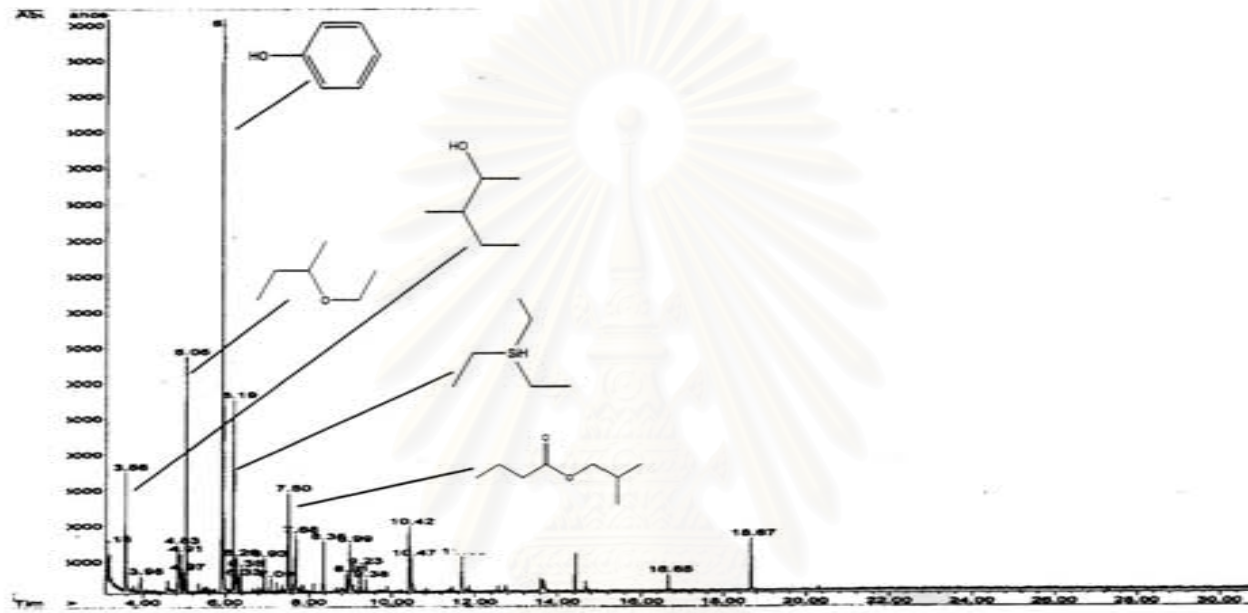


รูปที่ ค1 GC/MS โครมาโตแกรมขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว ภาวะการทดลอง: ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนตัวเอทานอลต่อถ่านหินเท่ากับ 7.5



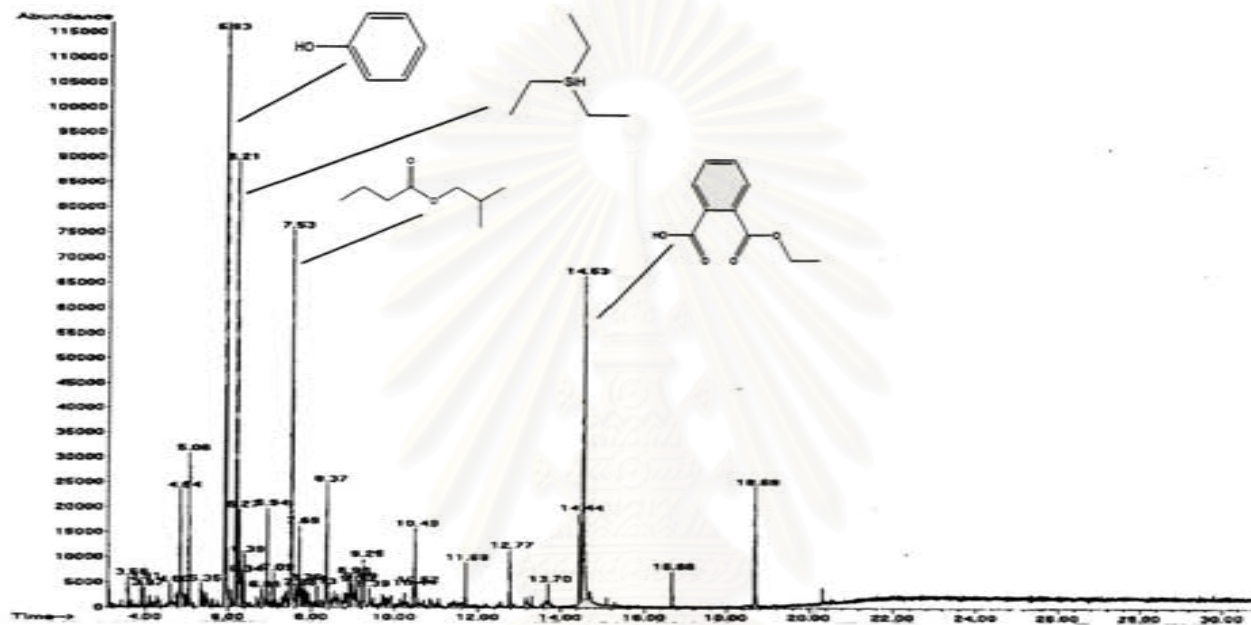
รูปที่ ค2 GC/MS โคโรมาโตแกรมขององค์ประกอบ ของผลิตภัณฑ์เหลว ภาวะการทดลอง: ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อด้านหินเท่ากับ 7.5

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



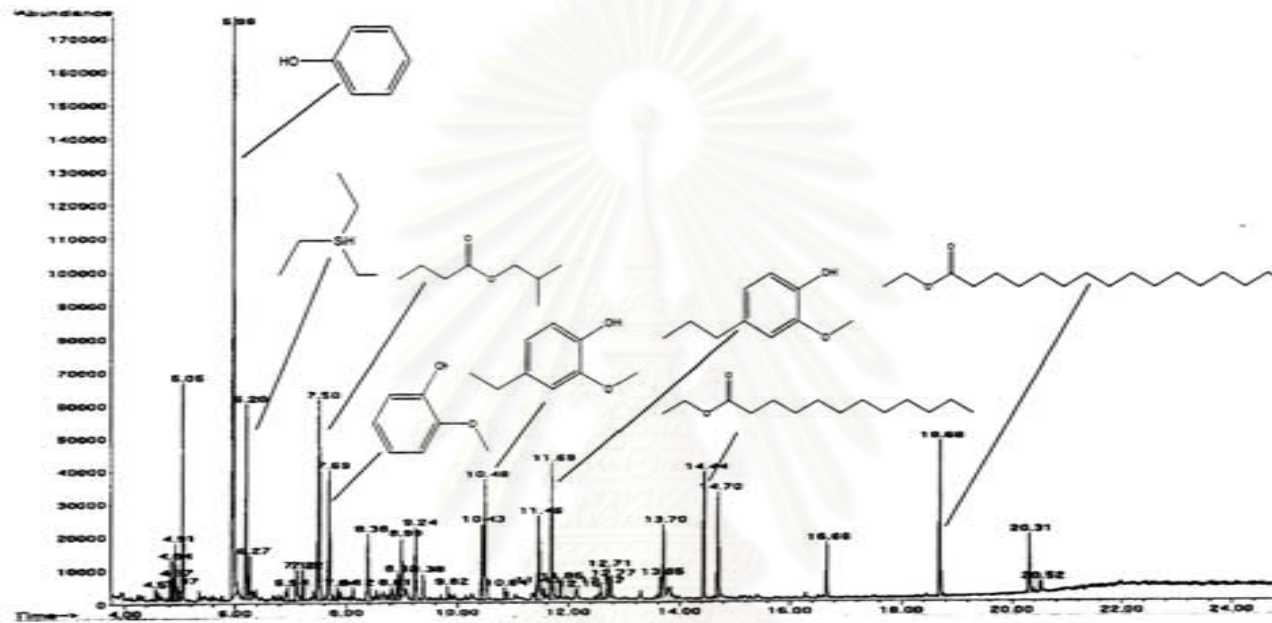
รูปที่ ค3 GC/MS โครมาโตแกรมขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว ภาวะการทดลอง: ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อดำเนินินเท่ากับ 7.5 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไอร์ออน (II) ซัลไฟด์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค4 GC/MS โครมาโตแกรมขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว ภาวะการทดลอง: ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนเอทานอลต่อด้านหินเท่ากับ 7.5 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

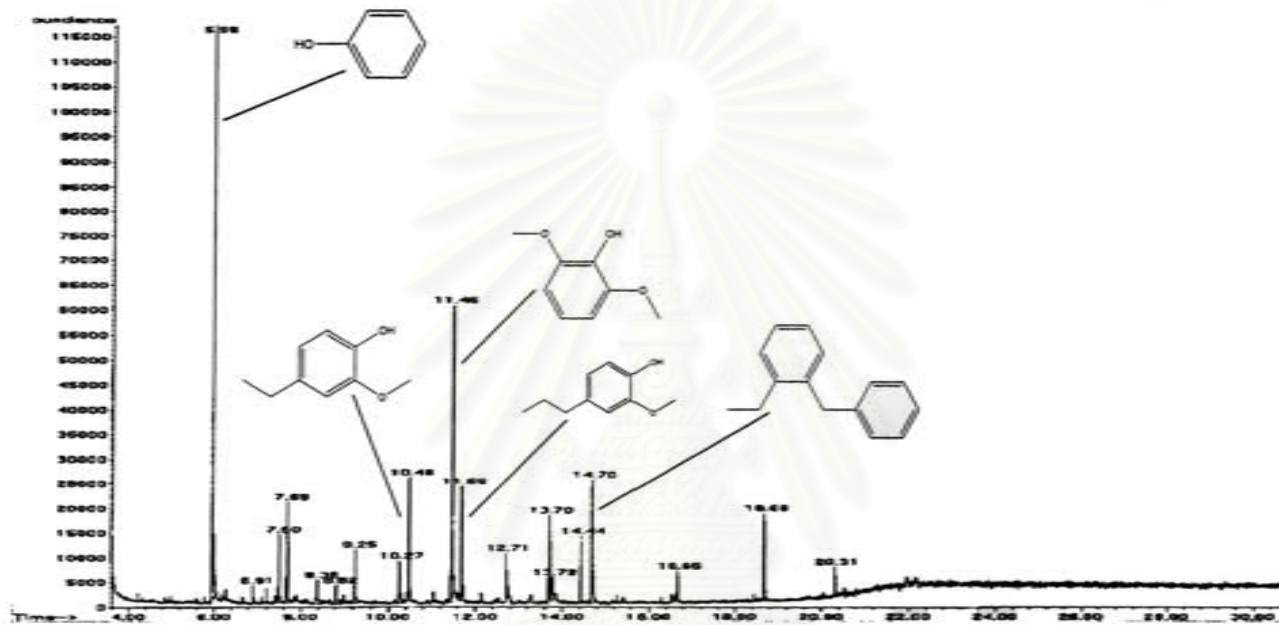
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค5 GC/MS โคโรมาโตแกรมขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว ภาวะการทดลอง: ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนสารละลายเอทานอล 95% (ทางการค้า) ต่อถ่านหินเท่ากับ 7.5

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



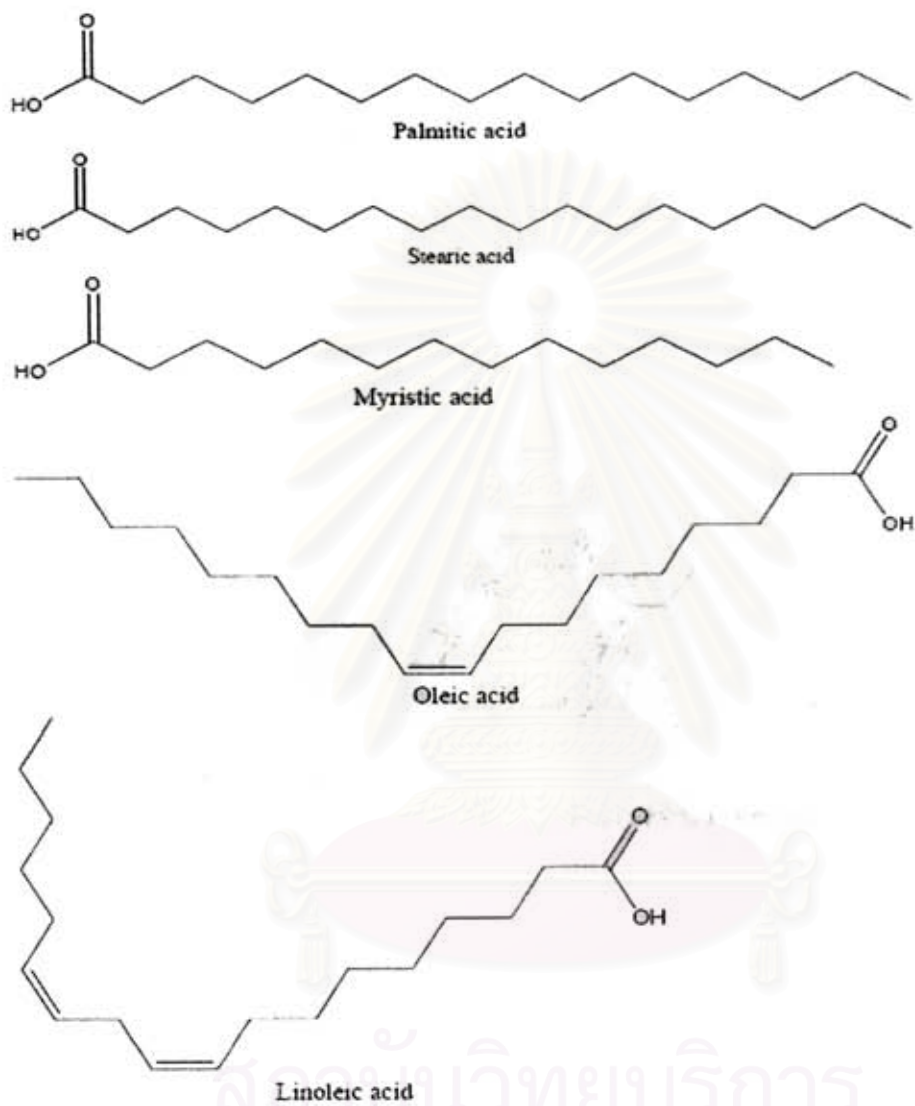


รูปที่ ค6 GC/MS โคโรมาโตแกรมขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว ภาวะการทดลอง: ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล เวลา 40 นาที อัตราส่วนสารละลายเอทานอล 50% ต่อถ่านหินเท่ากับ 7.5

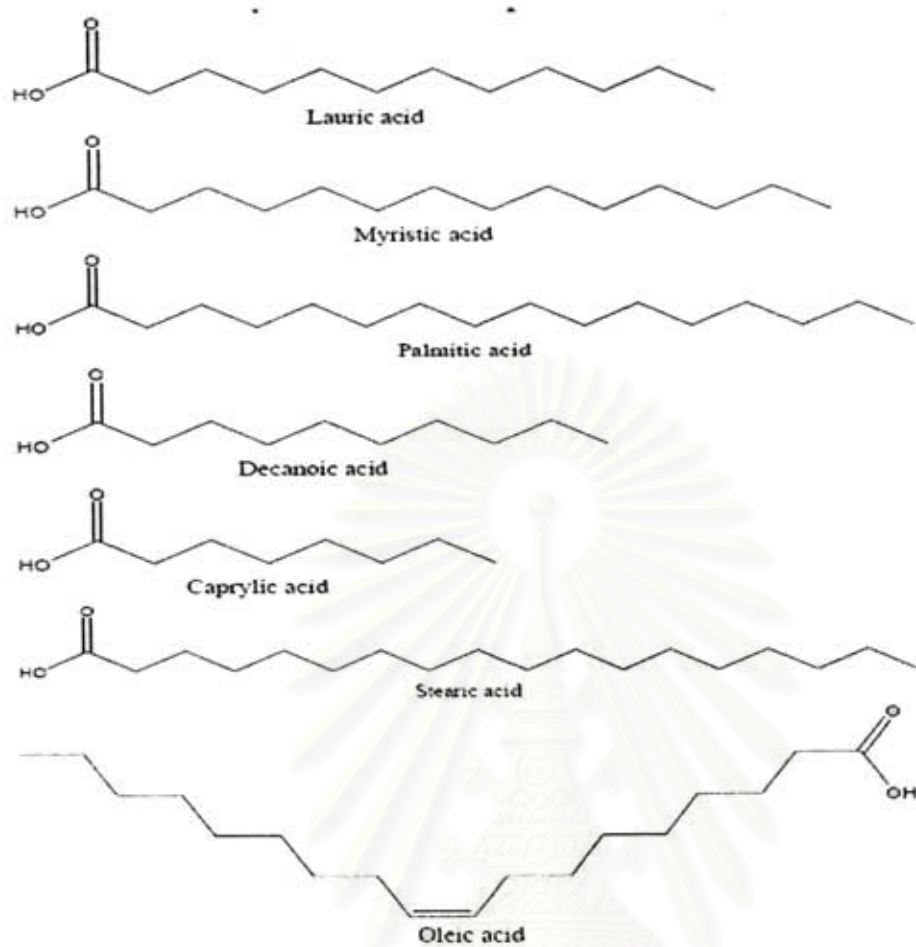
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

สูตรโครงสร้าง

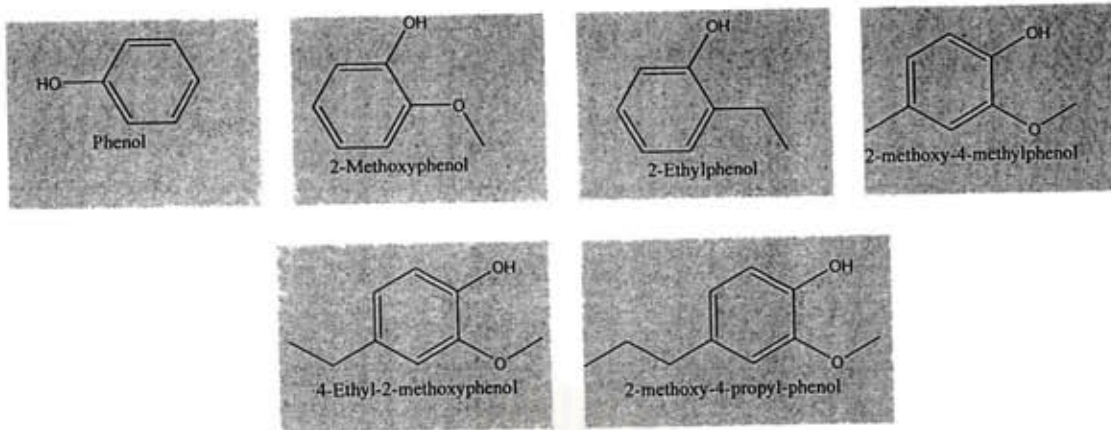


รูป ง1 สูตรโครงสร้างปาล์มน้ำมัน (Palm oil)

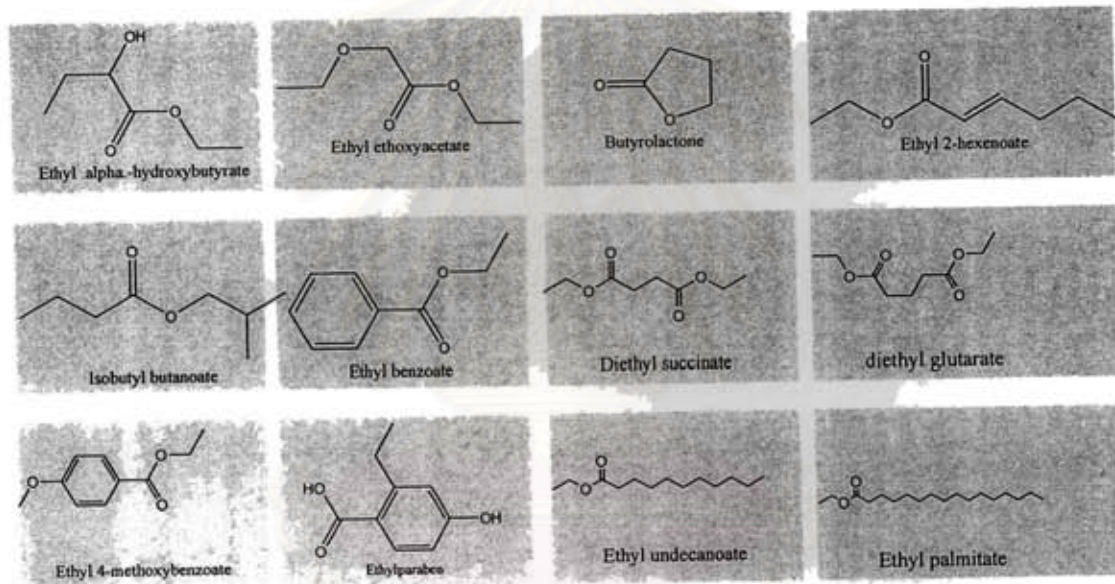


รูป ง2 สูตรโครงสร้างน้ำมันปาล์มส่วนเคอร์เนล (Kernel palm oil)

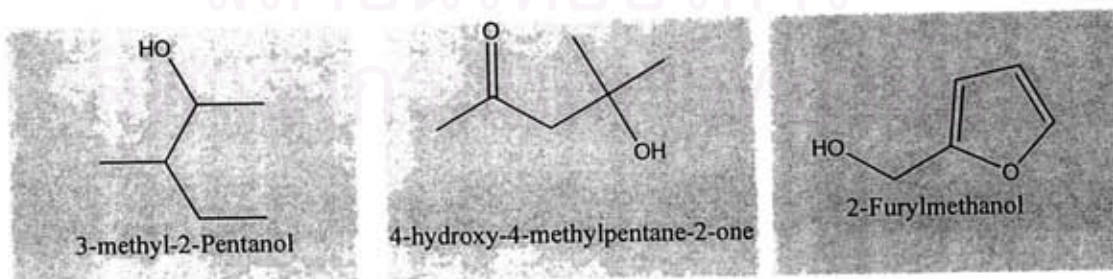
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป ง3 สูตรโครงสร้างองค์ประกอบหลักของสารใน GC/MS ในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก



รูป ง4 สูตรโครงสร้างองค์ประกอบหลักของสารใน GC/MS ในกลุ่มเอสเตอร์



รูป ง5 สูตรโครงสร้างองค์ประกอบหลักของสารใน GC/MS ในกลุ่มแอลกอฮอล์

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจิราพัชร คำพิเดช เกิดวันที่ 11 พฤศจิกายน 2525 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2550



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย