

การผลิตน้ำมันชีวภาพจากเปลือกทุเรียนโดยไฟโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

นายรุ่งฤทธิ์ โต๊ะทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

BIO-OIL PRODUCTION FROM DURIAN SHELL BY CONTINUOUS PYROLYSIS

Mr.Rungrit Thotong

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

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตน้ำมันชีวภาพจากเปลือกทุเรียนโดยไฟโรไลซิสแบบต่อเนื่อง
โดย	นายรุ่งฤทธิ์ ไต๊ะทอง
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกื้อวลี พุกษาทร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร.วิชากร จารุศิริ)

รุ่งฤทธิ ไต้ะทอง : การผลิตน้ำมันชีวภาพจากเปลือกทุเรียนโดยไพโรไลซิส  
แบบต่อเนื่อง.(BIO-OIL PRODUCTION FROM DURIAN SHELL BY CONTINUOUS  
PYROLYSIS)อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์, 92หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องจากเปลือกทุเรียน โดยศึกษาตัวแปรที่มี  
ผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพ ได้แก่ อุณหภูมิ ขนาดอนุภาค อัตราการ  
ไหลของแก๊สไนโตรเจน และอัตราการป้อนสาร อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 400 - 700  
องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคอยู่ที่ 0.25 - 0.85 มิลลิเมตร อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 50 - 200  
ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และอัตราการป้อนสารอยู่ที่ 2.5- 3.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง พบว่าได้ของ  
ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดร้อยละผล 56.23 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.45 -  
0.65 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และ อัตราการ  
ป้อนสารที่ 3.3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง องค์ประกอบทางด้านเคมีของน้ำมันชีวภาพจะทำการวิเคราะห์  
ด้วยเทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี( $^1\text{H}$  NMR)และ  
เครื่องมือวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี แมสสเปกโตรเมตรี (GCMS) และวิเคราะห์หาคุณสมบัติ  
พื้นฐานทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพพร้อมทั้งระบุความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและ  
เคมีของน้ำมันชีวภาพที่ได้รับผลจากการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวสามารถนำมาใช้  
เป็นพลังงานหมุนเวียน

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....เทคโนโลยีเชื้อเพลิง.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา.....2554.....

# # 527 25080 23 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS : DURIAN SHELL / BIO-OIL / PYROLYSIS

RUNGRIT THOTONG : BIO-OIL PRODUCTION FROM DURIAN SHELL BY CONTINUOUS PYROLYSIS. ADVISOR: ASSOC.PROF.THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., 92 pp.

Durian shell was used as a raw material to determine the effects of pyrolysis conditions on liquid yields and product distribution of bio-oil. Under the condition such as the temperature, particle size, nitrogen flow rate and feed rate The parameters investigated were pyrolysis temperature of 400-700°C, particle sizes range of 0.450 - 0.65 mm diameter, nitrogen-flow rates between 50 - 200 cm<sup>3</sup> /min. and feed rate of rice straw from 2.6 - 3.3 kg/hr. The results show the maximum liquid product yield of 56.23 wt.% at temperature of 600 °C, particle sizes of 0.450 < Dp < 0.650 mm, nitrogen-flow rates rate of 200 cm<sup>3</sup> /min, and feed rate of Durian shell of 3.3 kg/hr. The composition of the bio-oil was analyzed by GC-MS, H1NMR and physical properties of bio-oil. According to the experimental results the liquid products can be used as a potential renewable fuel resources.

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

Field of Study : Fuel Technology ..... Advisor's Signature .....

Academic Year : 2011 .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตตานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้คำชี้แนะที่มีประโยชน์กับงานวิจัย

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเงินทุนอุดหนุนงานวิจัย และขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเครื่องมือวิเคราะห์และค่าบริการในการวิเคราะห์ผลการวิจัย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุกษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และ อาจารย์ ดร. วิชชากร จารุศิริ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณามาสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้ความดูแลและคอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกเป็นอย่างดีทั้งด้านงานวิจัยและการเรียน

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ และในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจอยู่เสมอ

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจ คอยมอบความรักความห่วงใย ให้คำปรึกษาในทุกๆ ด้าน และสนับสนุนด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	4
2.2 การผลิตชีวมวลภายในประเทศ.....	6
2.3 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล.....	9
2.4 โครงสร้างทางกายภาพชีวมวล.....	12
2.5 องค์ประกอบของชีวมวล.....	12
2.6 ข้อดีและข้อเสียของชีวมวล.....	13
2.7 หลักการแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวล.....	15
2.8 กลไกการไพโรไลซิส.....	19
2.9 ผลกระทบตัวแปรต่างๆต่อการไพโรไลซิส.....	24
2.10 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส.....	27
2.11 น้ำมันชีวภาพ.....	29

บทที่	หน้า
2.12 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์.....	31
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
3. เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	38
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	38
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	44
3.3 วิธีการทดลอง.....	45
3.4 วิเคราะห์ผลการทดลองของผลิตภัณฑ์.....	46
4. สรุปผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	47
4.1 การวิเคราะห์สมบัติและลักษณะเบื้องต้นของเปลือกทุเรียน.....	47
4.1.1 วิเคราะห์แบบประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ.....	47
4.1.2 วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกทุเรียนด้วย เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก.....	49
4.1.3 วิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในเปลือกทุเรียน ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	50
4.2 ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์.....	51
4.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์.....	51
4.2.2 ผลของขนาดอนุภาค.....	53
4.2.3 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน.....	54
4.2.4 ผลของอัตราการป้อนสาร.....	55
4.2.5 ศึกษาอัตราส่วนของน้ำมันเบาและน้ำมันหนักในผลิตภัณฑ์เหลว.....	57
4.3 ผลของการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพ.....	58
4.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ.....	58
4.3.2 ค่าความร้อนของน้ำมันหนัก.....	59
4.3.3 ค่าความร้อนของถ่านชาร์.....	59
4.3.4 สมบัติพื้นฐานต่างๆของน้ำมันชีวภาพ.....	60
4.3.5 ทดสอบองค์ประกอบทางด้านเคมี.....	63



บทที่	หน้า
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	69
5.1.1 วิเคราะห์สมบัติและลักษณะเบื้องต้นของเปลือกทุเรียน.....	69
5.1.2 วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกทุเรียน.....	69
5.1.3 วิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบในเปลือกทุเรียน.....	69
5.1.4 ภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพ จากเปลือกทุเรียนโดยการไพโรไลซิสแบบเร็ว.....	70
5.1.5 อัตราส่วนน้ำมันเบาต่อน้ำมันหนัก.....	70
5.1.6 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	70
5.1.7 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์.....	70
5.1.8 สมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพ.....	70
5.1.9 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรสโกปี (FT-IR).....	71
5.1.10 วิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์ แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตร สโคปี ( $H^1$ -NMR).....	71
5.1.11 วิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (Gas Chromatography-Mass Spectroscopy, GCMS).....	71
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	72
รายการอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก การคำนวณ.....	80
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สมบัติของแข็ง.....	87
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว.....	88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	92

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบเปลือกทุเรียน.....	6
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิด.....	8
2.3 องค์ประกอบของแก๊สเมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ.....	18
2.4 ปฏิกริยาคายความร้อนของเซลลูโลส.....	20
2.5 สมบัติทางกายภาพของเหลวจากไพโรไลซิส.....	28
2.6 สมบัติทางเคมีของเหลวจากไพโรไลซิสเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลและน้ำมัน.....	29
4.1 วิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis).....	48
4.2 วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis).....	49
4.3 วิเคราะห์ปริมาณโลหะด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence.....	50
4.4 ผลการปรับเทียบความสัมพันธ์ของความเร็วของสกรูกับอัตราการป้อนสาร.....	55
4.5 ร้อยละอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ประกอบด้วย น้ำมันเบา น้ำมันหนักและน้ำ.....	57
4.6 องค์ประกอบของธาตุของน้ำมันชีวภาพโดยทำการวิเคราะห์เฟสของน้ำมันชีวภาพ.....	58
4.7 ค่าความร้อนน้ำมันหนักที่อุณหภูมิต่างๆ.....	59
4.8 ค่าความร้อนของถ่านชาร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	60
4.9 ทดสอบสมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพจากเปลือกทุเรียน.....	61
4.10 วิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรสโคปี ( $H^1$ -NMR).....	63
4.11 องค์ประกอบหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันจากไพโรไลซิสเปลือกทุเรียน.....	65
4.12 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสเปลือกทุเรียน GCMS .....	67
4.13 การวิเคราะห์หาโลหะด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence.....	68

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	5
2.2	9
2.3	10
2.4	10
2.5	11
2.6	15
2.7	19
2.8	20
2.9	21
2.10	22
2.11	23
2.12	31
2.13	32
2.14	32
2.15	33
2.16	33
3.1	39
3.2	39
3.3	40
3.4	41
3.5	41
3.6	42
3.7	43
3.8	43
3.9	44

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของเปลือกทุเรียน.....	50
4.2 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์.....	51
4.3 ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์.....	53
4.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์.....	54
4.5 ผลของอัตราการป้อนต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์.....	56
4.6 การแยกชั้นของน้ำมันหนักและน้ำมันเบาและตัวอย่างของน้ำมันชีวภาพ ที่จากกระบวนการไพโรไลซิส.....	58
4.7 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรสโคปี ( $H^1$ -NMR).....	64
4.8 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี(FT-IR).....	65
4.9 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (Gas Chromatography - Mass Spectrometry).....	66

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อระบบเศรษฐกิจและการดำเนินชีวิตประจำวันและยังเป็นปัจจัยในการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมธุรกิจบริการและเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศในแต่ละปี ความต้องการใช้พลังงานเพื่อตอบสนองความต้องการมีสัดส่วนที่สูงการจัดการด้านพลังงานภายในประเทศให้มีความเพียงพอและต้นทุนที่เหมาะสมเป็นจึงไปได้ยากเนื่องจากประเทศไทยต้องพึ่งพาพลังงานนำเข้าจากต่างประเทศเป็นหลัก และพลังงานเชิงพาณิชย์มาจากการนำเข้าได้รับผลกระทบจากวิกฤติราคาน้ำมันแพง ดังนั้น การประยุกต์ใช้ปรัชญาหลักเศรษฐกิจพอเพียงตามแนวพระราชดำริของ“พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว” ในกิจการพลังงานของประเทศโดยมุ่งเน้นใช้พลังงานอย่างรู้คุณค่าเลือกใช้เท่าที่จำเป็นพัฒนาพลังงานทดแทนที่มีอยู่ในประเทศเพื่อลดการพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรอุตสาหกรรมที่มีวัสดุเหลือทิ้งทางการแปรรูปทางเกษตรที่นับว่ามีชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการเกษตรกรรมเป็นจำนวนมากส่วนมากกำจัดทิ้งโดยการเผาซึ่งตามไร่นาทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานอย่างไร้ประโยชน์ การนำชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการแปรรูปเป็นพลังงานทดแทนเพื่อลดการนำเข้าเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ช่วยลดการขาดดุลด้านการค้า ส่งเสริมการประกอบอาชีพของเกษตรกร เป็นต้น องค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวล คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่จะประกอบด้วยน้ำตาลและพอลิเมอร์ของน้ำตาลเรียกว่าพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงสะอาดซึ่งปลดปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) และคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ต่ำกว่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิล เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ที่ส่งผลต่อสภาวะโลกร้อน (Global warming)

กระบวนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพได้โดยใช้เทคโนโลยีการแปรรูปทางความร้อน (Thermal conversion technology) แบ่งออกเป็น 4 กระบวนการคือ ลิกควิเดชัน (Liquidfaction) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) การเผาไหม้ (Combustion) และ แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) โดยไพโรไลซิสเป็นกระบวนการให้ความร้อนในภาวะไร้ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ถ่านชาร์ น้ำมันทาร์ และแก๊ส โดยอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน เวลาและชนิดของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้

งานวิจัยนี้เลือกใช้กระบวนการไพโรไลซิสซึ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อนโดยโดยใช้ความร้อนสูงในระยะเวลาหนึ่งโดยไม่ใช้ออกซิเจนให้ผลิตภัณฑ์หลัก 3 ชนิด ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรคาร์บอน ของเหลวเป็นสารละลายอินทรีย์ และน้ำมันดิน (tar) และของแข็ง (ถ่านชาร์) ซึ่งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของมวลชีวภาพและวิธีการให้ความร้อนในการสังเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากเปลือกทุเรียนซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นลิกโนเซลลูโลส(Lignocellulose)และสารระเหยสูง(Volatile)จึงเป็นการเพิ่มคุณค่าและมูลค่าในเชิงเศรษฐกิจให้แก่เปลือกทุเรียนซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรที่เหลือใช้ให้สามารถนำมาประโยชน์เป็นพลังงานทดแทนในสถานการณ์ที่มีปัญหาด้านน้ำมันเชื้อเพลิงจากฟอสซิลมีปริมาณลดน้อยลงหรือสามารถนำเอาผลิตภัณฑ์ที่ได้นำไปเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมผลิตภัณฑ์ทางเคมีต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาตัวแปรและภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเปลือกทุเรียนโดยการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง
2. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการศึกษาระบบการไพโรไลซิสเปลือกทุเรียนเพื่อใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพ โดยหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพ วิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของน้ำมันชีวภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพที่มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงน้ำมันเชื้อเพลิงจากเปลือกทุเรียนโดยกระบวนการไพโรไลซิส
2. ได้ข้อมูลในการผลิตเพื่อที่จะนำไปขยายต่อในระดับเชิงพาณิชย์

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมเปลือกทุเรียนแห้งด้วยการบดละเอียดนำไปร่อนแยกขนาดในตะแกรงร่อนเพื่อแยกให้ได้ขนาดของอนุภาคเปลือกทุเรียนในช่วง 450-850 ไมครอน เตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

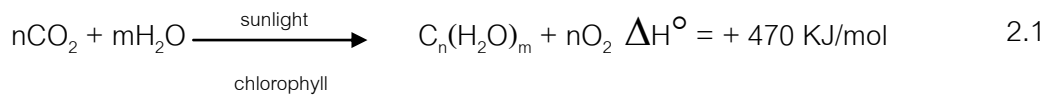
3. วิเคราะห์สมบัติของเปลือกทุเรียนก่อนทำการทดลอง
  - องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis)ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3172 D3173 D3174 และ D3175 เพื่อหาค่าความชื้น เถ้า สารระเหย คาร์บอนคงตัว
  - ปริมาณค่าความร้อน (Gross Calorific Value) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D2015
  - องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3176
  - การสูญเสียน้ำหนักเมื่อให้ความร้อนด้วยเทอร์โมกราวิเมตริก/ดิฟเฟอเรนเชียล เทอร์มัลอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric/Differential Thermal Analyzer: TGA)
4. ไพโรไลซิสเปลือกทุเรียนในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยมีตัวแปรดังนี้
  - ขนาดอนุภาคของสารตัวอย่าง (เปลือกทุเรียน)
  - อัตราการป้อนสารตัวอย่าง (เปลือกทุเรียน)
  - อุณหภูมิ
  - อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน
5. วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้
  - วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass spectrometry, GC-MS)
  - วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3176
  - วิเคราะห์ค่าความร้อน (Gross Calorific Value) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D2015
6. วิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทางกายภาพ
  - จุดวาบไฟของน้ำมันชีวภาพตามวิธีมาตรฐาน ASTM D93
  - ความหนืดของน้ำมันชีวภาพตามวิธีมาตรฐาน ASTM D445
  - ค่าความเป็นกรด-เบสด้วย pH meter
7. วิเคราะห์ และ สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

#### ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม การเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย ชังข้าวโพด เป็นต้น ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานประเภทหนึ่งคือ พลังงานทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่ประกอบกันเป็นโมเลกุลของ สารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ได้ถูกสะสมอยู่ภายใน แหล่งกำเนิดของคาร์บอนและไฮโดรเจนมาจาก น้ำและ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์การสังเคราะห์แสงของพืชจะเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และ น้ำไปเป็นสารอินทรีย์ต่างๆที่สามารถเผาไหม้ได้ องค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับกระบวนการนี้ คือ คลอโรฟิลล์ และแสงอาทิตย์ โดยคลอโรฟิลล์ที่มีอยู่ในพืชสีเขียวจะดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อ ทำให้เกิดการสังเคราะห์แสงขึ้นปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง แสดงดังสมการ 2.1



$\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_m$  แสดงถึงสารประกอบอินทรีย์จำพวกคาร์โบไฮเดรตและสารอื่นๆที่สังเคราะห์ขึ้น จากปฏิกิริยา คาร์โบไฮเดรตประมาณหนึ่งในสี่จากการสังเคราะห์แสงจะถูกออกซิไดซ์ต่อด้วย กระบวนการผันกลับได้ของการหายใจในพืชเพื่อให้พลังงานสำหรับการเจริญเติบโต โดยส่วนที่ เหลือจะสะสมไว้ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้[1]เพราะขั้นตอนของการเจริญเติบโต ของพืชนั้นพืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ผ่านกระบวนการ สังเคราะห์แสง ได้ผลิตภัณท์ในรูปแป้งและน้ำตาลแล้วกักเก็บส่วนต่างๆของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมา เป็นเชื้อเพลิงก็ได้พลังงานออกมา





รูปที่ 2.1 ชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตร[2]

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแยกออกได้ 4 ประเภท [2] ตามแหล่งที่มาดังนี้

1. พืชผลทางการเกษตร (Agriculture crops) เช่น ข้าว ฟางข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ถั่วเหลือง ที่เป็นแหล่งพลังงาน แป้งและน้ำตาล รวมถึงพืชน้ำมันต่างๆ ที่สามารถนำมาเป็นพลังงานได้
2. วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (Agriculture residues) เช่น ฟางข้าว เศษลำต้นข้าวโพด ชังข้าวโพด เหง้ามัน สำปะหลัง รวมถึงพืชที่แพร่ระบาดในการเกษตรกรรม เช่น ผักตบชวา หญ้าคา
3. ไม้และเศษไม้ (Wood and Wood residues) ไม้โตเร็วเช่น ยูคาลิปตัส สะเดา กระถินณรงค์ กระถินเทพา เศษไม้จากโรงงานผลิตเครื่องเรือนและโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ
4. ของเหลือจากอุตสาหกรรมและชุมชน (Waste stream) เช่น กากน้ำตาลและขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล แกลบ ชี้เลี้ยง เส้นใยปาล์มและกะลาปาล์ม

## 2.2 การผลิตชีวมวลภายในประเทศ

เนื่องจากประเทศไทยมีภูมิอากาศร้อนชื้นและได้รับลมมรสุมอยู่สม่ำเสมอเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชประเทศไทยจึงสามารถทำการเกษตรได้ในทุกภาคของประเทศโดยอุตสาหกรรมการเกษตรของไทยได้หล่อเลี้ยงประชากรภายในประเทศ และส่งออกสินค้าการเกษตรและผลิตภัณฑ์แปรรูปมูลค่ามหาศาล เช่น ข้าว น้ำมันปาล์ม น้ำตาล และยางพารา เป็นต้น หากสามารถเพิ่มศักยภาพความสามารถในการผลิตก็จะส่งผลให้ประเทศไทยอาจจะเป็นครัวของโลกตามที่รัฐบาลประกาศไว้ โดยการผลิตสินค้าทางการเกษตรเหล่านี้มักมีวัสดุที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์หรือกากเหลือทิ้งจากการแปรรูปรวมถึงของเสียจากกระบวนการต่างๆ ที่สามารถแปรรูปเพื่อใช้ประโยชน์ได้ เช่น ปุ๋ย วัสดุเพาะปลูก ตลอดจนเป็นพลังงานทางเลือก จากการประมาณพบว่า ค่าพลังงานความร้อนของชีวมวลเทียบเท่ากับการใช้ถ่านหินลิกไนต์ถึง 54 ล้านตัน[3]

**ทุเรียน(Durian)** เป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญชนิดหนึ่งของไทยและได้รับความนิยมในการบริโภคทั้งในและต่างประเทศโดยมีมูลค่าการส่งออกในแต่ละปีจำนวนมาก ส่วนตลาดในประเทศก็เป็นที่ยอมรับประทานกันมากของคนทั่วไป ประกอบกับปัจจุบันเกษตรกรสามารถพัฒนาให้สามารถออกผลผลิตได้เกือบตลอดปี ข้อมูลทางการเกษตรพบว่าประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกทุเรียนประมาณ700,000ไร่ ผลผลิตรวมกว่า 650,000 ตัน ปลูกมากในภาคตะวันออก ภาคใต้ และภาคอื่นๆร้อยละ 57% เป็นเปลือกทุเรียนซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจำนวนมากและเป็นปัญหาในการกำจัดทิ้ง เมื่อพิจารณาสัดส่วนการแปรรูปพบว่าจำนวน 370,500 ตัน เปลือกทุเรียน มีส่วนประกอบที่เป็นเส้นใยค่อนข้างมากนอกเหนือจากส่วนที่เป็นพอลิแซ็กคาไรด์แล้วยังประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นเยื่อเซลลูโลส โดยสูงถึง 30% ยังไม่ได้มีการพัฒนานำมาใช้ประโยชน์ตารางที่ 2.1 แสดงร้อยละการแยกองค์ประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน ลิกนิน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส

องค์ประกอบ	ลิกนิน	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	เถ้า	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน
สัดส่วนร้อยละ	20	50	30	13	60	3.06	8.47	28.06

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบเปลือกทุเรียน

**ฟางข้าว (Rice straw)** เป็นผลผลิตที่เหลือจากการเกี่ยวข้าวจากการปริมาณการปลูกข้าวกว่า 65 ล้านไร่ มีฟางข้าวเฉลี่ยประมาณปีละ 26 ล้านตันและมีตอซังข้าวเฉลี่ยประมาณปีละ 18 ล้านตัน [5]เมื่อคิดแล้วจะได้ฟางข้าวคิดและตอซังถึง 50-70 ล้านตัน จากจำนวนข้าวที่ผลิตได้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายและมีค่าความร้อนเทียบเท่าน้ำมันเตา 3,900 ล้านลิตร

**ชานอ้อย (Bagasse)** เป็นส่วนของลำต้นอ้อยที่หีบเอาน้ำอ้อยหรือน้ำตาลออกแล้วมีส่วนประกอบอย่างหยาบๆคิดเป็นค่าร้อยละโดยน้ำหนักของชานอ้อยเปียกที่ความชื้นร้อยละ 48 คือ ไฟเบอร์ (Fiber) ร้อยละ 47.5 น้ำร้อยละ 50.0 น้ำตาลร้อยละ 2.0 และสารประกอบอื่นๆ 0.5% ชานอ้อยใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ภายในโรงงานน้ำตาลชานอ้อยสามารถใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel oil) ได้ดี ชานอ้อยมีความชื้นร้อยละ 50 หาก 3 ตันเมื่อเผาจะให้พลังงานใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิงหนักประมาณ 1 ตัน และยังใช้ผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น ชานอ้อยอัดเป็นแผ่น (Particle board) ผลิตเยื่อกระดาษ (Pulp) ไม้อัดผิวเส้นใย (Fiber-overlaid plywood) แผ่นกันความร้อน (Insulating board)

**เศษไม้ (Wood residual)** สามารถนำไปใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆได้ เช่น ไม้ยางพารา โดยปลายไม้ ปีกไม้และขี้เลื่อยของโดยไม้ยางพารา [6]โดยเศษเหลือใช้จากไม้ท่อนได้แก่ ปีกไม้และขี้เลื่อย ขัดอ้อยของเศษไม้คือมีความชื้นสูงประมาณร้อยละ 50 ต้องนำไปอบ ย่อยเพื่อให้ความชื้นลดลงก่อนนำไปเผา

**เศษวัสดุเหลือใช้จากปาล์มน้ำมัน (Palm oil residual)** เศษวัสดุเหลือใช้จากปาล์ม น้ำมัน ได้แก่ ลำต้น ทะลายปาล์ม กะลาปาล์ม ใยปาล์ม กะลาปาล์มมีค่าความร้อนสูงเหมาะนำมาเป็นเชื้อเพลิงแต่ควรระวังเศษน้ำมันที่ตกค้าง ส่วนทะลายปาล์มเปล่านั้นเหลืออีกมากที่ยังไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์หากนำมาเผาจะได้ขี้เถ้า การที่จะนำทะลายปาล์มเปล่านั้นมาเป็นเชื้อเพลิงต้องนำมาผ่านกระบวนการย่อยหรือตัดก่อนเพราะมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ ยังมีสารประกอบอัลคาไลน์สูงจะทำให้ท่อน้ำในหม้อน้ำมียางเหนียวเกาะติดได้ง่าย

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิลเนื่องจากมีปริมาณมากในแต่ละปี พลังงานชีวมวลที่เกิดขึ้นในแต่ละปีมีค่าพลังงานเทียบเท่าถ่านหินลิกไนต์ 54 ล้านตัน [7] เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกับถ่านหินลิกไนต์แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิด [7]

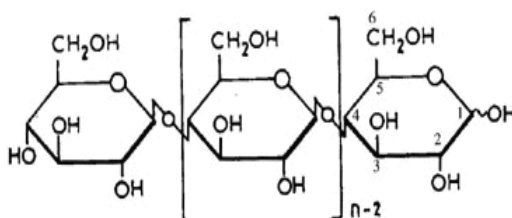
Proximate analysis	Rice husk	Rice straw	Bagasse	Wood residual	Palm shell	Corn cob	Cassava residual
Moisture, (%)	12.00	10.00	50.73	45.00	12.00	40.00	59.40
Ash, (%)	12.65	10.39	1.43	1.59	3.50	0.90	1.50
VM, (%)	56.46	60.70	41.98	45.70	68.20	45.52	31.00
FC, (%)	18.88	18.90	5.86	7.71	16.30	13.68	8.10
<b>Ultimate analysis</b>							
C, (%)	37.48	38.17	21.33	25.58	44.44	28.19	18.76
H, (%)	4.41	5.02	3.06	3.19	5.01	3.36	2.48
O, (%)	33.27	35.52	23.29	24.48	34.70	37.42	17.50
N, (%)	0.17	0.58	0.12	0.14	0.28	0.12	0.32
S, (%)	0.04	0.09	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04
Cl, (%)	0.09	na	na	0.01	0.02	0.05	0.05
Ash, (%)	12.65	10.39	1.43	1.60	3.52	0.90	1.50
Moisture, (%)	12.00	10.00	50.73	45.00	12.00	40.00	59.40
<b>Other properties</b>							
Bulk density, kg/m <sup>3</sup>	150	125	120	450	400	na	250
HHV, MJ/kg	14.75	13.65	9.24	14.36	18.26	11.29	8.45
LHV, MJ/kg	13.52	12.33	7.37	12.60	16.90	9.60	7.45

## 2.3 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล[8]

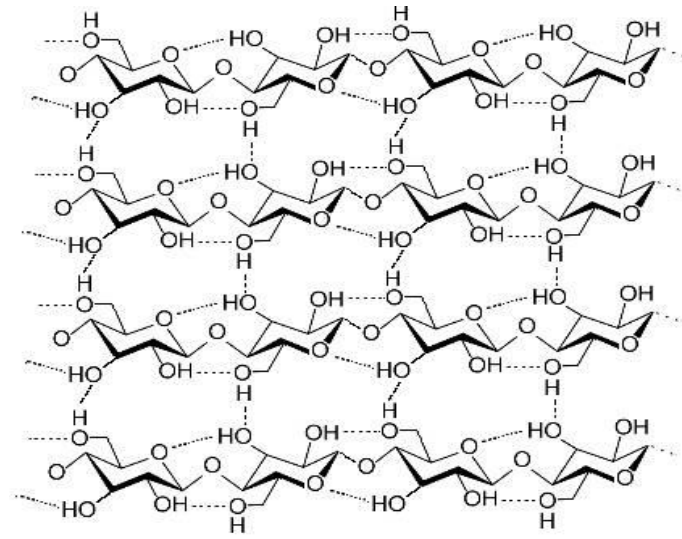
องค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวลคือ เซลลูโลส(Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่จะประกอบด้วยน้ำตาล พอลิเมอร์ของน้ำตาลซึ่งเรียกว่า พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides)

### 1. เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์ของพืชและเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติโดยประมาณร้อยละ 40-50 ของน้ำหนักแห้งเซลลูโลสในชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (Primary cell wall) และผนังเซลล์ทุติยภูมิ (Secondary cell wall) ทำให้พืชมีโครงสร้างที่แข็งแรง เป็นเส้นใยของพอลิแซคคาไรด์ที่ประกอบไปด้วยน้ำตาลดีกลูโคส(D-glucose)ในรูปของเบต้า-ดีกลูโคไพราโนส ( $\beta$ -D-glucopyranose) หลายโมเลกุลกันประมาณ 4,000-10,000 หน่วยต่อกันเป็นโครงสร้างลูกโซ่ โดยแต่ละโมเลกุลจับกันด้วยพันธะ 1,4-ไกลโคซิดิก(1,4-glycosidic bond) เป็นหลักที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 ของกลูโคสกับคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 4 ของกลูโคสโมเลกุลถัดไป การจัดเรียงตัวของหน่วยดี-กลูโคส แต่ละโมเลกุลในสายเซลลูโลสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล(Hydroxyl group)ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 กับคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 กับออกซิเจนที่อยู่ในวงแหวนของโมเลกุลถัดไปและเชื่อมต่อกันระหว่างสายเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 กับออกซิเจน เชื่อมระหว่างดี-กลูโคสในอีกสายหนึ่งการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลสมีลักษณะเส้นตรง มีสูตรทั่วไปคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  เมื่อ n คือจำนวนหน่วยของดี-กลูโคส ประกอบกันเป็นโครงสร้างดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 หน่วยของดี-กลูโคสต่อ 1 โมเลกุลเซลลูโลสมีตั้งแต่ 20-14,000 หน่วย โดยมีน้ำหนักโมเลกุลมีค่า 50,000-2,500,000 ดาลตัน ความยาวของหน่วยย่อยดี-กลูโคส 0.52 นาโนเมตร และมีความยาวมากกว่า 5 ไมโครเมตร



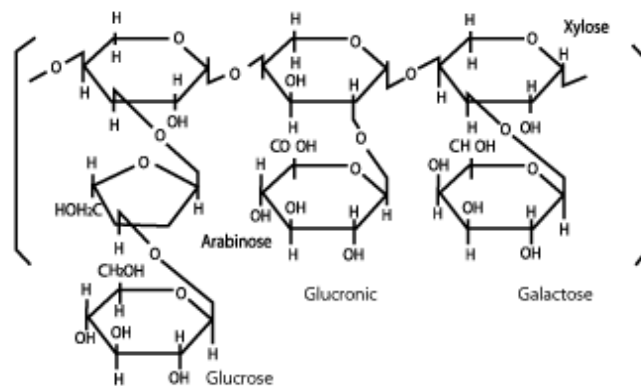
รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส[9]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของกลูโคสในเซลลูโลส[9]

## 2. เฮมิเซลลูโลส

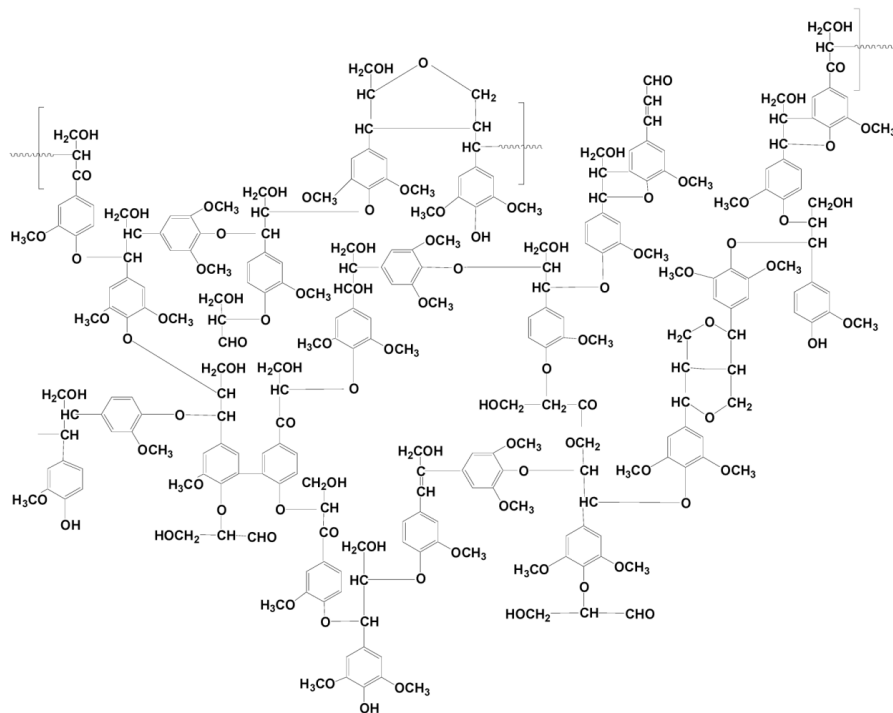
เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่เกิดขึ้นร่วมกับเซลลูโลส แต่จะอยู่ในรูปอสัณฐานที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมทางเคมีต่างกัน มีมวลต่ำกว่ามากเฮมิเซลลูโลสมักจะประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวต่างชนิดหลาย ๆ ตัวมาต่อกันเป็นกลุ่มดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะพบว่าโครงสร้างส่วนใหญ่จะคล้ายกับเซลลูโลส ยกเว้นพวกพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสที่ประกอบด้วยหน่วยย่อย 50-300 หน่วย ต่อกันแบบกิ่งก้านมากกว่าแบบเส้นตรง โดยส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (Pentose) ได้แก่ ดี-ไซเลน (D-xylane) ประกอบไปด้วยน้ำตาลไซโลส (Xylose) หลายๆ โมเลกุลต่อกันด้วยพันธะเบต้า-1,4-ไกลโคซิดิก แมนโนส [Mannose] แมนแนน[Mannan] กาแลคแตน [Galactan] [10]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [10]

### 3. ลิกนิน

ลิกนินเป็นสารประกอบอะโรมาติกมีน้ำหนักโมเลกุลสูงพบได้ในผนังเซลล์ของพืช ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานเส้นใยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงของเนื้อไม้ โดยประกอบไปด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน รวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด โครงสร้างพื้นฐานของลิกนิน คือ ฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane) มีมวลโมเลกุลประมาณ 184 ต่อ 1 หน่วยมอนอเมอร์ [11] โดยการจัดเรียงตัวของธาตุในโครงสร้างของโมเลกุลนั้นยังไม่ทราบแน่ชัด เนื่องจากลิกนินจะไม่อยู่ในลักษณะแบบเดี่ยว แต่จะเกาะกันเป็นสายโซ่ยาวหลายแบบมีส่วนโครงสร้างที่สำคัญคือ ส่วนของโครงสร้างอะโรมาติก (Aromatic structure) ที่ประกอบด้วยหมู่เมทอกซี (Methoxy group) เป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 14 หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) และมีหมู่ฟีนอลิก (Phenolic group) เป็นส่วนประกอบ โดยโครงสร้างของลิกนินในรูปที่ 2.5 ไม่ละลายน้ำ ไม่มีคุณสมบัติความยืดหยุ่น ดังนั้นพืชที่มีลิกนินสูงจะมีความแข็งแรงทนทานสูง



รูปที่ 2.5 โครงสร้างบางส่วนของลิกนินในไม้เนื้อแข็ง *Fagus sylvatica* [12]

## 2.4 โครงสร้างทางกายภาพชีวมวล

ชีวมวลจะมีรูปร่างแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิด โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นของแข็งแต่รูปร่างจะแตกต่างกันไปตามชนิดของชีวมวลนอกจากนี้ ความชื้นและสิ่งเจือปนถือเป็นเอกลักษณ์ของชนิดนั้นๆ

### 1. ขนาดและรูปร่าง

มีหลากหลายแล้วแต่ว่าเป็นชีวมวลของพืชชนิดใด เช่น เปลือกทุเรียน 25-35 เซนติเมตร แกลบมีขนาดไม่เกิน 1 เซนติเมตร กะลาปาล์ม 2-3 เซนติเมตร ปีกไม้จากโรงเลื่อย 1 เมตร และชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมีสภาพเส้นยาว 10-20 เซนติเมตร เป็นต้น

### 2. ความชื้น

ชีวมวลในสภาพสดจะมีความชื้นสูงร้อยละ 50-60 ผักตบชวาร้อยละ 90-95 ทางปาล์ม ร้อยละ 80 ช้างข้าวโพดร้อยละ 50-60 เปลือกทุเรียนร้อยละ 50-60 แต่ชีวมวลที่มีความชื้นค่อนข้างต่ำคือแกลบ

### 3. สิ่งเจือปน

ชีวมวลมีสิ่งเจือปนและสิ่งแปลกปลอมหลายอย่าง เช่น ฝุ่นละออง เศษดิน เศษหิน เศษทราย เป็นต้น ทำให้ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวมีประสิทธิภาพการผลิตลดลง

## 2.5 องค์ประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบของชีวมวลทั่วไป แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ

### 1. ความชื้น (Moisture)

ปริมาณน้ำที่มีอยู่ ชีวมวลมีความชื้นค่อนข้างสูงเป็นผลผลิตทางการเกษตร การแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานโดยผ่านกระบวนการเผาไหม้ ชีวมวลควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 10

### 2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance)

ส่วนที่เผาไหม้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สารระเหย (Volatiles matter) และคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) สารระเหย สลายตัวเมื่อได้รับความร้อนในสภาวะไร้อากาศ ดังนั้นชีวมวลที่มีค่าสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย ส่วนคาร์บอนคงตัวเป็นของแข็งที่เป็นคาร์บอนที่เหลืออยู่



### 3. ขี้เถ้า (Ash)

ขี้เถ้าเป็นส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ได้ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีขี้เถ้าประมาณร้อยละ 1-3 ยกเว้น แกลบและฟางข้าวจะมีสัดส่วนขี้เถ้าประมาณร้อยละ 10-20 ซึ่งจะมีปัญหาการเผาไหม้และการกำจัด

#### 2.6 ข้อดีและข้อเสียของชีวมวล

ภาพรวมของพลังงานชีวมวล ประมาณร้อยละ 15 ของพลังงานของโลกมาจากพลังงานชีวมวล เช่น วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ชยะ และพืชให้พลังงานบางชนิด ในประเทศอุตสาหกรรม เชื้อเพลิงเหล่านี้ได้นำมาผลิตไฟฟ้าและไอน้ำใช้ในอุตสาหกรรม เช่น โรงงานน้ำตาล เป็นต้น ในขณะที่ประเทศกำลังพัฒนาส่วนใหญ่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนการหุงต้มและอุตสาหกรรมขนาดเล็กซึ่งยังไม่มีประสิทธิภาพ

สรุปข้อดีการใช้ชีวมวลเป็นพลังงาน

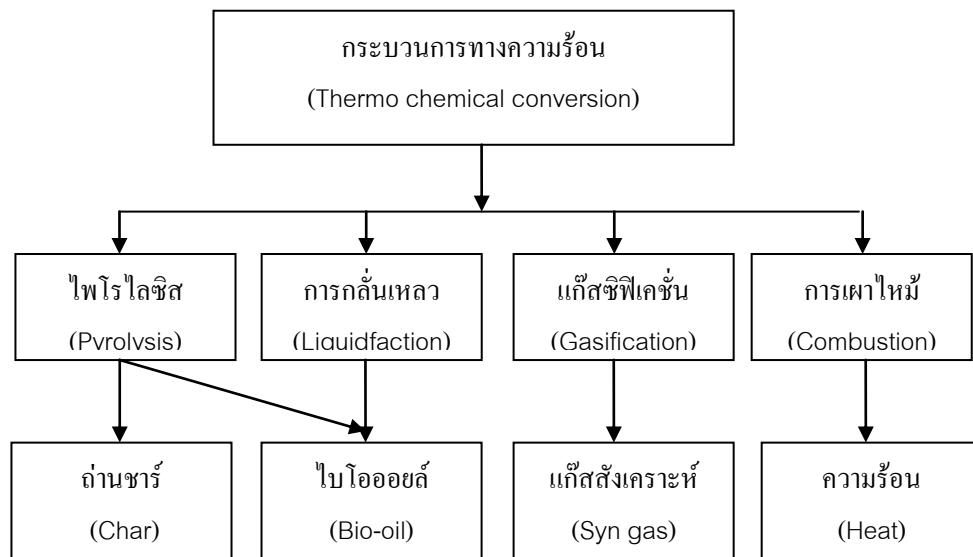
1. การเผาไหม้ถ่านหินและถ่านหินก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งถือว่าเป็นแก๊สเรือนกระจกเป็นสาเหตุทำให้โลกร้อนขึ้น แต่การเผาชีวมวลไม่ถือว่าก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจก เพราะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะหมุนเวียนกลับไปในกระบวนการเกิดของพืชและชีวมวลใหม่อีกครั้ง
2. การย่อยสลายตามธรรมชาติ จะทำให้เกิดแก๊สมีเทน การนำชีวมวลไปใช้ประโยชน์จึงเป็นการลดการปลดปล่อยแก๊สมีเทน
3. ชีวมวลจะมีกำมะถันไม่เกินร้อยละ 0.2 ดังนั้นการนำชีวมวลมาเผาไหม้จะไม่สร้างปัญหาเรื่องฝนกรด ขณะที่น้ำมันเตามีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 2 ส่วนถ่านหินมีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 0.3-4.0 ซึ่งขึ้นกับประเภทของถ่านหิน
4. ขี้เถ้าของชีวมวลมีสภาพเป็นต่าง ดังนั้นเหมาะสมที่นำไปเพาะปลูก หรือปรับสภาพดินที่เป็นกรด นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก และซีเมนต์
5. ประหยัดเงินตราต่างประเทศเพราะลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ
6. สามารถแปรรูปเป็นปุ๋ย โดยการนำเศษไม้ หญ้าและฟางข้าว เป็นต้น มาหมักใช้เวลาประมาณ 3 เดือน
7. เป็นวัตถุดิบในการผลิตอุตสาหกรรมอื่น เช่น การนำเศษไม้ยางพาราจากโรงเลื่อยมาย่อยและอัดเป็นแผ่นปาร์ติเคิลบอร์ด จากนั้นนำไปแปรรูปเป็นเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ

### สรุปข้อจำกัดการใช้ชีวมวลเป็นพลังงาน

1. ชีวมวลมีน้ำหนักเบา และมีขนาดลักษณะหลากหลายขึ้นกับชนิดของชีวมวลถ้าขนส่งชีวมวลทางรถบรรทุก ต้องขนส่งจำนวนมากทำให้มีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้น อาจมีผลกระทบต่อชุมชนในด้านมลภาวะและปลอดภัยในการใช้ถนน
2. ชีวมวลมีความชื้นสูง การออกแบบหม้อผลิตไอน้ำและปล่องไอเสียต้องมีขนาดใหญ่ตลอดจนถึงการติดตั้งอุปกรณ์ลดความชื้นเพิ่มเติม ทำให้เงินลงทุนมากขึ้น นอกจากนี้ถ้าชีวมวลมีความชื้นสูง อาจทำให้หม้อผลิตไอน้ำมีประสิทธิภาพต่ำ
3. ชีวมวลบางประเภทมีส่วนผสมของอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ท ซึ่งจะส่งผลต่อกัดกร่อนท่อในส่วนหม้อผลิตไอน้ำ ดังนั้นในการออกแบบหม้อผลิตไอน้ำต้องคำนึงถึงจุดนี้ [13]

## 2.7 หลักการแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวล

ชีวมวลสามารถแปรรูปเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการต่าง ๆ ซึ่งอาจเป็นกระบวนการทางชีวภาพหรือกระบวนการทางเคมีกระบวนการทางความร้อนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพใช้เทคโนโลยีการแปรรูปทางความร้อน (Thermal conversion technology) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการคือ ไพโรไลซิส (Pyrolysis) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) การเผาไหม้ (Combustion) และ ลิกวิดิแฟคชัน (Liquidfaction) ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ดำเนินการและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ต้องการ[14] ดังรูปที่ 2.6 กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมีเป็นกระบวนการที่ใช้สภาวะในการดำเนินการที่รุนแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ความร้อน แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีองค์ประกอบไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับชีวมวลส่งผลให้การแปรรูปชีวมวลทำให้กระบวนการทางเคมีโดยใช้ความร้อนเป็นที่นิยมมากกว่าทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.6 กระบวนการแปรรูปทางความร้อน (Thermo chemical conversion)

## 1. ลิควิดแฟคชัน (Liquefaction)

เป็นกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel) โดยทั่วไปมักเป็นผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากถ่านหินทำได้โดยการแยกคาร์บอนออกหรือการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) เรียกกระบวนการนี้ว่า 16Liquefaction เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากถ่านหินสามารถนำมาผ่านกระบวนการกลั่นลำดับส่วนจะได้น้ำมันสำหรับรถยนต์และผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น พลาสติก และสารละลายต่างๆ (Solvent) กระบวนการการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยตรง (Direct liquefaction) เป็นการแปรรูปถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้กระบวนการเดียว (Single process) และการผลิตเชื้อเพลิงเหลวทางอ้อม (Indirect liquefaction) เป็นการนำถ่านหินมาผ่านกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงก่อนจะแปรรูปด้วยกระบวนการทางเคมีเป็นน้ำมันเหลว เช่น ปฏิกริยา Fisher tropesch ในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงเหลวนี้โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ เวลา อุณหภูมิ และความดันที่ใช้ในการทำปฏิกริยารวมถึงอาจใช้ตัวเร่งปฏิกริยาเพื่อให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็นของเหลวได้รวดเร็วมีปริมาณมากขึ้น ภาวะที่ใช้ดำเนินการอยู่ที่ 350-500 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้ในการเกิดปฏิกริยาอยู่ในช่วง 500- 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกริยาที่ใช้ในกระบวนการส่วนใหญ่เป็นตัวเร่งปฏิกริยาโลหะและต้องให้อัตราการเพิ่มความร้อนอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการรวมตัวของโมเลกุลที่แตกตัวจากการให้ความร้อนกลายเป็นพอลิเมอร์

## 2. การเผาไหม้ (Combustion)

เป็นกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงในสภาวะที่ใช้ออกซิเจนโดยจะเกิดขึ้นสองช่วง ในช่วงแรกเป็นการเผาไหม้ของสารระเหย ซึ่งเกิดขึ้นในวัฏภาคแก๊สเป็นปฏิกริยาระหว่างแก๊สกับแก๊ส ช่วงสองเป็นการเผาไหม้ของกากของแข็งที่เหลืออยู่ คือ ถ่านชาร์ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เข้าสู่ภาวะที่ใช้ดำเนินการ คืออุณหภูมิตั้งแต่ 800-1400 องศาเซลเซียส ระบบการเผาไหม้โดยทั่วไปจะใช้อากาศที่มากเกินไปให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ทั้งนี้ยังมีผลจากการสูญเสียความร้อน เนื่องจากการใช้อากาศน้อยเกินไปจนส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเรียกว่า การสูญเสียศักยภาพทางความร้อน (Potential heat loss) อยู่ในรูปขององค์ประกอบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือคาร์บอน

### 3. แก๊สซิฟิเคชัน

แก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนชีวมวลไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน วัตถุประสงค์จะเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงโดยควบคุมปริมาณออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นแก๊สสังเคราะห์ ซึ่งแก๊สสังเคราะห์มีประสิทธิภาพสูงกว่าการเผาไหม้โดยตรงของเชื้อเพลิงเริ่มต้น ซึ่งสามารถเผาไหม้โดยตรงภายในเครื่องยนต์หรือนำแก๊สสังเคราะห์เปลี่ยนไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยผ่านกระบวนการ Fischer-Tropsch แก๊สที่ได้สามารถเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนรูปการผลิตกระแสไฟฟ้า กระบวนการ Fischer-Tropsch จะเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนไปเป็นไฮโดรคาร์บอนเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Co หรือ Fe

### 4. กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)[15]

กระบวนการไพโรไลซิสหรือ คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) เป็นการสลายตัวทางความร้อน (Thermal degradation) โดยไม่ใช้ออกาศหรือออกซิเจนร่วมในปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือของเหลวเป็นน้ำมันหยาบ มีลักษณะข้นเหนียว ถ่านชาร์ และแก๊ส เมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาต่างๆ เกิดขึ้นได้แก่ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) ไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) คอนเดนเซชัน (Condensation) ดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) ได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆเช่น น้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านชาร์ สารประกอบออร์แกนิก (Organic compound)

โดยปริมาณการเกิดสารระเหยและแก๊สต่างๆจะแปรผันตามช่วงอุณหภูมิ โดยในช่วง 150-200 องศาเซลเซียสจะเป็นการระเหยของน้ำ ช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียสเป็นการระเหยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ช่วงอุณหภูมิ 300-400 จะเป็นช่วงเริ่มการระเหยตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของแก๊สเมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ[16]

Process	Temperature (°C)	H <sub>2</sub> (mol%)	CO (mol%)	CO <sub>2</sub> (mol%)	HCs (mol%)
กำจัดน้ำ	150-200	0	30.5	68.0	2.0
การระเหยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	200-300	0.2	30.5	66.5	3.3
เริ่มการระเหยตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน	300-400	5.5	20.5	35.5	36.6
เริ่มระเหยของแก๊สไฮโดรคาร์บอน	400-500	7.5	12.3	31.5	48.7
การแตกตัว	500-700	48.7	24.5	12.2	20.4
การระเหยของแก๊สไฮโดรเจน	700-900	80.7	9.6	0.4	8.7

การไพโรไลซิสแบ่งได้ 2 กระบวนการหลัก คือ การไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) และการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) โดยมีตัวแปรดังนี้

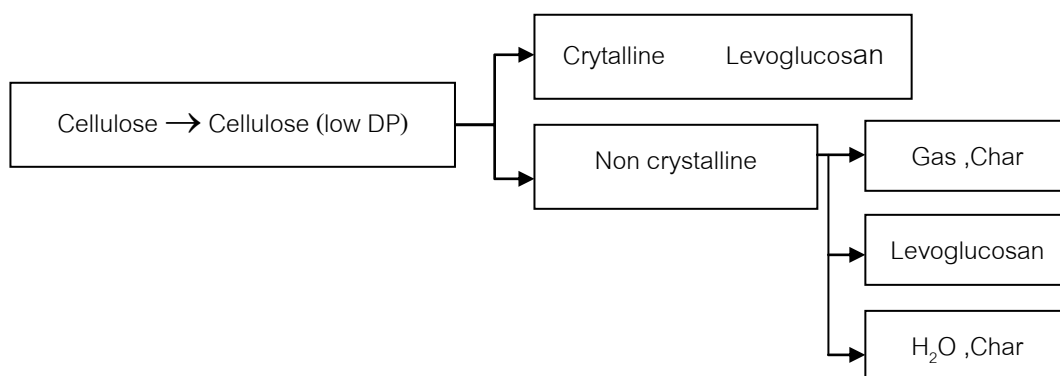
(1) ไพโรไลซิสแบบช้าเป็นการให้ความร้อนด้วยอัตรา 4-10 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลิตรถยนต์ที่ได้เป็นถ่านชาร์ น้ำมันชีวภาพและก๊าซได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน

(2) ไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นการให้ความร้อนสูงในระยะเวลาอันรวดเร็ว โดยไม่ใช้ออกซิเจน กระบวนการนี้โดยเตรียมชีวมวลซึ่งมีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร ความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 10 ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วอัตราการให้ความร้อน 10-50 องศาเซลเซียสต่อนาที และเวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน (Resident time) น้อยมาก ในช่วง 1.0-2.0 วินาที เมื่ออุณหภูมิลดลงสารที่ระเหยง่ายจะกลั่นตัวเป็นน้ำมันชีวภาพเหลว ส่วนก๊าซที่ยังคงเหลืออยู่เป็นก๊าซที่ไม่สามารถกลั่นตัวเป็นของเหลวได้ (Non condensable gas) และมีค่าความร้อนปานกลางปริมาณผลิตรถยนต์ที่ได้ น้ำมันชีวภาพ 50-60 % โดยน้ำหนัก ถ่านชาร์ 15-18 % โดยน้ำหนัก แก๊ส 15-25% โดยน้ำหนัก

## 2.8 กลไกการไพโรไลซิส

### 1. เซลลูโลส

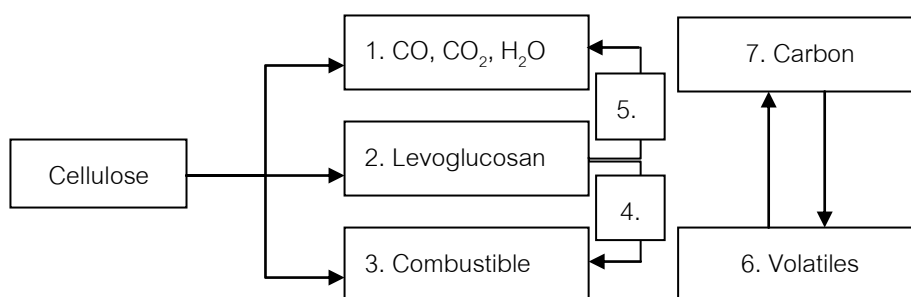
จากการศึกษาพบว่า กลไกของการเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงอุณหภูมิที่สำคัญ คือ ช่วงอุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 250 องศาเซลเซียส) ในช่วงเริ่มต้นของการไพโรไลซิส จะมีการสลายพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic) ระหว่างโครงสร้างรูปผลึกและอสัณฐาน ทำให้อัตราการพอลิเมอไรเซชันลดลงอย่างรวดเร็วจาก 1500 หน่วยมาคงที่ประมาณ 150 หน่วยในโครงสร้าง ทั้งที่เป็นรูปผลึกและอสัณฐาน สายของพอลิเมอร์จะไม่จับตัวเข้าคู่กัน (Unzipping) ซึ่งในโครงสร้างรูปผลึกจะมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นพวกลิวโกลูโคซาน (Levoglucosan) ส่วนในโครงสร้างอสัณฐานจะมีการแตกของสายเซลลูโลส ที่เกิดการแยกตัวของอะตอมไฮโดรเจนจากอะตอมของคาร์บอน ทำให้มีการดึงอะตอมไฮโดรเจนจากสายพอลิเมอร์ข้างเคียงสายของพอลิเมอร์ทั้งสองจะมีส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาสูง (Active site) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล (Cross link) ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กลไกสลายตัวของเซลลูโลสที่อุณหภูมิต่ำ [17]

ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (250-500 องศาเซลเซียส) จะเกิดการแตกตัวของเซลลูโลสอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ และเกิดการสลายตัวแข่งกันของปฏิกิริยาดิพอลิเมอไรเซชันกับการไล่น้ำออก (Dehydration) ดังรูปที่ 2.7 เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ขั้นกลาง (Intermediate) ทำให้เกิดการไล่น้ำออกทำให้เกิดชาร์ขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาเกิดเร็วกว่าปฏิกิริยาที่ 2 และ 3 ที่มีอุณหภูมิต่ำในปฏิกิริยาที่ 2 จะมีการแลกเปลี่ยนอิออน ระหว่างพันธะไกลโคซิดิก (Transglucosylation) ทำให้เกิดเลวโกลูโคซาน โดยมีกลไกที่เกี่ยวข้อง 2 กลไกคือ กลไกแรกเป็นการสลายพันธะไกลโคซิดิกแบบไฮโมไลติก (Homolytically) และเกิดการดิพอลิเมอไรเซชันตามกลไกของอนุมูลอิสระ

(Free radical) กลไกที่สองจะมีการสลายพันธะแบบเฮเทอโรไลติก(Heterolytically) เกิดการดิฟฟิวสิวของผลิตภัณฑ์ของคาร์บอนเนียมไอออน(Carbonium ion) ในปฏิกิริยาที่ 3 เป็นการเกิดฟิชชัน (Fission) ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และภาวะในการเกิดปฏิกิริยาเช่น น้ำ ออกซิเจน แก๊สเฉื่อย ตัวทำปฏิกิริยาอื่น ๆ ของค้ประกอบและธรรมชาติทางกายภาพของชีวมวล



รูปที่ 2.8 การเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลสที่อุณหภูมิปานกลาง [17]

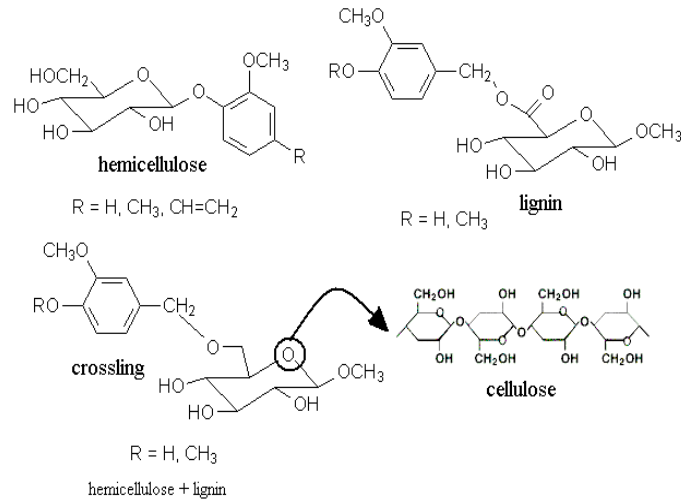
โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกลไกการสลายตัวเซลลูโลสเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) กระบวนการของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปฏิกิริยาคายความร้อนของเซลลูโลส [18]

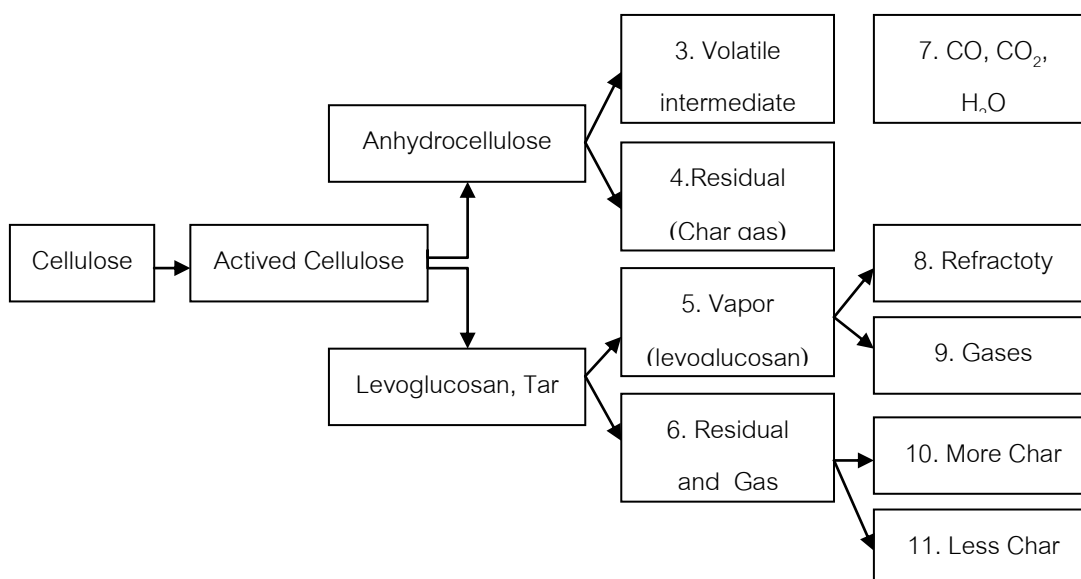
กระบวนการ	ปฏิกิริยา	เอนทาลปี, กิโลจูล/กิโลกรัมโมล carbon convert at <sup>a</sup>	
		300 องศาเซลวิน	1000 องศาเซลวิน
Methanation	$\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-204	-227
	$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	-168	-191
Methanol formation	$\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$	-92	-105
	$\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	-51	-71
Char formation	$0.17\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5 \rightarrow \text{C} + 0.85\text{H}_2\text{O}$	-81	-80
Water gas shift	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	-41	-34



สำหรับกลไกการเกิดการสลายตัวของโครงสร้างของชีวมวลอันได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วดังกลไกการเกิดปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กลไกการแตกตัวขององค์ประกอบชีวมวล[18]



**รูปที่ 2.10** การเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง [18]

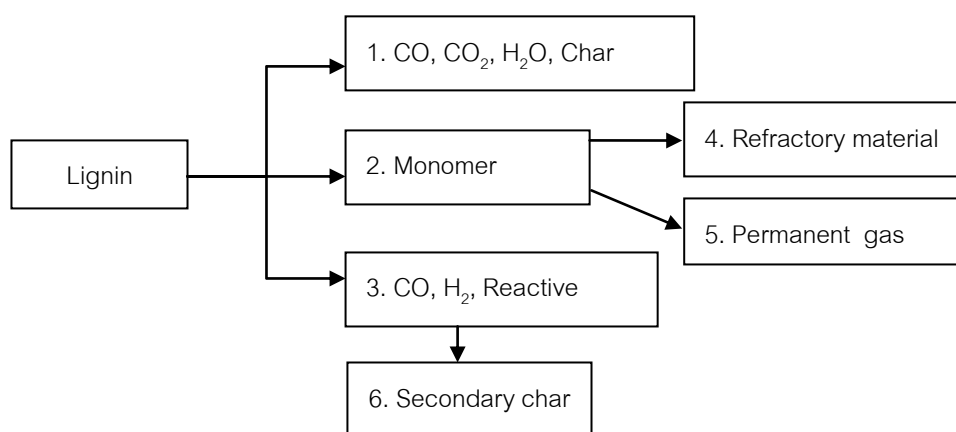
ช่วงอุณหภูมิสูง (มากกว่า 500 องศาเซลเซียส) กลไกการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงเป็นไปตามรูปที่ 2.10 เมื่อความดันสูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาตามปฏิกิริยาที่ 4 และ 6 ได้ ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านสารในขณะที่เกิดสารระเหยได้ผ่านปฏิกิริยาที่ 3 และ 5 จะต้องใช้ความดันต่ำลง การเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง [18]

## 2. เฮมิเซลลูโลส

การไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลสจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊สและน้ำมันที่น้อยกว่าเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน เมื่อพิจารณาถึงปฏิกิริยาที่ทำให้ได้สารระเหยที่สามารถควบแน่นได้จะพบว่า มีลักษณะเช่นเดียวกับเซลลูโลส โดยกลไกของการเกิดไพโรไลซิสของ เฮมิเซลลูโลสจะมีการสลายตัว 2 ขั้นตอน โดยเริ่มจากการดีพอลิเมอไรเซชันไปเป็นพวกที่ละลายน้ำได้ตามด้วยการสลายตัวไปเป็นสารระเหยได้โดยในช่วงแรกเกิดการแตกสลายพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมและออกซิเจนอะตอมไปเป็นเพนโตซาน(Pentosan)นำไปสู่การเกิดฟอร์มัลดีไฮด์ กรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนนอกไซด์ ซึ่งมีผลกระทบต่อกรไพโรไลซิสของเซลลูโลสและลิกนิน

### 3. ลิกนิน

ลิกนินมีขนาดโมเลกุลใหญ่ประกอบรวมกันจึงทำให้มีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาได้หลายทางที่จะได้สารประกอบอินทรีย์ที่สามารถควบแน่นได้โดยการเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญแสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งชนิดของชีวมวลและภาวะที่ใช้ในการทดลองจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างมาก โครงสร้างของปฏิกิริยาเหล่านี้จะคล้ายกับการเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสช่วงอุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 250 องศาเซลเซียส) จะเกิดปฏิกิริยาการไล่โมเลกุลน้ำออกตามปฏิกิริยาที่ 1 แล้วเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลทำให้ได้แก๊สและถ่านชาร์ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (250-500 องศาเซลเซียส) จะเกิดลิกนินโมโนเมอร์ขึ้นจากปฏิกิริยาที่ 2 โดยที่อัตราการให้ความร้อนสูงและความดันต่ำจะทำให้เกิดโมโนเมอร์ของลิกนิน



รูปที่ 2.11 การเกิดไพโรไลซิสของลิกนิน [18]

ช่วงอุณหภูมิสูง (มากกว่า 500 องศาเซลเซียส) แบ่งการเกิดปฏิกิริยาได้ 2 แบบ คือ โมโนเมอร์ต่างๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ 2 จะเริ่มมีการสลายตัวในวัฏภาคไอระเหยและเกิดการไพโรไลซิสตามปฏิกิริยาที่ 4 และ 5 โดยการควบแน่นของวัฏภาคไออุณหภูมิค่อนข้างต่ำตามปฏิกิริยาที่ 4 จะได้สารที่ควบแน่นได้ขึ้นในขณะที่การแตกตัวทางความร้อน ของวัฏภาคไอที่อุณหภูมิสูงกว่าตามปฏิกิริยาที่ 5 จะได้สารประกอบมีเทน สารไฮโดรคาร์บอน และแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ เมื่อถูกให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะเกิดปฏิกิริยาที่ 3 และ 6 และเมื่อเกิดการควบแน่นของสารที่เหลืออยู่ในไอระเหยในภาวะอิมตัวจะเกิดชาร์ขึ้น ซึ่งการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาสลายตัวตามปฏิกิริยาที่ 3 และได้แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ปริมาณสูง

## 2.9 ผลกระทบตัวแปรต่างๆต่อการไฟโรไลซิส[19]

การไฟโรไลซิสให้ความสำคัญถึงอัตราและปริมาณของสารระเหยที่ได้ รวมถึงภาวะในการทดลอง โดยตัวแปรที่สำคัญคือองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในชีวมวลที่มีสมบัติแตกต่างกันไป นอกจากนี้ตัวแปรพื้นฐานทางกายภาพที่สำคัญได้แก่ เวลา อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อการไฟโรไลซิสดังนี้

### 1. องค์ประกอบของชีวมวล

ชีวมวลมีโครงสร้างและองค์ประกอบแตกต่างกันไปตามส่วนต่าง ๆ และชนิดของพืชนั้น สารเหล่านี้แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางความร้อนและให้ผลิตภัณฑ์ต่างกันไป โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียสจะมีการแตกตัวของโพลีแซคคาไรด์ที่สายเชื่อมกลูโคสิดิก (Glucosidic linkage) ทำให้ได้น้ำมันที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของแอนไฮโดรซูการ์ (Anhydrosugar) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และสารจำนวนเล็กน้อย ในขณะที่ลิกนินส่วนใหญ่จะควบแน่นเป็นชาร์และสารประกอบฟีนอลบางส่วน

### 2. อุณหภูมิในการไฟโรไลซิส (Temperature)

ช่วงอุณหภูมิของการไฟโรไลซิสจะส่งผลกระทบต่อทั้งปริมาณและ องค์ประกอบของสารระเหย โดยการไฟโรไลซิสแบ่งได้เป็น 3 ชั้นคือ ชั้นแรกที่อุณหภูมิระหว่าง 250–300 องศาเซลเซียส จะมีการปลดปล่อยสารระเหย และแก๊สที่ประกอบด้วยออกไซด์ของคาร์บอน และน้ำ ชั้นที่สองอุณหภูมิระหว่าง 350–500 องศาเซลเซียส จะมีการสลายตัวที่ปล่อยสารระเหยออกมาประมาณสามในสี่ของสารระเหย ชั้นที่สามอุณหภูมิระหว่าง 500–700 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของชาร์รวมถึงการปลดปล่อยแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้เช่น แก๊สไฮโดรเจน การศึกษาอุณหภูมิในการไฟโรไลซิส ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียสถึง 900 องศาเซลเซียส พบว่าช่วงอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส การเกิดระเหยของสารระเหยต่างๆ ร้อยละ 75 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80 ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยาการไฟโรไลซิสทั้งในด้านปริมาณและองค์ประกอบสารระเหย[20] คือเมื่ออุณหภูมิสูงเพิ่มมากขึ้นน้ำหนักที่หายไปเพิ่มมากขึ้น ปริมาณถ่านชาร์ลดลงและปริมาณแก๊สมากขึ้น

นอกจากนี้การศึกษาการไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะได้แก๊สเพิ่มมากขึ้น คุณสมบัติของน้ำมันจะมีโครงสร้างเปลี่ยนไปด้วย เพราะการเพิ่มของอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัสดุติดด้วย เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชาร์จากปฏิกิริยาการสลายตัวชั้นที่สองเพิ่มมากขึ้น เกิดแก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

และแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณทาร์และชาร์ที่ได้ลดลงและมีการสะสมของคาร์บอน โดยการสลายตัวของสารระเหยบนพื้นผิวถ่านชาร์ที่ร้อน ในปฏิกิริยาขั้นต้นเกิดชาร์ในปริมาณน้อย และแก๊สที่ไม่สามารถกลั่นตัวได้ (Non-condensable gas) มาจากการหลอมเหลวในขั้นแรก [21] นอกจากนี้สารระเหยที่ได้ออกมาที่มีปริมาณที่น้อย และแก๊สที่ได้ส่วนใหญ่เป็นน้ำและสารประกอบออกไซด์ของคาร์บอน หลังจากนั้นชั้นที่สองที่เกิดขึ้นเป็นแก๊สซิฟิเคชัน ปล่อยแก๊สที่ไม่ควบแน่นโดยส่วนใหญ่เป็นแก๊สไฮโดรเจน ที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปถ่านชาร์ต่อไป

### 3. อัตราการให้ความร้อน (Heating rate)

อัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส สภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งได้ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที เป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยออกอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนต่ำทำให้มีผลต่างของอุณหภูมิน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด และอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลต่างของอุณหภูมิมากกว่า 103–105 องศาเซลเซียสต่อวินาที การไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นชาร์ ส่วนการไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนสูงได้ชาร์จำนวนน้อยมาก

การไพโรไลซิสถ้าอัตราการให้ความร้อนเร็วเกินไปทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้มีมาก ถ่านชาร์น้อย และการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้นและของเหลวมากกว่าการให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ช้า [22]

นอกจากนี้อัตราการให้ความร้อนส่งผลอย่างมากต่อการไพโรไลซิส การเกิดถ่านชาร์ของชีวมวลเนื่องจากชีวมวลมีปริมาณเซลลูโลสสูง อัตราการให้ความร้อนมีผลอย่างมากต่อการไพโรไลซิสของเซลลูโลส โดยเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเซลลูโลสและเกิดการดีพอลิเมอไรเซชันของเซลลูโลส โดยเปลี่ยนไปเป็นแอนไฮโดรเซลลูโลสที่มีความเสถียรมากขึ้น และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชาร์มากขึ้น และเวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยอัตราการให้ความร้อนก็จะส่งผลต่อปฏิกิริยาน้อยเพราะเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยมาก[23]

#### 4. ขนาดของอนุภาค (Particle size)

ขนาดของอนุภาคส่งผลต่อปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ เนื่องจากขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) โดย อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวที่สูง ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ทั่วถึงกระจายความร้อนในการเผาไหม้ได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ แต่ขนาดอนุภาคที่เล็กเกินไปเมื่อทำการทดลองอาจเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ไม่ดีส่งผลทำให้เกิดการสลายตัวได้ไม่ดี โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์จากอนุภาคขนาดเล็กจะให้ร้อยละผลิตภัณฑ์สูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่

#### 5. สภาวะบรรยากาศ (Atmosphere)

ภาวะบรรยากาศของปฏิกิริยาการไพโรไลซิสที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เช่น ปฏิกิริยาไพโรไลซิสในบรรยากาศที่มีไฮโดรเจน หรือไฮโดรไพโรไลซิส (Hydropyrolysis) สามารถเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหยได้ และช่วยเพิ่มปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำได้

#### 6. อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (Flow rate of carrier gas)

อัตราการไหลของแก๊สตัวพา มีผลต่อปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ กล่าวคือ ถ้าอัตราการไหลของแก๊สตัวพามีค่าสูงจะทำให้แก๊สตัวพาขจัดสารระเหยต่างๆ ออกจากระบบเผาไหม้ได้เร็วขึ้น การเกิดปฏิกิริยาอาจเกิดไม่สมบูรณ์ทำให้ได้ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่เป็นทาร์ลดลงและถ้าอัตราการไหลของแก๊สตัวพาช้าเกินไปทำให้สารระเหยต่างๆ อยู่ในระบบเผาไหม้นานขึ้นการแตกตัวขั้นที่สองได้สารประกอบที่เป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้นทาร์และถ่านชาร์ลดน้อยลง

#### 7. เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน (Resident time)

เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อนมีผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์คือ ถ้าเวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อนน้อยเกินไปการสลายตัวก็จะเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ และถ้าเวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อนมากเกินไปจะทำให้ได้ปริมาณของแก๊สเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสารระเหยต่างๆ จะเกิดการแตกตัวขั้นที่สองต่อไปอีก และปริมาณถ่านชาร์จะมีแนวโน้มของร้อยละคาร์บอนในองค์ประกอบลดลง เนื่องจากสารระเหยมีปริมาณลดน้อยลง

## 2.10 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส[24]

เมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไปของน้ำ สารระเหยรวมทั้งแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วยองค์ประกอบของสารอินทรีย์และอนินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผลรวมของการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ และเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มี 3 ประเภทคือ

### 1. ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

ถ่านชาร์ เป็นของแข็งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนพทาซีน แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน เช่น การเผาอิฐ การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตปูนและซีเมนต์ รวมถึงใช้ในโรงงานถลุงเหล็ก ไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันจากพวกสารระเหยและสารประกอบพวกกำมะถัน

### 2. ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

น้ำมันชาร์ ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นสารแนพทาซีนเชื่อมด้วยหมู่เอทีลีน โมเลกุลของน้ำมันชาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่  $C_5$ - $C_6$  ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่าง ๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด แบ่งตามช่วงอุณหภูมิใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

- น้ำมันเบา (Light oil) ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า  $210^{\circ}C$  ได้แก่ เบนซิน โทลูอีน
- น้ำมันช่วงกลาง (Middle oil) ช่วงอุณหภูมิ  $210 - 260^{\circ}C$  ได้แก่ ไพรีดีน ฟีนอล
- น้ำมันช่วงหนัก (Heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ  $260 - 300^{\circ}C$  ได้แก่ แนพทาซีน ไดเมทิล
- น้ำมันแอนทาซีน (Anthracence) ช่วงอุณหภูมิ  $300 - 400^{\circ}C$  ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีนานทีน
- พีทซ์ (Pitch) ช่วงอุณหภูมิมากกว่า  $400^{\circ}C$  ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไข (Red wax) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

### 3. ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

แก๊ส เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ แก๊สมีเทน แก๊สเอทิลีน แก๊สอีเทน โดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทนและคาร์บอนมอนนอกไซด์ซึ่งนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ และการผลิตไฟฟ้า แก๊สที่เผาไหม้ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

#### ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกายภาพของเหลวจากไพโรไลซิส[25]

สมบัติทางกายภาพ	ไบโอออยล์	น้ำมันหนัก
ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	15-30	0.1
ค่ากรด-เบส	2.5	-
ความถ่วงจำเพาะ	1.2	0.94
องค์ประกอบของธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
คาร์บอน	54-58	85
ไฮโดรเจน	5.5-7.0	11
ออกซิเจน	35-40	1.0
ไนโตรเจน	0-0.2	0.3
เถ้า	0-0.2	0.1
ค่าความร้อน (เมกกะจูล/กิโลกรัม)	16-19	40
ค่าความหนืด (ที่ 50 องศาเซลเซียส) (เซนติสโตก)	40-100	180
ของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.2-1	1
กากของแข็งจากการกลั่น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	สูงกว่า 50	1



## 2.11 น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil)

น้ำมันชีวภาพ เป็นชื่อโดยทั่วไปว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันจากไพโรไลซิส ของเหลวจากไม้ น้ำมันจากไม้ คัดส่วนของเหลว ของที่กลั่นได้จากไม้และกรดที่ได้จากไพโรไลซิส คือ ของเหลวสีน้ำตาลดำ มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบโดยมีสารประกอบอินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ แอลกอฮอล์ (Alcohols) อัลดีไฮด์ (Aldehydes) คีโตน (Ketones) กรดอะซิติก (Acetic acid) ฟิวแรน (Furans) และแอนไฮโดรสชูการ์ (Anhydrosugars) [26] ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบรวดเร็วโดยการแตกสายโซ่โพลีเมอร์ (Depolymerizing) ของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เซลลูโลส (Cellulose) และลิกนิน (Lignin) ที่อุณหภูมิสูงได้เป็นไอระเหยและผ่านการควบแน่นเป็นของเหลว 2 ชั้นแยกเป็นน้ำมันเบา (Light oil) อยู่ชั้นบน และน้ำมันหนัก (Heavy oil) อยู่ชั้นล่าง โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางเคมีของเหลวจากไพโรไลซิสเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลและน้ำมันเตา [27]

คุณสมบัติ	น้ำมันชีวภาพ	ดีเซล	น้ำมันเชื้อเพลิง
ค่าความร้อน บีทียูต่อปอนด์ เมกกะจูลต่อลิตร	7100 19.5	22000 42	18200 39.4
ความหนืด ที่ 50°C ที่ 80°C	7 4	5 3	50 41
เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	<0.02	<0.02	0.03
กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	trace	<0.2	0.5-3
ไนโตรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	trace	trace	0.3
จุดไหลเท (°C)	-33	30	-18
Turbine emission ไนโตรเจนออกไซด์ ซัลเฟอร์ออกไซด์	<0.7 0	<0.7 0.2	na na

## การนำน้ำมันชีวภาพไปประยุกต์ใช้

ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพมีต่ำกว่าค่าความร้อนเชื้อเพลิงฟอสซิล เพราะมีสารประกอบที่มีหมู่ออกซิเจนและส่วนของน้ำ น้ำมันชีวภาพคล้ายกับน้ำมันเบา ถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันในด้านความหนืด ความเสถียร ค่าความเป็นกรด-เบส และระบบการปลดปล่อยแก๊สพิษ นอกจากนี้การควบแน่นส่วนของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลสามารถช่วยกำจัดน้ำได้ และทำให้ค่าความร้อนของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น[28]

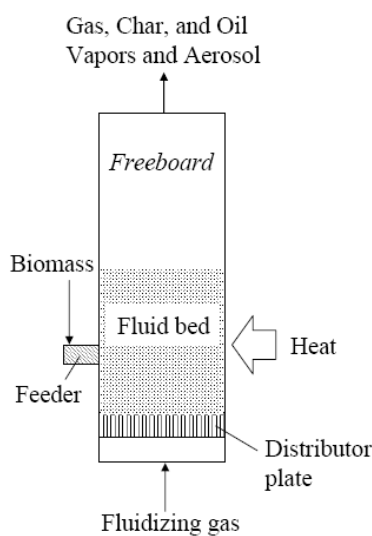
- การผลิตแก๊สสังเคราะห์ ชีวมวลและไบโอดีเซลสามารถผ่านกระบวนการแปรรูปผลิตเป็นเชื้อเพลิงสะอาดได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ชีวมวลแข็งและการใช้ไบโอดีเซลเป็นสารป้อนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์ พบว่าหากต้องการผลิตแก๊สสังเคราะห์ในปริมาณมากจากชีวมวลบางชนิดในรูปของของแข็งจะพบปัญหาของปริมาณแก๊สสูง แต่เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นสารป้อนซึ่งมีปริมาณแก๊สต่ำจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้และการขนส่งไบโอดีเซลก็สามารถใช้อุปกรณ์และพาหนะที่ใช้ขนส่งน้ำมันปิโตรเลียมได้ซึ่งประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่ากรณีการขนส่งชีวมวลในรูปของแข็ง นอกจากนี้การทำแก๊สซิฟิเคชันของน้ำมันชีวภาพโดยใช้ออกซิเจนร่วมทำปฏิกิริยาสามารถเพิ่มปริมาณแก๊สสังเคราะห์สำหรับกระบวนการฟิชเชอร์โทรป (Fisher Tropse)
- น้ำมันหรือไบโอดีเซลที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลที่อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ความดันบรรยากาศ อัตราการป้อน 4.5-5.5 กรัมต่อชั่วโมงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30 มล.ต่อนาที ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้ร้อยละ 83 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สประกอบด้วยแก๊สสังเคราะห์ร้อยละ 16-36 โดยโมล อีเทนร้อยละ 21-31 โดยโมล มีเทนร้อยละ 19-27 โดยโมล และมีค่าความร้อนเท่ากับ 1300-1700 บีทียูต่อลูกบาศก์ฟุต[29] ซึ่งมีค่าสูงกว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการใช้ชีวมวลแข็งโดยตรง
- น้ำมันชีวภาพมีข้อจำกัดในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์โดยตรงเพราะน้ำมันชีวภาพมีความเป็นกรดสูงทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบหัวฉีดภายในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามจากรายงานที่ผ่านมา[30] พบว่าสามารถใช้น้ำมันชีวภาพกับเครื่องยนต์ที่ใช้แก๊สเชื้อเพลิงได้ ดังนั้นการนำน้ำมันชีวภาพไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการ

ผลิตกระแสไฟฟ้าจึงมีความเหมาะสมมากกว่าการนำไปใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ หรือต้องปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพให้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

## 2.12 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ [31]

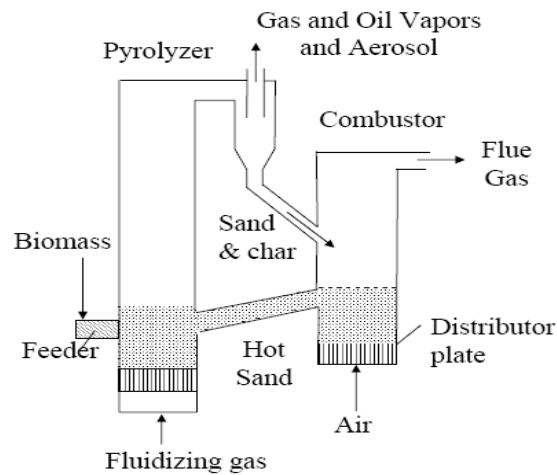
เครื่องปฏิกรณ์ที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพมี 5 ประเภท ได้แก่

- เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์โดยทำการป้อนอากาศจากทางด้านล่างของเบด ซึ่งแรงดันของอากาศจะช่วยดันให้เบดขยายตัวจนกระทั่งอนุภาคอยู่ในภาวะแขวนลอยและหมุนวนอยู่ในกระแสอย่างสมดุล แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองแก๊สขึ้นแล้วแทรกตัวขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด เมื่อฟองแก๊สลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย แสดงดังรูปที่ 2.12



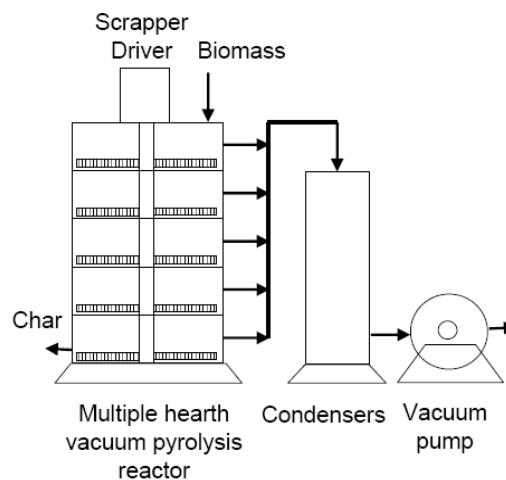
รูปที่ 2.12 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ [31]

- เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน (Circulating fluidized beds and transported bed) เป็นเครื่องปฏิกรณ์มีอนุภาคอยู่ในภาวะแขวนลอยและหมุนวนอยู่ในกระแสสูงขึ้นไปจนเบดบางส่วนหลุดได้ออกไป ดังนั้นต้องทำการติดตั้งไซโคลนเพื่อนำอนุภาคกลับมาในขณะที่แก๊สไหลผ่านไซโคลนไปทางด้านบนและกลับมาป้อนอีกครั้งทางล่างเบดดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน[31]

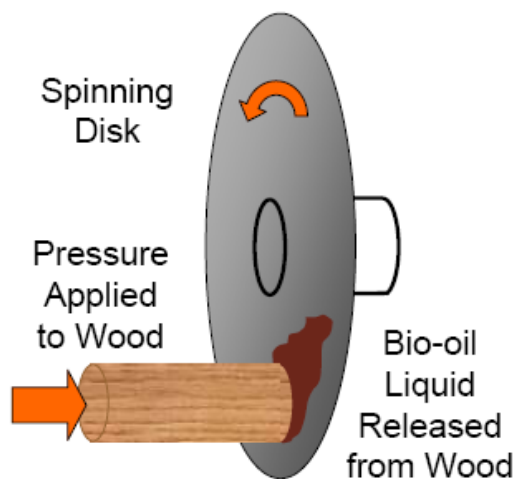
- เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolysis reactor) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ในการสลายตัวของชีวมวลภายใต้ภาวะการลดความดันและใช้เวลาในเครื่องปฏิกรณ์นาน ซึ่งต่างจากการไพโรไลซิสแบบเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสลายตัวเป็นไอกับกรณีของการไพโรไลซิสแบบเร็วแล้วจะเกิดได้เร็วเหมือนกันโดยความดันที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 15 กิโลปาสคาล ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เครื่องปฏิกรณ์แบบสุญญากาศ[31]

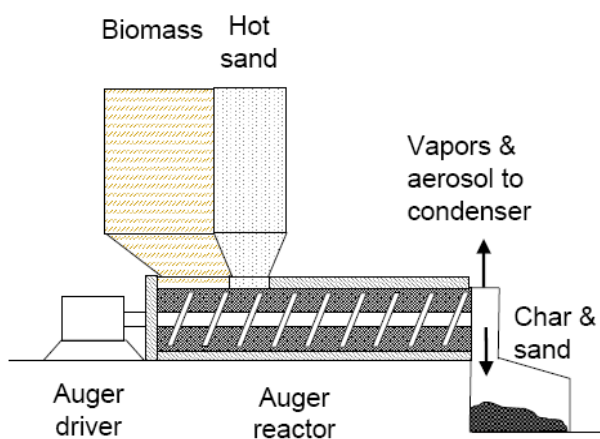
- เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor) เครื่องปฏิกรณ์ที่อาศัยการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่ชีวมวลเคลื่อนที่ไปชนกับของแข็งซึ่งเป็นแหล่งให้ความร้อน โดยจุดเด่นของกระบวนการแอบลาทีฟไพโรไลซิส คือ การให้

ความดันสูงในการป้อนอนุภาคชีวมวลบนผนังเครื่องปฏิกรณ์ที่ร้อนซึ่งจะทำให้เกิดแรงหมุนเหวี่ยง อนุภาคชีวมวลจะเคลื่อนที่ชนกับผนังเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียสจึงเกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดี ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 เครื่องปฏิกรณ์แบบแอบลาทีฟ[31]

- เครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน (Auger reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ใช้แก๊สดัดพาและใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส ทำงานแบบต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์ไอที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกควบแน่นกลายเป็นน้ำมันชีวภาพดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.16 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน[31]

### 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nakorn และคณะ [32] ศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวของฟางข้าว แกลบ และซังข้าวโพด โดยใช้เทคนิค TG-MS ซึ่งให้ความสนใจกับแก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส น้ำหนักที่หายไปและอัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์จะต่างกันถึงแม้ว่าสารตัวอย่างจะมีองค์ประกอบของธาตุเหมือนกัน พบว่าได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยอัตราการเกิดแก๊สของสารตัวอย่างแต่ละตัวแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน พบว่าเซลลูโลสและลิกนินจะทำปฏิกิริยากันระหว่างการเกิดไพโรไลซิส ทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ลดลง แต่ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าองค์ประกอบทั้งสองสามารถกำจัดคาร์บอนในกระบวนการไพโรไลซิสได้ เนื่องจากผลของการเกิดปฏิกิริยา cross-link ระหว่างเซลลูโลสและลิกนินไปเป็นน้ำและหมู่เอสเทอร์ในกระบวนการไพโรไลซิส

Ayse E. Putun และคณะ [33] ศึกษาถึงภาวะการไพโรไลซิสของฟางข้าวที่มีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ ได้แก่ อัตราความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที อุณหภูมิที่ใช้ ขนาดของอนุภาค อัตราการไหลของแก๊สและความเร็วของไอน้ำ ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 673 773 823 และ 973 องศาเซลเซียสพบว่า ที่อุณหภูมิ 823 องศาเซลเซียสให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ 27.26 เปอร์เซ็นต์ ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.425-0.85 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำมันชีวภาพ ที่ได้ 27.77 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลของไนโตรเจนที่เหมาะสมอยู่ที่ 200 มิลลิลิตรต่ออนาที ความเร็วของไอน้ำอยู่ที่ 2.7 เซนติเมตรต่อวินาที

Zheng Ji-lu และคณะ [34] ไพโรไลซิสต้นฝ้ายแบบเร็วที่อุณหภูมิ 480 ถึง 530 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดเบด ได้น้ำมันชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ผลการทดลองได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ 55 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีแมสสเปกโทรเมทรี-แก๊สโครมาโทกราฟี พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยน้ำ กรด และสารประกอบเฮเทอโรไซคลิก วิเคราะห์ค่าความร้อนอยู่ที่ 17.77 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ความคงตัว การละลายและการกักคาร์บอนมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับน้ำมันดีเซล สามารถนำไปใช้การเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ หรือ เต้าเผา หรือนำไปกลั่นแยกใช้ในยานพาหนะ

Lu Qiang และคณะ [35] ทำการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากแกลบศึกษาที่อุณหภูมิ 400 ถึง 550 องศาเซลเซียส โดยได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุด 50 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบโดย

วิธีอินดักทีฟ-คัพเปิลพลาสมา อะตอมมิก แอปซอร์ปชัน สเปกโทรเมตรี วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพบว่า ประกอบไปด้วยสารมากกว่า 50 ชนิด เช่น กรด แอลกอฮอล์ ฟีนอล เอสเทอร์ คีโตน อัลดีไฮด์ ฟิวราน และทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน การคงสภาพ ความหนืด การหล่อลื่น การสึกหรอ จะมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

M. Asadullah และคณะ [36] ศึกษาการไพโรไลซิสของกากขานอ้อยในระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ในช่วงที่อุณหภูมิต่างกันตั้งแต่ 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส น้ำมันชีวภาพที่ได้สองส่วนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้อ้อยละ 66 แก๊สที่ไม่ระเหยได้จะประกอบไปด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทน แก๊สอีเทน แก๊สโพรเพนและแก๊สไพรีน ความหนาแน่นเท่ากับ 1130 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ ความหนืด 19.32 เซนติพอยส์ น้ำมันชีวภาพที่ได้จากส่วนที่หนึ่งมีความหนาแน่น 1050 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความหนืด 4.25 เซนติพอยส์ น้ำมันชีวภาพที่ได้จากส่วนที่สอง ค่าความร้อนสูงอยู่ที่ 17.25 pH เท่ากับ 3.5 และ ค่าความร้อนเท่ากับ 19.91 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และมี pH เท่ากับ 4.5

สินีนางู รอดจัน [37] ศึกษาการไพโรไลซิสของชีวมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อไรเซอร์ 2.5 เซนติเมตร สูง 165 เซนติเมตร ทำศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 650-850 องศาเซลเซียส ร้อยละของซังข้าวโพดในเชื้อเพลิงผสมช่วง 0-100 ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ช่วง 1-5 และร้อยละของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาช่วง 5-9 พบว่าเมื่อร้อยละของซังข้าวโพดในเชื้อเพลิงผสมเพิ่มขึ้น และร้อยละนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ร้อยละความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นน้อย ส่วนแก๊สมีเทนลดลงมาก ที่ภาวะอุณหภูมิเหมาะสมคือ 850 องศาเซลเซียส ซังข้าวโพดในเชื้อเพลิงผสมเท่ากับร้อยละ 100 ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เท่ากับร้อยละ 5 และร้อยละของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 9 โดยได้ร้อยละความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับร้อยละ 52.0 และ 18.0 ตามลำดับ

Lee และคณะ [38] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา การปรับสภาพ และระบบการกำจัดถ่านซาร์ในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวผ่านกระบวนการการไพโรไลซิสแบบเร็วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดซ์เบด พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงที่สุด คือ 410-510 องศาเซลเซียส พบว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้มีปริมาณโลหะอัลคาไลต่ำ โดยส่วนใหญ่จะติดออกมาจากการกำจัดถ่านซาร์และการปรับสภาพด้วยน้ำกลั่นจะช่วยลดปริมาณ

โลหะอัลคาไล และการปรับสภาพส่งผลให้น้ำมันชีวภาพที่ได้มีความบริสุทธิ์ ปลอดภัยและเพิ่มมูลค่าได้ง่ายขึ้น โดยน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ตัวอย่างเช่น เชื้อเพลิงในการพัฒนาสามารถใช้โดยตรงหรือผสมกับเชื้อเพลิงทางการค้า ข้อดีของการประยุกต์ใช้น้ำมันชีวภาพไปเป็นเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันต่ำ ผลิตภัณฑ์แก๊สหลักที่ได้ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทนที่อุณหภูมิสูงปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทนและแก๊สอื่น ๆ ค่าความร้อนสูงและ ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 15 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม โดยสามารถนำไปเป็นแหล่งพลังงานหรือใช้เป็นตัวดูดซับแก๊ส ได้แก่ แอมโมเนีย

Lu และคณะ [39] ศึกษาสมบัติเชิงเคมีและสมบัติเชิงกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสเปลือกข้าวด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว พบว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้มีองค์ประกอบของไนโตรเจนและธาตุอินทรีย์ การไหลจะเป็นการไหลแบบไม่เป็นนิวโตเนียน น้ำมันชีวภาพไม่เสถียรต่อความร้อน การเติมเมทานอลจะเพิ่มความเสถียรกับน้ำมันชีวภาพ มีปริมาณน้ำของแข็งสูง มีสมบัติในการกักความร้อน มีความเป็นพิษ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการเพิ่มประสิทธิภาพก่อนนำไปใช้จริง

Su และคณะ [40] ศึกษาการไพโรไลซิสของฟางข้าวและกากไม้ไผ่โดยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดที่ประกอบด้วยระบบแยกถ่านชาร์ และศึกษาอิทธิพลของปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆ ที่มีต่อผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพของระบบการแยกถ่านชาร์ ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 415-540 องศาเซลเซียสสำหรับฟางข้าว และช่วงอุณหภูมิ 350-510 องศาเซลเซียสสำหรับกากไม้ไผ่ มีการศึกษาขนาดอนุภาคของสารเชื้อเพลิง อัตราการป้อนของสารเชื้อเพลิง และชนิดของก๊าซตัวพา พบว่า ช่วงอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพคือ 440-500 องศาเซลเซียสสำหรับฟางข้าว และ 405-440 องศาเซลเซียสสำหรับกากไม้ไผ่ ผลการทดลองของกากไม้ไผ่ปริมาณการผลิตน้ำมันชีวภาพอยู่ที่มากกว่าร้อยละ 70 ของน้ำหนักกากไม้ไผ่ เมื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของสารเชื้อเพลิง อัตราการป้อนของสารเชื้อเพลิง พบว่าเมื่อให้อัตราของสารป้อนเร็วและขนาดอนุภาคเล็กส่งผลทำให้ได้ประสิทธิภาพของน้ำมันชีวภาพมากกว่า และการใช้ก๊าซผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซตัวพา จะทำให้ปริมาณการผลิตน้ำมันชีวภาพมีมากขึ้น องค์ประกอบหลักของน้ำมันชีวภาพ ประกอบไปด้วย ฟีนอลิก (Phenolics) กรกอะซิติก (Acetic acid) อัลดีไฮด์ (Aldehydes) คีโตน (Ketones) เฟอร์ฟูรอล (Furfural) เลโวกลูโคซาน (Levoglucozan) กัวไกลคอลล (Guaiacol) และอัลคิลกัวไกลคอลล (Alkyl guaiacol) จากการทดลองยังสามารถผลิตน้ำมันชีวภาพคุณภาพสูง ซึ่งมีความเข้มข้นของโลหะแอลคาไลน์ และแอลคาไลน์เอิร์ธต่ำ



Sensoz และคณะ [41] ศึกษาไพโรไลซิสของเมล็ดดอกคำฝอยในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งในส่วนของโครงสร้างของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิส โดยนำเมล็ดดอกคำฝอยอัดเป็นแผ่นเค้กขนาด 1.8 ตารางมิลลิเมตร ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 30 50 องศาเซลเซียสต่อนาทีที่ภาวะบรรยากาศออกซิเจน และ 50 องศาเซลเซียสต่อนาทีที่ภาวะแก๊สไนโตรเจน ได้เป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่มีค่าความร้อนเท่ากับ 36.84 36.41 36.83 และ 36.00 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ในภาวะที่มีแก๊สออกซิเจนทำให้อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนเท่ากับ 1.50 1.31 1.54 สูงกว่าแก๊สไนโตรเจนที่มีค่าเท่ากับ 1.13 เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Catalytic reforming ของแอลกอฮอล์และสารอะโรมาติกที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบไปเปลี่ยนเป็นแก๊สไฮโดรเจนและ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อนำน้ำมันชีวภาพมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคคลิควิดโครมาโทกราฟี พบว่ามีส่วนที่เป็น Asphaltenes ร้อยละ 50-64.5 และ n-Pentane soluble ร้อยละ 36.5-50.0 โดยน้ำหนัก ยังมีส่วนที่เป็นโทลูอีนและเมทานอล จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่ามีหมู่ของ O-H stretching ที่ช่วง 3100 และ 3400  $\text{cm}^{-1}$  C=O stretching ที่ช่วง 1700 และ 1800  $\text{cm}^{-1}$  ของหมู่ คีโตนและหมู่อัลดีไฮด์ การวิเคราะห์ทางเทคนิค  $^1\text{H}$  NMR พบ Aliphatic hydrogen resonance 0.5-6.5 พีพีเอ็มและ Aromatic hydrogen resonance ในช่วง 6.5-9.0 พีพีเอ็ม วิเคราะห์ทางเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี พบ  $\text{C}_{15}$ - $\text{C}_{36}$  ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 1079 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ความหนืดเท่ากับ 225 เซนติสโตกที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสมีจุดวาบไฟ 58 องศาเซลเซียส

## บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง

### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

#### 1. เตาดอบ

ในรูปที่ 3.1 ภาพของเตาดอบที่ใช้ในการอบเปลือกทุเรียน เพื่อไล่ความชื้นออกจากเปลือกทุเรียน โดยเตาดอบที่ใช้มีการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 135 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

#### 2. เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ

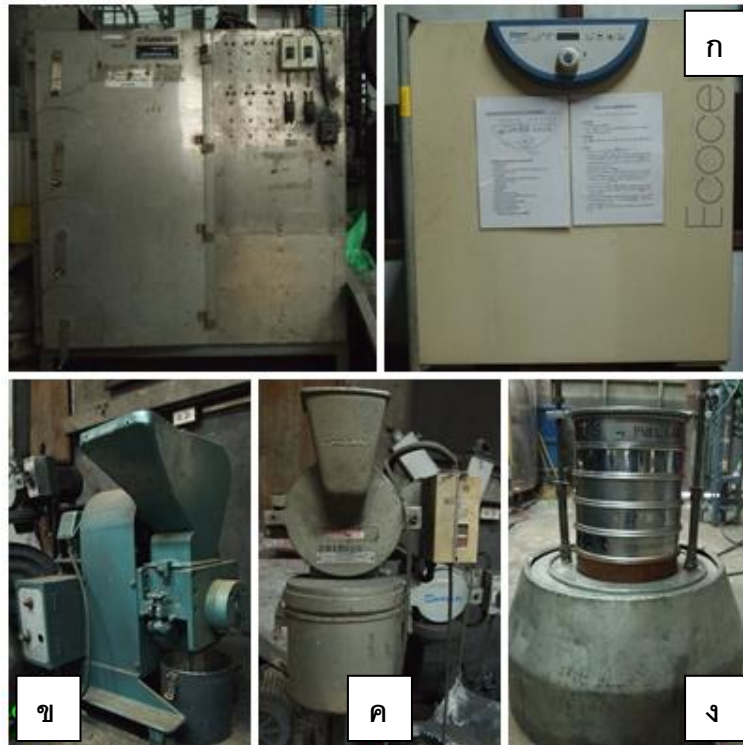
เครื่องมือบดชีวมวลแบบหยาบ (Wood chipper) ยี่ห้อ KMAC รุ่น 3801 ของบริษัท เค.แมชชีน ทำงานด้วยไฟฟ้า 380 โวลต์ 50 เฮิร์ต กำลัง 2 แรงม้า จะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการบดเปลือกทุเรียน

#### 3. เครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด

เครื่องมือบดชีวมวลแบบละเอียด ของ Retsch GMBH wesa-Germany รุ่น 5657 HAAN Type SK1 ทำงานด้วยไฟฟ้า 220/240 โวลต์ 50 เฮิร์ต กำลังไฟฟ้า 1100 วัตต์ เพื่อบดชีวมวลที่ได้มาจากเครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบโดยเครื่องบดชีวมวลละเอียด มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร

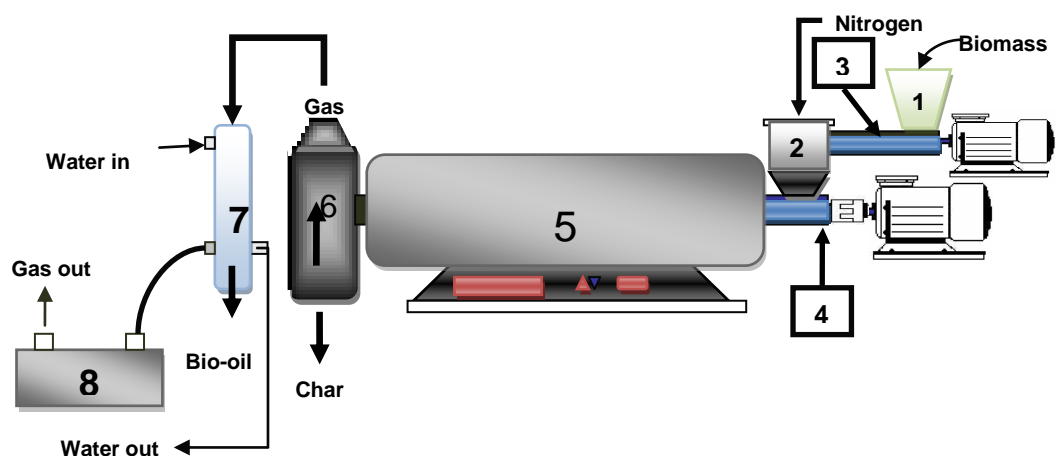
#### 4. เครื่องคัดขนาดและตะแกรงร่อนขนาด

เป็นเครื่องมือคัดขนาดและตะแกรงร่อนคัดขนาดของเปลือกทุเรียนที่ใช้ในการทดลองของ ตะแกรง ของ Endecott SHAKER EF.1-1M411 ทำงานด้วยไฟฟ้า 220/240 โวลต์ 50 เฮิร์ต



รูปที่ 3.1 เครื่องมือในการเตรียมสารตัวอย่าง (ก) เต้าอบ  
 (ข) เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ(ค) เครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด  
 (ง) เครื่องคัดขนาดและตะแกรงร่อน

## 5. ชุดการทดลองไพโรไลซิสเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



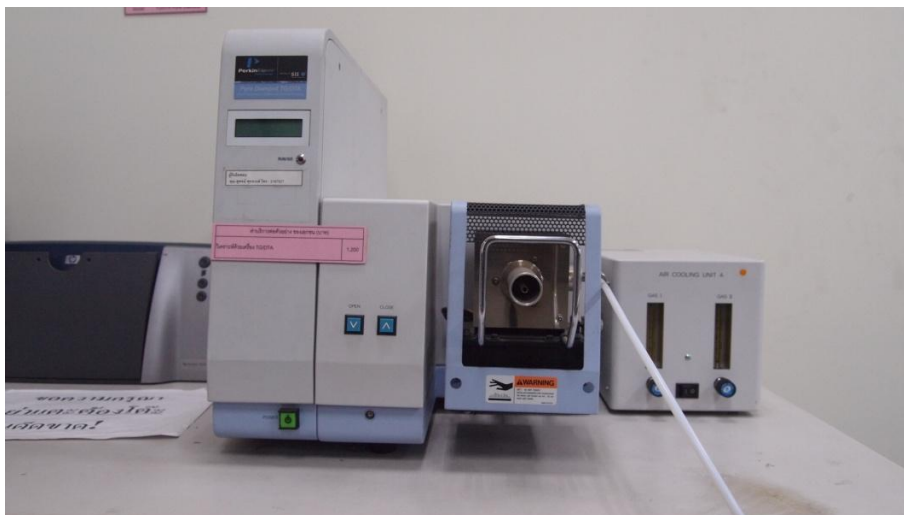
รูปที่ 3.2 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



รูปที่ 3.3 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

- |           |   |
|-----------|---|
| หมายเลข 1 | ตัวเก็บสาร (Hopper 1)   |
| หมายเลข 2 | ตัวเก็บสาร (Hopper 2)   |
| หมายเลข 3 | ชุดสกรู (Screw feeder 1) ขนาดยาว 40 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร |
| หมายเลข 4 | ชุดสกรู (Screw feeder 2) ขนาดยาว 120 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร |
| หมายเลข 5 | เตาเผา (Tube furnace)   |
| หมายเลข 6 | ตัวแยกสาร (Separator)   |
| หมายเลข 7 | ตัวควบแน่นสาร (Condenser)   |
| หมายเลข 8 | ปั๊มสุญญากาศ (Vacumn pump)  |

6. เครื่อง Pyris Diamond TG/DTA, Thermogravimetric/Differential Thermal Analyzer  
เครื่อง TG/DTA เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการสลายตัวทางความร้อน ของ  
เปลือกทุเรียน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 Thermogravimetric/Differential Thermal Analyzer

7. เครื่องรีโอมิเตอร์ (Rheometer)  
เป็นเครื่องที่ศึกษาวัดความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการไพโรไลซิส



รูปที่ 3.5 เครื่อง Rheometer ยี่ห้อ Haake Roto visco1

## 8. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีกับแมสสเปกโตรมิเตอร์

(Gas Chromatograph with Mass Spectrometer)GC-MS

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีกับแมสสเปกโตรมิเตอร์ รุ่นCP- 3800 ยี่ห้อ VARIAN เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สารประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว



รูปที่ 3.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีกับแมสสเปกโตรมิเตอร์

(Gas Chromatograph with Mass Spectrometer, GC-MS)

## 9. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy(FTIR)

FTIR รุ่น 470 FT-IR ใช้วิเคราะห์เกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ หาคู่ฟังก์ชัน สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างทั้งสถานะที่เป็นของแข็งและของเหลว



รูปที่ 3.7 FTIR รุ่น 470 FT-IR

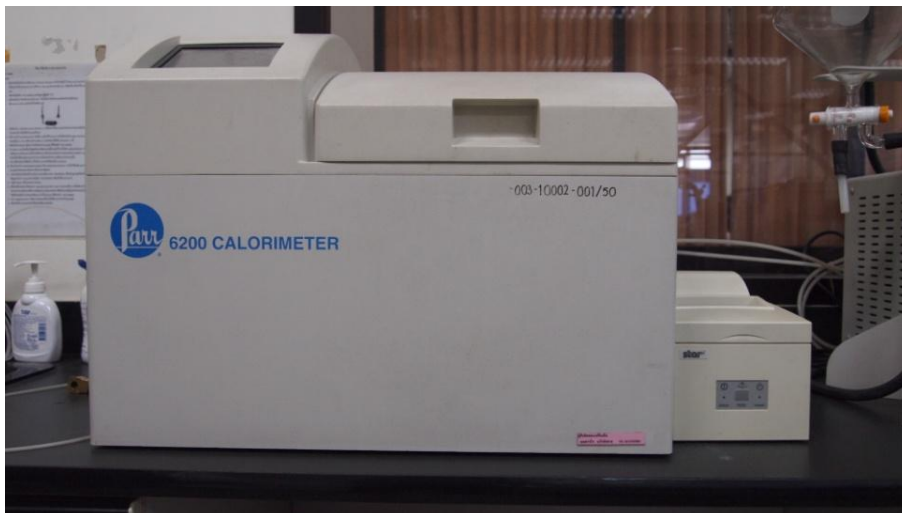
## 10. เครื่อง CHN2000

เป็นเครื่องการวิเคราะห์หาปริมาณ carbon,hydrogen,nitrogen ที่ได้จากการเผาไหม้ของสารตัวอย่าง



รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN2000

## 11. เครื่อง Parr 6200 Calorimeter ใช้ในการหาค่าความร้อนของสาร



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์ความร้อน(Calorimeter)รุ่น Parr 6200 Calorimeter

### 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

1. เปลือกทุเรียนบดละเอียดมีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร 250-450 ไมโครเมตร 450-650 ไมโครเมตร 650-850 ไมโครเมตรและมากกว่า 850 ไมโครเมตร
2. แก๊สไนโตรเจน 99.50% จากบริษัท แพรกแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
3. เตตระไฮโดรฟูราน (Tetra Hydro Furan, THF)



### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 1. การเตรียมชีวมวล

- เปลือกทุเรียนไปตากแห้งเพื่อไล่ความชื้นบางส่วนก่อนนำไปบดละเอียดมีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร 250-450 ไมโครเมตร 450-650ไมโครเมตร 650-850 ไมโครเมตรและมากกว่า 850 ไมโครเมตร
- อบเปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสนาน 24 ชั่วโมงให้มีความชื้นน้อยกว่า 5 %
- นำเปลือกทุเรียนไปวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis, ASTM D 3173-3175)
- วิเคราะห์โดยแยกธาตุ (Ultimate analysis, ASTM D 3176-89)
- ค่าความร้อนและปริมาณกำมะถันรวม (ASTM D 2015 และ ASTM D 3177 Method B)
- วิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเปลือกทุเรียนซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและอุณหภูมิด้วยเครื่อง Thermogravimetric/Differential Thermal Analyzer (TG/DTA)
- วิเคราะห์ธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในเปลือกทุเรียน

#### 2. ดำเนินการทดลอง

- ไล่อากาศออกจากระบบด้วยการผ่านแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 10-15 นาที
- เปิดเตาเผาโดยศึกษาที่อุณหภูมิ 400 450 500 550 600 และ 700 องศาเซลเซียส
- ปรับความเร็วสกรูเพื่อทำการป้อนสารจำนวน 300 กรัม ขนาดอนุภาคแรกเริ่มน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร ที่อัตราการป้อนสาร 2.90 กิโลกรัม/ ชั่วโมง
- เปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ผ่านตัวควบแน่นสาร
- ทำการศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมัน ได้แก่
- อุณหภูมิในช่วง 400, 450, 500, 550,600 และ 700 องศาเซลเซียส
- ขนาดอนุภาคสามช่วงอนุภาคน้อยกว่า อนุภาคน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร, 250-450 ไมโครเมตร 450-650ไมโครเมตร และ 650-850 ไมโครเมตร มากกว่า 850 ไมโครเมตร
- อัตราการป้อนสารที่ 2.5 2.9 3.3 และ 3.6 กิโลกรัม/ชั่วโมง
- อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพาที่ 0 50 100 200มิลลิลิตร/นาที

- เก็บตัวอย่างน้ำมัน ถ่านซาร์
- คำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และบันทึกผลการทดลอง
- ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง

### 3.4 วิเคราะห์ผลการทดลองของผลิตภัณฑ์

1. วิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเคมี
  - วิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพและถ่านซาร์
  - วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันและถ่านซาร์
  - การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพด้วย FTIR spectroscopy
  - วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพโดยใช้เทคนิค แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)
  - วิเคราะห์ธาตุโลหะของถ่านซาร์
  - การวิเคราะห์จำนวนโปรตอน และคาร์บอน ในโครงสร้าง( $H^1$ NMR)
2. วิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทั่วไป
  - วิเคราะห์ค่าความหนืดมาตรฐาน ด้วยเครื่อง Rheometer
  - วิเคราะห์จุดวาบไฟ (Flash point) ตามมาตรฐาน ASTM D 93
  - วิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH)
  - วิเคราะห์สภาพการละลาย (Solubility)
  - วิเคราะห์ปริมาณเถ้าในน้ำมัน ตามมาตรฐาน ASTM D 524-04
  - วิเคราะห์ปริมาณกากคาร์บอน ตามมาตรฐาน ASTM D 482-95

## 3. การคำนวณร้อยละผลได้จากทดลอง

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลว (\% Liquid yield)} = 100 \times \left[ \frac{W_{Liq}}{W_{ini}} \right]$$

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง (\% Solid yield)} = 100 \times \left[ \frac{W_R}{W_{ini}} \right]$$

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (\% Gas yield)} = 100 - \text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลว} \\ \text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง}$$

เมื่อ	$W_{ini}$	คือ	น้ำหนักรวมของผักตบชวาเริ่มต้น
	$W_R$	คือ	น้ำหนักกากของแข็งที่ได้
	$W_{Liq}$	คือ	น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลว

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติและลักษณะเบื้องต้นของเปลือกทุเรียน

##### 4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของเปลือกทุเรียน

ตารางที่ 4.1 แสดงถึงผลวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของเปลือกทุเรียนที่ใช้ในการศึกษา พบว่ามีปริมาณความชื้นร้อยละ 5.53 สารระเหยร้อยละ 69.59 เถ้าร้อยละ 12.30 และคาร์บอนคงตัวร้อยละ 12.58 ซึ่งปริมาณสารระเหยและคาร์บอนคงตัวบ่งบอกถึงปริมาณสารที่เกิดการไฟโวลซิซออกมาเป็นน้ำมันชีวภาพได้ ส่วนที่เหลือ คือ เถ้าไม่เกิดปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.2 แสดงผลจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าความร้อนของเปลือกทุเรียนแห่งพบว่าเปลือกทุเรียนแห่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบของคาร์บอนร้อยละ 60.31 ไฮโดรเจนร้อยละ 3.06 ไนโตรเจน 8.47 กำมะถันร้อยละ 0.10 และออกซิเจนร้อยละ 28.06 และค่าความร้อนของเปลือกทุเรียนมีค่า 17.88 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม จากการวิเคราะห์พบว่าปริมาณของกำมะถันที่มีอยู่ในเปลือกทุเรียนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับธาตุอื่นๆ ซึ่งเป็นปัจจัยบ่งชี้ค่าการกัดกร่อนของน้ำมันชีวภาพ

#### ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

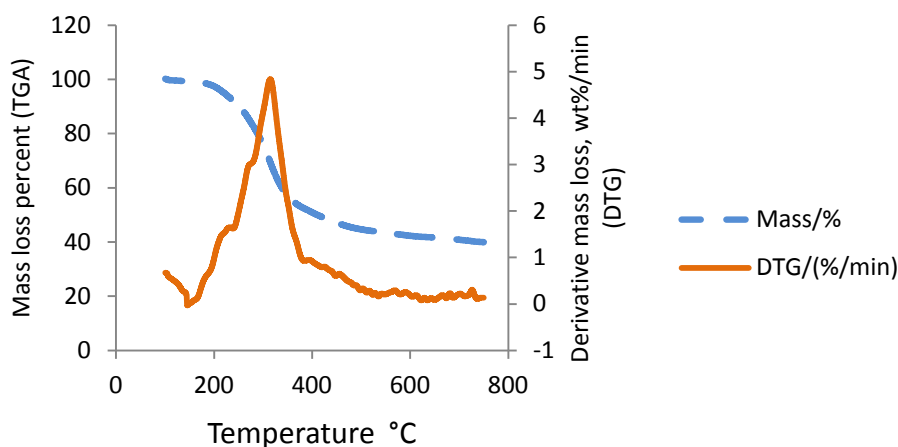
การวิเคราะห์แบบประมาณ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ความชื้น (Moisture)	5.53
สารระเหย (Volatiles)	69.59
เถ้า (Ash)	12.30
คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)	12.58
รวมทั้งหมด	100

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
คาร์บอน (C)	60.31
ไฮโดรเจน (H)	3.06
ไนโตรเจน (N)	8.47
กำมะถัน (S)	0.10
ออกซิเจน (O)	28.06
ค่าความร้อน (MJ/kg)	17.88

#### 4.1.2 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกทุเรียนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermo gravimetric analysis, TGA)

การศึกษาค่าการสลายตัวทางความร้อนของเปลือกทุเรียน จะทำการศึกษาด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) เริ่มต้นภายใต้ภาวะบรรยากาศไนโตรเจน พบว่าในช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นถึง 140 องศาเซลเซียสจะมีการสูญเสียมวลของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นในเปลือกทุเรียน เมื่ออุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียสจะเกิดการสลายตัวในส่วนของเฮมิเซลลูโลส ตามด้วยเซลลูโลส โดยอัตราการสูญเสียมวลสูงสุดอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 314.6 องศาเซลเซียส เมื่อถึงอุณหภูมิประมาณ 397.4 องศาเซลเซียส ลิกนินเริ่มเกิดการสลายตัว หลังจากอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในการเผาไหม้คาร์บอนคงตัวจนและเข้าประมาณร้อยละ 24.88 ของเปลือกทุเรียน ซึ่งพบว่าการวิเคราะห์สลายตัวของชีวมวลด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกได้ผลที่ใกล้เคียงกับการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของเปลือกทุเรียน

#### 4.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในเปลือกทุเรียนด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence)

เปลือกทุเรียน วิเคราะห์หาธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในเปลือกทุเรียน พบว่าจะประกอบไปด้วยธาตุโลหะดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence

ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ(ร้อยละโดยน้ำหนัก)*													
	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO	ZnO
เปลือกทุเรียน	0.19	<0.01	0.15	0.47	0.22	0.03	3.38	0.33	<0.01	0.01	0.16	<0.01	<0.01	0.01

\* 1. ปริมาณธาตุหาโดยวิธี Theoretical formulas, "fundamental parameter calculation"

2. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้คำนวณค่าให้อยู่ในรูป oxide ของธาตุนั้นๆ

จากตารางที่ 4.3 เป็นผลการวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบเปลือกทุเรียนมาวิเคราะห์หาธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบภายในเปลือกทุเรียน ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุต่างๆประกอบไปด้วย แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)ร้อยละ0.19

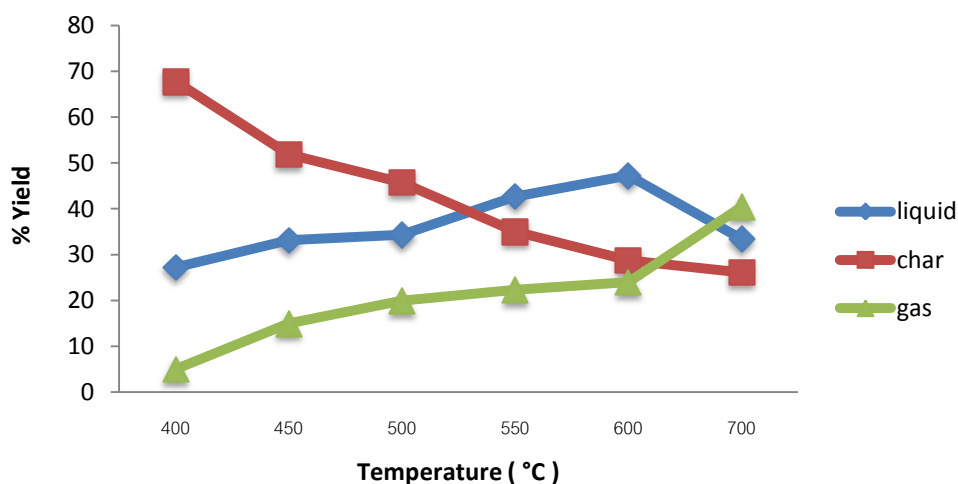
ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ร้อยละ 0.15 โพแทสเซียมไดออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) ร้อยละ 3.38 แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ร้อยละ 0.33 และไดออกซิเดียมไตรออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) น้อยกว่าร้อยละ 0.01 พบว่าธาตุส่วนใหญ่จะอยู่ในหมู่อัลคาไลน์ (Alkali) และอัลคาไลน์เอิร์ท (Alkaliearth) เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียมและคลอไรด์ องค์ประกอบของธาตุเหล่านี้มักจะส่งผลต่อการกัดกร่อนของเครื่องมือที่อุณหภูมิสูง[42]

#### 4.2 ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

จากการไพโรไลซิสเปลือกทุเรียนโดยทำการศึกษากภาวะที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ได้แก่ช่วงอุณหภูมิที่ 400 450 500 550 600 และ 700 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 5 ช่วงขนาด ได้แก่ น้อยกว่า 250 ไมโครเมตร 250-450 ไมโครเมตร 450-650 ไมโครเมตร 650-850 ไมโครเมตร และมากกว่า 850 ไมโครเมตร อัตราการป้อนสารที่ 2.50 2.90 3.30 และ 3.60 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพาที่ 50 100 150 และ 200 มิลลิลิตรต่ออนาที

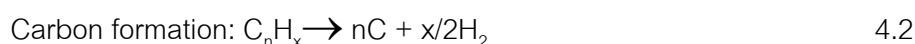
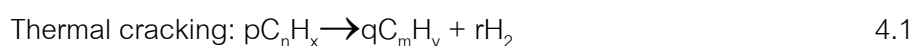
##### 4.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 400 – 700 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคที่ใช้ อยู่ในช่วง 0.450 – 0.850 มิลลิเมตร โดยทำการป้อนแก๊สไนโตรเจนอัตรา 200 มิลลิลิตรต่ออนาที และอัตราการป้อนสารอยู่ที่ 3.3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ในการทดลองจะใช้ปริมาณเปลือกทุเรียนที่ 300 กรัม พบว่าผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นผลของอุณหภูมิที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อปริมาณรวมของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในกระบวนการไพโรไลซิส พบว่าช่วงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีปริมาณสูง ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์น้อย แต่ในส่วนของปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สน้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลของความร้อนที่ให้แก่ระบบยังไม่เพียงพอต่อการสลายตัวโครงสร้างสารภายใน ที่อยู่ในรูปของสารระเหยในเปลือกทุเรียน ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ปริมาณของถ่านชาร์คงเหลือมาก เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 450 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าสูง เป็นร้อยละ 33.15 และผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ลดลงเหลือร้อยละ 51.85 เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้การแตกตัวของ สารระเหย (Thermal cracking) เกิดขึ้นได้ดี ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้า ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊สเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ดังปฏิกิริยา 4.1 และ 4.2



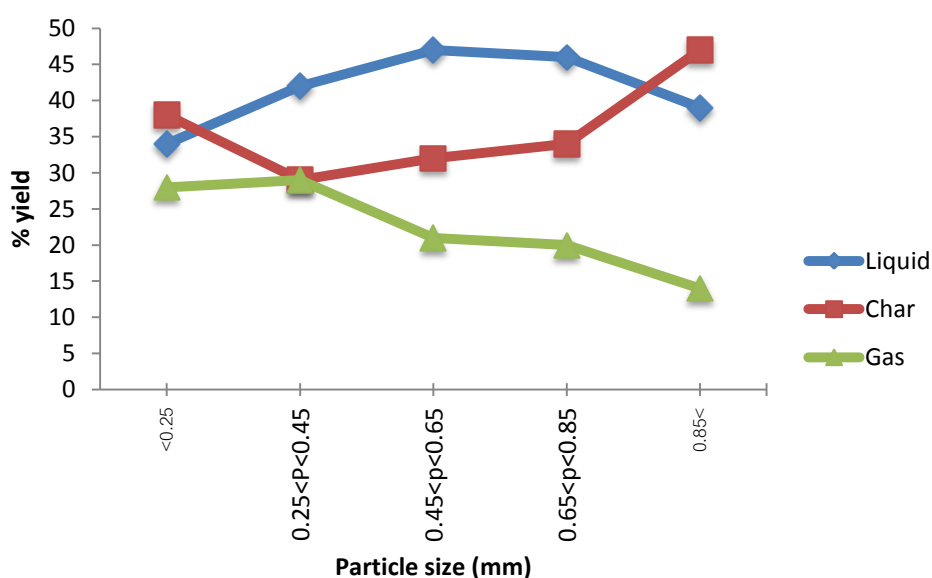
จากสมการปฏิกิริยาข้างต้นเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวและถ่านชาร์มีค่าลดลง ส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะส่งต่อการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวขั้นทุติยภูมิ [43] อย่างต่อเนื่องทันทีทำให้ปริมาณของถ่านชาร์มีการสลายตัวต่อไปได้แก๊สที่ไม่สามารถกลั่นตัวได้ (Uncondensable gas) เป็นผลทำให้มีสารระเหยที่เกิดการแตกตัวไปเป็นแก๊สมีปริมาณเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าลดลง

จากการศึกษาภาวะของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ พบว่าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ทำให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าสูงที่สุดถึงร้อยละ 47.25 ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเลือกใช้อุณหภูมิในช่วงนี้ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส



#### 4.2.2 ผลของขนาดอนุภาค

ศึกษาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยศึกษาที่ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร 250-450 ไมโครเมตร 450-650 ไมโครเมตร 0.65-0.85 ไมโครเมตร และมากกว่า 0.85 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการป้อนของแก๊สดำพาเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการป้อนสารอยู่ที่ 3.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

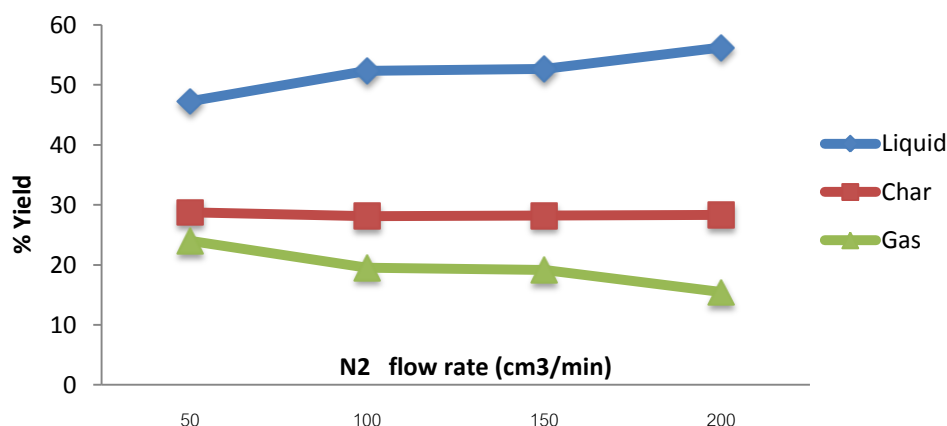
รูปที่ 4.3 แสดงผลของขนาดอนุภาคที่เหมาะสมที่ให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลวสูงสุด โดยพบว่าขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 250 ไมโครเมตรได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 34 ถ่านชาร์ร้อยละ 38 และแก๊สร้อยละ 28 ขนาดอนุภาคในช่วง 250-450 ไมโครเมตร ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 42 ถ่านชาร์ร้อยละ 29 และแก๊สร้อยละ 29 จะเห็นว่าเมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ในส่วนของเหลวเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก การถ่ายโอนความร้อนระหว่างพื้นผิวอนุภาคเกิดขึ้นได้ดี ทำให้เกิดการสลายตัวขั้นทุติยภูมิได้ดี ส่งผลให้ได้แก๊สในปริมาณที่สูง ขณะเดียวกันอนุภาคที่ใหญ่กว่า 850 ไมโครเมตร จะได้ร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลวลดน้อยลง ถ่านชาร์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่มี

ผลให้พื้นผิวน้อย การถ่ายโอนความร้อนระหว่างอนุภาคจึงเกิดขึ้นได้น้อย ส่งผลให้การสลายตัวไม่สมบูรณ์ทำให้ได้ถ่านชาร์มากขึ้น

ขนาดอนุภาคที่ 450-650 ไมโครเมตร เป็นช่วงขนาดอนุภาคที่เหมาะสมให้ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลวสูงถึงร้อยละ 47 จึงเป็นขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในระบบการไพโรไลซิสนี้

#### 4.2.3 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน

ในการศึกษาภาวะของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ จะดำเนินการภายใต้อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.425 – 0.850 มิลลิเมตรและอัตราการป้อนสารที่ 3.3 กิโลกรัมต่อชั่วโมงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

รูปที่ 4.4 พบว่ามีการป้อนอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่อัตรา 50 100 และ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เมื่อป้อนแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตรา 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่า 47.25 ปริมาณถ่านชาร์ 28.75 และแก๊ส 24 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน พบว่าปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ให้ผลการทดลองตรงข้ามกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สซึ่งมีแนวโน้มที่ลดต่ำลงเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ส่วนปริมาณถ่านชาร์มีค่าร้อยละผลได้ที่ค่อนข้างคงที่ประมาณร้อยละ 28 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน เป็นตัวพาสารระเหยในระบบให้ออกสู่ภายนอก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่สูงเกินไป เป็นการทำให้การกำจัดแก๊สที่ควบแน่นได้ (Condense gases) ต่างๆ ออกจากระบบได้เร็ว ทำให้ไอระนั้นมีการ

สลายตัวที่ไม่สมบูรณ์ จึงได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีปริมาณที่น้อย ขณะเดียวกันที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่ำจะขจัดสารระเหยแก๊สออกจากระบบเป็นไปได้ช้าส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวขั้นทุติยภูมิของไอระเหย ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของแก๊สมากขึ้น

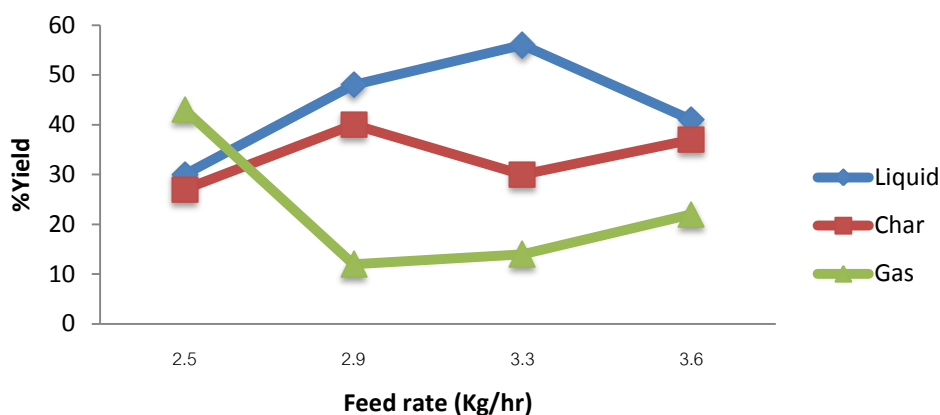
การทดลองพบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ผลทำให้ปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าสูงสุดที่ 56.23 สรุปได้ว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เป็นอัตราการไหลที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้

#### 4.2.4 ผลของอัตราการป้อนสาร

การศึกษาอัตราการป้อนสารที่เหมาะสมต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ โดยทำการปรับเทียบความสัมพันธ์ของความเร็วของสกรูกับอัตราการป้อนสารตามตารางที่ 4.4 ในการศึกษาภาวะของอัตราการป้อนสารนี้ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเหมาะสม 0.425 – 0.850 มิลลิเมตร และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เมื่อทำการปรับเทียบความเร็วของสกรูที่ค่า 250 320 350 และ 420 รอบต่อนาที จะได้ค่าของอัตราการป้อนสารอยู่ที่ 2.5 2.9 3.3 และ 3.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ผลการปรับเทียบความสัมพันธ์ของความเร็วของสกรูกับอัตราการป้อนสาร

ความสกรู (รอบ/นาที)	อัตราการป้อนสาร (กิโลกรัม/ชั่วโมง)
250	2.5
320	2.9
350	3.3
420	3.6



#### รูปที่ 4.5 ผลของอัตราการป้อนต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

รูปที่ 4.5 แสดงผลของอัตราการป้อนสารที่มีต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ที่อัตราการป้อน 2.5 2.9 3.3 และ 3.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากการทดลองพบว่าในช่วงเริ่มต้นปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงที่อัตราการป้อนสาร 3.3 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและหลังจากนั้นจะมีแนวโน้มลดลง ในส่วนของถ่านชาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แก๊สมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ โดยพบว่าที่อัตราการป้อนสารต่ำ (สกรูหมุนช้า) เปลือกทุเรียนที่เข้ามาในกระบอกเตาปฏิกรณ์จะมีปริมาณน้อย และความร้อนที่ทำให้เกิดการสลายตัวเปลือกทุเรียนมีความร้อนสูงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา ในการเพิ่มอัตราการป้อนสารส่งผลทำแนวโน้มของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าสูง โดยพบว่าที่อัตราการป้อนสารต่ำ เวลาในการทำปฏิกิริยา (Residence time) ไม่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ แต่เมื่อทำการเพิ่มอัตราการป้อนที่สูงขึ้นเรื่อยๆ (สกรูหมุนเร็ว) เป็นผลให้สารตัวอย่าง การป้อนเข้าสู่กระบอกของเตาปฏิกรณ์ได้มากขึ้น ในขณะที่ให้ความร้อนที่ให้แก่ระบบมีปริมาณคงที่ การกระจายของความร้อนเข้าสู่เนื้อชีวมวลจึงไม่ทั่วถึงเหมือนในช่วงอัตราการป้อนต่ำและที่อัตราการป้อนสารสูงเวลาในการทำปฏิกิริยา (Residence time) ของสารตัวอย่างกับความร้อนจะมีค่าน้อยลง เป็นผลให้ปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าที่ลดลง เนื่องจากเปลือกทุเรียนที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์และผ่านออกจากเตาปฏิกรณ์มีอัตราที่เร็วมาก จนทำให้เปลือกทุเรียนเกิดการสลายตัวทางความร้อนไม่หมด ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นถ่านชาร์สูง ดังนั้นที่อัตราการป้อนสารที่สูงความร้อนจะไม่ค่อยมีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ แต่จะขึ้นอยู่กับเวลาในการทำปฏิกิริยาของเปลือกทุเรียนกับความร้อน (Residence time)

จากการทดลองพบว่าที่อัตราการป้อนสารที่อัตราการป้อนสาร 3.3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เป็นอัตราที่ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดที่ร้อยละ 56 จึงเลือกใช้อัตราการป้อนสารที่อัตราการป้อนสารนี้

#### 4.2.5 ศึกษาอัตราส่วนของน้ำมันเบาและน้ำมันหนักในผลิตภัณฑ์เหลว

ศึกษาอัตราส่วนของน้ำมันเบาและน้ำมันหนักที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิเหมาะสม 600 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.450 – 0.650 มิลลิเมตร อัตราการป้อนสารที่ 3.3 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

**ตารางที่ 4.5** ร้อยละอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ประกอบด้วยน้ำมันเบา น้ำมันหนักและน้ำ

ครั้งที่	ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลว		
	น้ำมันเบา	น้ำมันหนัก	น้ำ
1	29.02	21.34	49.64
2	28.12	22.61	49.27
3	28.55	22.03	49.42
เฉลี่ย	28.56	22.32	49.44

ตารางที่ 4.5 พบว่าน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสสามารถที่แบ่งได้ 2 ส่วนหลักคือ ส่วนของน้ำมันเบาและส่วนของน้ำมันหนักและเกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำมันทั้งสองโดยน้ำมันเบา (ชั้นบน) แสดงดังภาพที่ 4.6 แสดงการแยกชั้นของน้ำมันหนักและน้ำมันเบาและตัวอย่างของน้ำมันชีวภาพที่จากกระบวนการไพโรไลซิส



รูปที่ 4.6 แสดงการแยกชั้นของน้ำมันหนักและน้ำมันเบาและตัวอย่างของน้ำมันชีวภาพที่  
จากกระบวนการไพโรไลซิส

#### 4.3 ผลของการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพ

##### 4.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุด้วยเครื่อง CHNS Analyzer

จากการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพในส่วนของ วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ  
ด้วยเครื่อง CHNS Analyzer แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงองค์ประกอบของธาตุของน้ำมันชีวภาพ

Ultimate analysis	Atmosphere Nitrogen		
	Aqueous phase	Organic phase	Char
%wt			
C	2.65	51.71	44.58
H	10.10	8.013	1.87
N	0.47	2.048	0.84
O* by difference	86.78	38.229	52.71

โดยทำการวิเคราะห์เฟสของน้ำมันชีวภาพ ได้แก่ เฟสของสารละลาย เฟสของสารอินทรีย์ และเฟสของถ่านชาร์ พบว่าจากความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์พบว่าในส่วนของเฟสของสารละลายแสดงค่าอัตราส่วนของ ธาตุออกซิเจนกับไฮโดรเจนมีปริมาณมากถึง 8:1 สามารถวิเคราะห์ได้ว่ามีส่วนประกอบของน้ำค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาในส่วนของเฟสของสารอินทรีย์ พบว่ามีส่วนประกอบของธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงแสดงถึงมีองค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนสูงเป็นการแสดงถึงส่วนที่เป็นเฟสของสารอินทรีย์ ส่วนสุดท้ายเป็นส่วนประกอบของเฟสของถ่านชาร์จากการวิเคราะห์พบว่าธาตุคาร์บอนสูงซึ่งธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักของถ่านชาร์

#### 4.3.2 ค่าความร้อนของน้ำมันหนัก

ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ทั้งสองส่วนมาวิเคราะห์ค่าความร้อนพบว่าส่วนของน้ำมันหนักหาค่าความร้อนได้ ส่วนที่เรียกว่าน้ำมันเบาไม่สามารถหาค่าความร้อนได้เนื่องจากมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณมาก โดยมีค่าความร้อนของน้ำมันหนักอยู่ในช่วงประมาณ 27-29 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความร้อนน้ำมันหนักที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)	400	450	500	550	600	700
ค่าความร้อน(เมกกะจูลต่อกิโลกรัม)	27.24	27.88	28.65	29.44	29.57	29.09

#### 4.3.3 ค่าความร้อนของถ่านชาร์

การหาค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้จากการระบวณการไพโรไลซิสเปลือกทุเรียน พบว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการทดลองที่ภาวะของอุณหภูมิระหว่าง 400 - 700 องศาเซลเซียส ที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่าค่าความร้อนของถ่านชาร์จากการทดลองมีค่าประมาณ 18 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม พบว่าค่าความร้อนที่ได้มีค่าน้อยกว่าในน้ำมันชีวภาพ และมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าความร้อนของเปลือกทุเรียนคือ 17.88 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

พบว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น ค่าความร้อนของถ่านชาร์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เป็นผลมาจากที่อุณหภูมิสูงความชื้นที่อยู่ในชีวมวลจะมีปริมาณน้อย โดยโมเลกุลของน้ำที่ดูดซับบนพื้นผิวของโครงสร้างเซลล์ชีวมวลได้รับการถ่ายโอนความร้อนเกิดการกลายเป็นไอน้ำ

ออกมา ทำให้ถ่านซาร์ที่ได้มีค่าความชื้นที่ต่ำเมื่อเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงสารระเหยที่อยู่ในชีวมวลก็เกิดการสลายตัวทางความร้อนหรือถูกปล่อยออกไปได้มาก ซึ่งถ่านซาร์ที่ได้จะมีสัดส่วนของสารระเหยต่ำ แต่มีปริมาณของคาร์บอนคงตัวที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ โดยค่าคาร์บอนคงตัวและค่าความชื้นถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบหลักที่ส่งผลต่อความความร้อนของซาร์ที่ได้จากการทดลอง

#### ตารางที่ 4.8 ค่าความร้อนของถ่านซาร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)	400	450	500	550	600	700
ค่าความร้อน(เมกกะจูลต่อกิโลกรัม)	16.83	16.70	17.06	18.34	19.60	19.45

#### 4.3.4 สมบัติพื้นฐานต่างๆของน้ำมันชีวภาพ

การทดสอบสมบัติพื้นฐานต่างๆของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสภายใต้การทำงานที่เหมาะสมอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 450 –650 ไมโครเมตร อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และ อัตราการป้อนสาร 3.3 กิโลกรัมต่อนาที โดยจะมีการทดสอบและวิเคราะห์ค่าสมบัติต่างๆ เช่น ค่าความร้อน ความหนาแน่น ค่าความหนืด ความเป็นกรด-ด่าง จุดวาบไฟ เป็นต้น โดยจะพบว่าค่าจากการทดสอบสมบัติต่างๆของน้ำมันชีวภาพจากเปลือกทุเรียนจะมีค่าความร้อนอยู่ที่ 29 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความหนาแน่นที่ 1088 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความหนืดเท่ากับ 0.79 เซนติสโตก ร้อยละโดยน้ำหนักคาร์บอนที่เหลือมีค่า 4.3 ร้อยละโดยน้ำหนักซีไธมีมีค่า 14.54 ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ที่ 3-4 และจุดวาบไฟที่ 74 องศาเซลเซียส ดังตาราง 4.9 และอีกทั้งในตารางนี้ยังแสดงผลการเปรียบเทียบสมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพจากทะเลลายปาล์มโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิส ฟางข้าวโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิส เปรียบเทียบกับน้ำมันชีวภาพจากผักตบชวาที่ใช้กระบวนการไพโรไลซิสและน้ำมัน Narabia ที่เป็นน้ำมันดิบจากบริษัท ปตท จำกัด (มหาชน)



**ตารางที่ 4.9** ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพจากเปลือกทุเรียน

สมบัติทั่วไปของน้ำมัน หนัก	เปลือก ทุเรียน	ทะเลาะ ปาล์ม	ฟาง ข้าว	ผักตบชวา [44]	Narabia*	วิธีการ วิเคราะห์
ความหนาแน่น 15 องศาเซลเซียส (kg/m <sup>3</sup> )	1088	1058	1105	1060	880	ASTM D1298
ค่าความหนืด 40 องศาเซลเซียส (cSt)	0.79	0.76	0.81	0.73	n/a	ASTM D445
กากคาร์บอน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	4.3	4.1	3.52	4.53	-	ASTM D524-04
ซีเถ้า (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	14.54	11.86	16.76	11.69	0.04	ASTM D 482-03
ค่าความเป็นกรดเบส (pH)	3-4	3.61	3.34	3-4	5.2	pH meter
จุดวาบไฟ (องศา เซลเซียส) **	74	72	72	76	35	ASTM D 92

\* หมายเหตุ Narabia เป็นน้ำมันดิบจากบริษัท ปตท จำกัด (มหาชน)

\*\* ค่าความร้อนและจุดวาบไฟเป็นค่าที่หาได้เมื่อน้ำมันผ่านการกลั่นแยกเอาน้ำออกแล้ว

### ความหนาแน่นและค่าความหนืดของน้ำมันชีวภาพ

ในการวัดค่าความหนืด (Viscosity) ของน้ำมันชีวภาพจากเปลือกทุเรียนให้ค่าความหนืดจากการวัดการวัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปรียบเทียบกับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากผักตบชวาเมื่อทำการทดลองพบว่าค่าความหนาแน่นของ Narabia และทะเลาะปาล์มเปล่า จะมีอยู่ที่ 1088 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนน้ำมันชีวภาพจากทะเลาะปาล์ม, ฟางข้าวและผักตบชวามีค่าที่ใกล้เคียงกัน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นความหนืดที่ได้ลดลงเนื่องมาจากความร้อนมีผลทำให้โครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัว [45]

### กากคาร์บอนและเถ้า

ส่วนของกากคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้พบว่า Narabia ไม่มีส่วนของคาร์บอนที่เหลืออยู่เลยเนื่องมาจากคาร์บอนถูกใช้ในกระบวนการเผาไหม้หมด และปริมาณของเถ้าเถ้ามีค่าน้อยมากเพียงแค่ 0.04 เมื่อเทียบกับน้ำมันชีวภาพทั้งสามชนิด และเมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างน้ำมันชีวภาพจากทะเลสาบปาล์ม ฟางข้าวและผักตบชวาพบว่า ปริมาณของคาร์บอนที่เหลือมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าของปริมาณเถ้าเถ้าพบว่า เปลือกทุเรียน จะมีปริมาณของเถ้าเถ้าที่สูงกว่าของทะเลสาบปาล์ม ฟางข้าวและผักตบชวาเนื่องมาจากเปลือกทุเรียนเป็นชีวมวลที่มีปริมาณของเถ้าเถ้าที่สูงเมื่อเทียบกับชีวมวลชนิดอื่นที่จะมีปริมาณเถ้าเถ้าอยู่เพียงร้อยละ 1-3 ทั้งนี้จะเห็นว่ามีปริมาณกากคาร์บอนที่หลงเหลือหลังจากการเผาไหม้และเถ้าเถ้ายังอยู่ในปริมาณที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่กระทรวงพาณิชย์กำหนดไว้ โดยกากคาร์บอนที่เหลือต้องมีปริมาณร้อยละ 0.05 และเถ้าเถ้าร้อยละ 0.01

### ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำมันชีวภาพทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ค่าประมาณ 3 ซึ่งเป็นกรดอ่อน แต่ก็ยังมีความเป็นกรดที่มากกว่าน้ำมันดิบ Narabia เนื่องมาจากน้ำมันชีวภาพมักจะประกอบไปด้วยสารประกอบที่เป็นกรดมากกว่า (ฟีนอลและกรดคาร์บอกซิลิก) อาจส่งผลทำให้การกัดกร่อนโลหะ และเสื่อมสภาพของส่วนประกอบโพลีเมอร์ภายในเครื่องยนต์ต่างๆ

### จุดวาบไฟ (Flash point)

ส่วนประกอบของน้ำมันชีวภาพที่เป็นสารประกอบมีซัลเฟอร์ทำให้มีจุดวาบไฟสูง โดยพบว่าอยู่ในช่วง 70-80 องศาเซลเซียส อยู่ในช่วงเดียวกันกับจุดวาบไฟของน้ำมันดีเซลซึ่งอยู่ในช่วง 52-96 องศาเซลเซียส[46]

### การกัดกร่อน (Corrosion)

นำน้ำมันชีวภาพจากไฟโรไลซิสทำการวัดค่าการกัดกร่อนตามมาตรฐาน ASTM D1130 โดยใช้แผ่นทองแดงจุ่มลงไปใต้น้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำมาเทียบกับแถบสีมาตรฐาน พบว่าแผ่นทองแดงมีสีตามแถบมาตรฐาน 1b ซึ่งเป็นช่วงค่าการกัดกร่อนเล็กน้อย โดยความสามารถการกัดกร่อนของน้ำมันชีวภาพเนื่องจากองค์ประกอบของกรดคาร์บอกซิลิกและสารประกอบฟีนอล โดยสำหรับน้ำมันฟอสซิลจะมีค่าการกัดกร่อนอยู่ที่ 1a หรือมี

การกัดกร่อนน้อยมากซึ่งช่วยยืดอายุของเครื่องยนต์เนื่องจากทำให้อุปกรณ์ภายในการกัดกร่อนเล็กน้อย

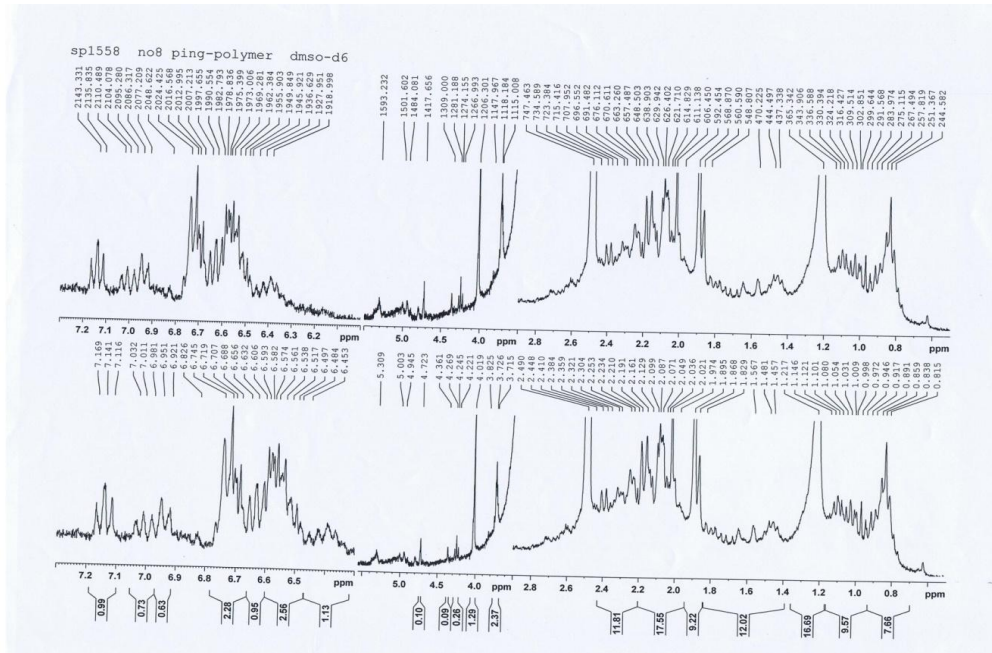
#### 4.3.5 การทดสอบองค์ประกอบทางด้านเคมี

##### 4.3.5.1 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรสโคปี ( $H^1$ -NMR)

องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพประกอบไปด้วยสารประกอบอะโรมาติกและอะลิฟาติก พบว่าในน้ำมันชีวภาพประกอบไปด้วยกลุ่มของอะโรมาติก ที่ตำแหน่ง 6.3-7.2 พีพีเอ็ม อะลิฟาติกที่ทำพันธะกับออกซิเจนที่ตำแหน่ง 3-5.3 พีพีเอ็ม อะลิฟาติกที่ทำพันธะกับกลุ่มอะโรมาติกและแอลคีนที่ตำแหน่ง 1.6 -3 พีพีเอ็ม และอะลิฟาติกที่ทำพันธะกับสารอื่นๆ ที่ตำแหน่ง 0.81-1.87 พีพีเอ็ม [47] แสดงให้เห็นองค์ประกอบอะโรมาติกและไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันชีวภาพ

##### ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรสโคปี ( $H^1$ -NMR)

Type of hydrogen	Chemical shift (ppm)	Bio-oil mol % (% of total hydrogen)
Aromatic	6.3-7.2	22
Aliphatic adjacent to oxygen	3-5.3	20
Aliphatic adjacent to aromatic/alkene group	1.6 -3	20
Other aliphatic	0.81-1.87	38



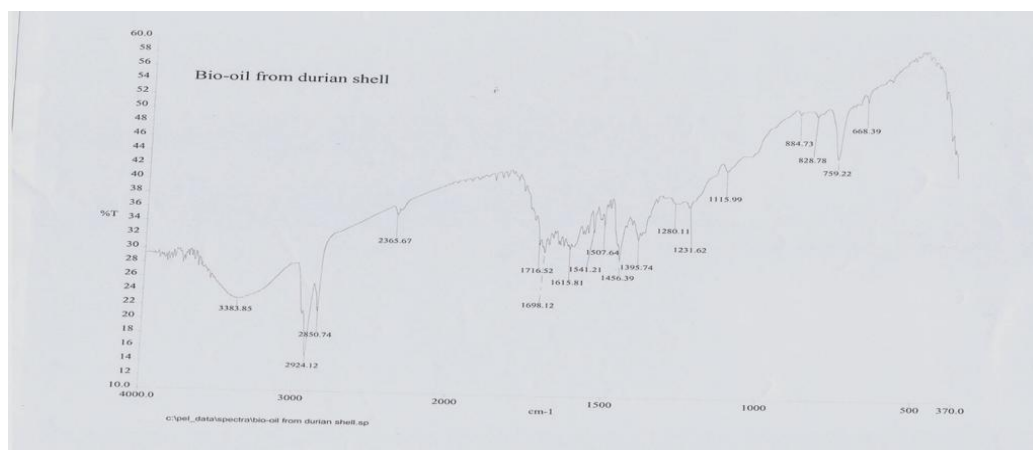
รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์เพกโตรสโคปี ( $H^1$ -NMR)

#### 4.3.5.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR)

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีของน้ำมัน ที่ได้จากการไพโรไลซิสเปลือกทุเรียน ภายในบรรยากาศไนโตรเจน โดยพบเลขคลื่นสำคัญในน้ำมัน ดังภาพที่ 4.11 โดยข้อมูลดังกล่าวดังนี้ หมู่ฟังก์ชัน -OH ที่เลขคลื่น  $3383.85 \text{ cm}^{-1}$  C-H ที่เลขคลื่น  $2924.12 \text{ cm}^{-1}$  C=O ที่เลขคลื่น  $1700-1400 \text{ cm}^{-1}$  C-O ที่เลขคลื่น  $1100 \text{ cm}^{-1}$  C=C ที่เลขคลื่น  $1680-1640 \text{ cm}^{-1}$  [48] แสดงดังตารางที่ 4.11 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR)

ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันจากไฟโรไลซิสเปลือกทุเรียน

หมู่ฟังก์ชัน	เลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )	ชนิดของสารประกอบ
O-H	3383.85	H <sub>2</sub> O, Phenol, Alcohol
C-H	2924.12	Alkane
C=O	1700-1400	Ketone, Quinones, Aldehyde
C-O	1100	Ether, Carboxylic acid
C=C	1600	Aromatic

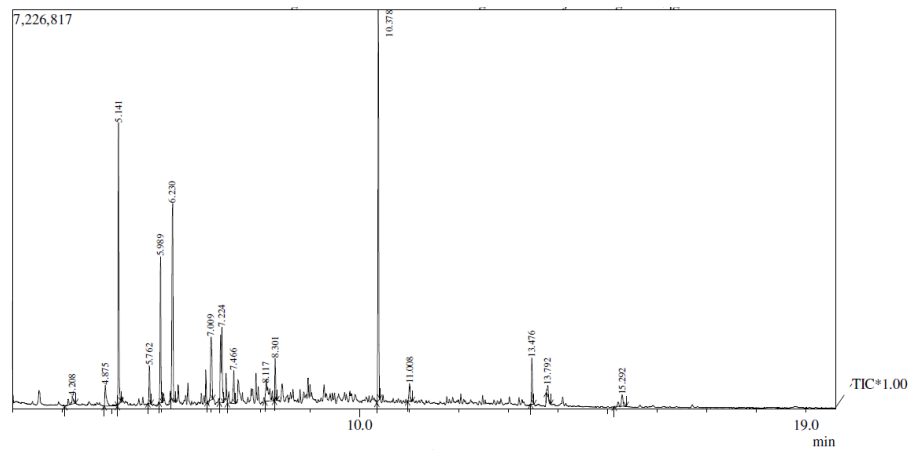


รูปที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR)

#### 4.3.5.3 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography - Mass Spectrometry)

การวิเคราะห์ส่วนประกอบของน้ำมันชีวภาพจากเปลือกทุเรียน วิเคราะห์โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรสโกปี (Gas Chromatography-Mass Spectroscopy) ในรูปที่ 4.9 พบว่าในน้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของสารประกอบต่างๆ เช่น Butanoic acid, 1, 2-Benzenediol, Cyclopenten, Hexane, Hydroxyacetone, Propanoic acid, o-Methoxyphenol-2-methoxyphenethyl alcohol และ Phenol เป็นต้น โดยสารที่พบในน้ำมันชีวภาพจะเป็นสารประกอบฟีนอล และคีโตน เป็นส่วนใหญ่ ในน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการทดลองนี้จะมีปริมาณ

ของกรดต่างๆ เช่น Propanoic acid และ Butanoic acid ส่งผลทำให้น้ำมันชีวภาพที่ได้มีค่าความเป็นกรด ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพที่มีค่า pH อยู่ที่ 3-4 นอกจากนี้ยังพบสารประกอบฟีนอลด้วย แสดงดังตาราง 4.12



รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี  
(Gas Chromatography - Mass Spectrometry)

ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสเปลือกทุเรียน GCMS

Peak	Ret.Time	Area%	Name
1	4.208	1.18	Butanoic acid
2	4.875	2.40	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-
3	5.141	15.91	Phenol
4	5.762	2.50	2-Cyclopenten-1-one
5	5.989	8.71	Phenol, 2-methyl-
6	6.230	15.91	Phenol, 3-methyl-
7	7.009	5.88	Phenol, 2,4-dimethyl-
8	7.224	8.17	Phenol, 3,4-dimethyl-
9	7.466	3.46	Phenol, 3,4-dimethyl-
10	8.117	4.26	Phenol, 2-ethyl-4-methyl-
11	8.301	2.42	1H-Indene-1,2-diol, 2,3-dihydro-
12	10.378	22.82	Butylated Hydroxytoluene
13	11.008	1.45	Phenol, Phthalic acid
14	13.476	2.97	1,2-Benzenediol, 4-methyl-
15	13.792	0.55	1,2-Benzenedicarboxylic acid
16	15.292	1.43	9-Octadecenoic acid

#### 4.3.5.4 การวิเคราะห์หาธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพจากการระบวณการไฟโรไลซิส เปลือกทุเรียนด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence)

น้ำมันชีวภาพจากเปลือกทุเรียน วิเคราะห์หาธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบใน  
น้ำมันชีวภาพ พบว่าจะประกอบไปด้วยธาตุโลหะดังตารางที่ 4.13

**ตารางที่ 4.13** การวิเคราะห์หาโลหะด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence

ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ(ร้อยละโดยน้ำหนัก)*													
	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO	ZnO
น้ำมันชีวภาพ	<0.01	<0.01	0.10	0.10	1.11	<0.01	0.04	0.02	<0.01	<0.01	0.08	<0.01	<0.01	<0.01

\* 1. ปริมาณธาตุหาโดยวิธี Theoretical formulas, “fundamental parameter calculation”

2. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้คำนวณค่าให้อยู่ในรูป oxide ของธาตุนั้นๆ

จากตารางที่ 4.13 เป็นผลการวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพมา  
วิเคราะห์หาธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบภายในน้ำมันชีวภาพ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์  
พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุต่างๆ จะประกอบไปด้วย แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) น้อยกว่าร้อยละ  
0.01 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ร้อยละ 0.10 โพแทสเซียมไดออกไซด์ (K<sub>2</sub>O) ร้อยละ 0.04  
แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 0.02 และโดลูมิเนียมไตรออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) น้อยกว่าร้อยละ  
0.01 พบว่าธาตุส่วนใหญ่จะอยู่ในหมู่อัลคาไลน์ (Alkali) และอัลคาไลน์เอิร์ธ (Alkali earth) เช่น  
แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียมและคลอไรด์ องค์ประกอบของธาตุเหล่านี้อาจจะส่งผลกระทบต่อ  
กักกรองของเครื่องมือที่อุณหภูมิสูง



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยการศึกษาการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเปลือกทุเรียนโดยการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องสามารถสรุปผลได้ดังนี้

##### 5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติและลักษณะเบื้องต้นของเปลือกทุเรียน

จากการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของเปลือกทุเรียน พบว่าองค์ประกอบของ เปลือกทุเรียนประกอบไปด้วย ความชื้นมีปริมาณร้อยละ 5.53 สารระเหยร้อยละ 69.59 คาร์บอนคงตัวร้อยละ 10.06 และ เถ้าร้อยละ 12.30 เมื่อวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) พบว่าเปลือกทุเรียนจะประกอบไปด้วยคาร์บอนร้อยละ 60.31 ไฮโดรเจนร้อยละ 3.06 ไนโตรเจน 8.47 กำมะถันร้อยละ 0.10 และออกซิเจนร้อยละ 28.06 และค่าความร้อนเปลือกทุเรียนมีค่า 17.88 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

##### 5.1.2 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกทุเรียน

การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกทุเรียนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermo gravimetric analysis, TGA) พบว่าเปลือกทุเรียนมีค่าการสลายตัวทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่ 314.6 - 600 องศาเซลเซียส และสลายตัวค่อนข้างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

##### 5.1.3 การวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในเปลือกทุเรียน

การวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบในเปลือกทุเรียนด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence) พบว่าในเปลือกทุเรียนประกอบไปด้วยธาตุซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ร้อยละ 0.15 โพแทสเซียมไดออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) ร้อยละ 3.38 แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ร้อยละ 0.33 และไดฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) น้อยกว่าร้อยละ 0.01 แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ร้อยละ 0.19 นิกเกิลออกไซด์ ( $\text{NiO}$ ) น้อยกว่าร้อยละ 0.01 และสังกะสีออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ) ร้อยละ 0.01 โดยพบว่าธาตุส่วนใหญ่จะอยู่ในหมู่อัลคาไลน์ (Alkali) และอัลคาไลเอิร์ธ (Alkali earth)

#### 5.1.4 ภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเปลือกทุเรียนโดยการไพโรไลซิสแบบเร็ว

ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองการไพโรไลซิส คือที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคในช่วง 450– 650 ไมโครเมตร อัตราการป้อนสาร 3.3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 56

#### 5.1.5 อัตราส่วนน้ำมันเบาต่อน้ำมันหนัก

การไพโรไลซิสพบว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสจะสามารถที่แบ่งได้ 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของน้ำมันเบาและส่วนของน้ำมันหนัก โดยมีสัดส่วนของน้ำมันเบาร้อยละ 28.56 และน้ำมันหนัก ร้อยละ 22.32 หรืออัตราส่วนน้ำมันเบาต่อน้ำมันหนัก 1.3 ต่อ 1

#### 5.1.6 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400 – 700 องศาเซลเซียส มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 27 - 29 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และค่าความร้อนของถ่านชาร์จากการทดลองอยู่ในช่วงประมาณ 18 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

#### 5.1.7 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์พบว่าในน้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ โดยน้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนร้อยละ 51.70 ไฮโดรเจนร้อยละ 8.02 ไนโตรเจนร้อยละ 2.05 และออกซิเจนร้อยละ 38.23 และถ่านชาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนร้อยละ 44.58 ไฮโดรเจนร้อยละ 1.87 ไนโตรเจนร้อยละ 0.84 และออกซิเจนร้อยละ 52.71 ตามลำดับ

#### 5.1.8 สมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพจะมีค่าความร้อนอยู่ที่ 29.57 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม มีค่าความหนาแน่นที่ 1088 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าความหนืดเท่ากับ 0.79 เซนติสโตก ร้อยละโดยน้ำหนัก คาร์บอนที่เหลือมีค่า 4.30 ร้อยละโดยน้ำหนักซึ่งถ้ามีค่า 14.54 ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ที่ 3-4 และจุดวาบไฟที่ 74 องศาเซลเซียส

### 5.1.9 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR)

น้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของทั้งสารประกอบของหมู่ออกซิเจน (Oxygen containing compounds) และ กลุ่มไฮโดรคาร์บอน โดยสารประกอบของหมู่ออกซิเจน ได้แก่ แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ คีโตน เอสเทอร์ ซึ่งจะเห็นได้จากพีคของ O-H, C=O, C-H และกลุ่มไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ อะโรมาติก แอลเคน แอลคีนจะเห็นได้จากพีคของ C-H, C=C

### 5.1.10 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี ( $H^1$ -NMR)

น้ำมันชีวภาพจะประกอบไปด้วยกลุ่มของอะโรมาติก ที่ตำแหน่ง 6.3-7.2 ppm มีปริมาณร้อยละ 22 อะลิฟาติกที่เชื่อมต่อกับออกซิเจนที่ตำแหน่ง 3-5.3 ppm มีปริมาณร้อยละ 20 อะลิฟาติกที่เชื่อมต่อกับกลุ่มอะโรมาติกและแอลคีนที่ตำแหน่ง 11.6 -3 ppm มีปริมาณ ร้อยละ 20 และอะลิฟาติกที่เชื่อมต่อกับสารอื่นๆ ที่ตำแหน่ง 0.81-1.87 ppm มีปริมาณร้อยละ 38 พบว่าได้ในน้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของอะโรมาติกและไฮโดรคาร์บอน

### 5.1.11 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (Gas Chromatography-Mass Spectroscopy, GCMS)

น้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของสารประกอบต่างๆ เช่น 1, 2-benzenediol, Butanoic acid, 1,2-Benzenedicarboxylic acid, hydroxyacetone, hexane, propanoic acid, o-methoxyphenol, 2-methoxyphenethyl alcohol และ phenol เป็นต้น โดยสารที่พบในน้ำมันชีวภาพจะเป็นสารประกอบฟีนอลคีโตนและแอลกอฮอล์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. บริเวณที่เชื่อมต่อบริเวณสกปรกสู่อากาศเข้าเครื่องปฏิกรณ์ให้ความร้อนของระบบการไฟฟระไลซิสและส่วนที่เก็บกากคาร์บอนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าทำให้ไอรหรือน้ำมันเกิดเกาะสะสมบริเวณดังกล่าว หากสามารถออกแบบให้ควบคุมให้มีอุณหภูมิ อาจส่งผลทำให้ได้น้ำมันชีวภาพออกมาจากระบบได้มากขึ้น
2. น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไฟฟระไลซิสจะต้องมีการกลั่นแยกเอาน้ำออกก่อนเพื่อขจัดความชื้นออกไป โดยน้ำมันชีวภาพผ่านการขจัดน้ำออกไปแล้วสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้โดยการนำไปใช้งานร่วมกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น หรือทำการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปใช้
3. ส่วนประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้ ส่วนใหญ่เป็นพินอล จึงส่งผลทำให้น้ำมันชีวภาพจะมีความเป็นกรด ดังนั้นในการนำน้ำมันชีวภาพที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงแล้วเมื่อ ไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล ต้องมีการเปลี่ยนปั้มป์และระบบหัวฉีดภายใน เพราะอาจส่งผลให้ยาง โพลีเมอร์ และโลหะ เกิดการเสื่อมสภาพหรือถูกกัดกร่อน จำเป็นต้องมีการออกแบบและเลือกใช้วัสดุที่ป้องกันการกัดกร่อน นอกจากนี้พบว่าในน้ำมันชีวภาพจากเปลือกทุเรียนมีน้ำปนอยู่จำเป็นต้องมีการปรับปรุงสภาพโดยกำจัดน้ำออกและลดปริมาณถ้าให้อยู่ในเกณฑ์เดียวกับน้ำมันดีเซล สามารถใช้น้ำมันกับเครื่องยนต์ดีเซลความเร็วรอบต่ำได้ แต่หากจะนำไปใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลความเร็วรอบสูงจำเป็นต้องปรับปรุงโดยการตีออกซิเจนเนชั่น และการกลั่นลำดับส่วนให้ได้ปรับคุณภาพองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงน้ำมันดีเซลดียิ่งขึ้น
4. เปลือกทุเรียนที่นำมาใช้ในกระบวนการไฟฟระไลซิสมีปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ต่ำเมื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงจะส่งผลต่อมลภาวะสิ่งแวดล้อมที่น้อยกว่าแก๊สที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นทางเลือกหนึ่งที่ทำให้เกิดเชื้อเพลิงสะอาด
5. ถ่านชาร์เป็นของแข็งที่มีค่าพลังงานความร้อนค่าหนึ่ง แม้ว่าจะมีความหนาแน่นต่ำแต่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง อีกทั้งถ้ามีปริมาณแร่ธาตุสูงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางการเกษตรได้

6. ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ขยายต่อในระดับเชิงพาณิชย์ได้ โดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัยนี้มาเป็นข้อมูลอ้างอิงในการพัฒนาพลังงานทางเลือกจากชีวมวลได้

## รายการอ้างอิง

- [1] อุดสาห์ บุญบำรุง. พลังงานชีวมวล. แหล่งพลังงานสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2546.
- [2] พื้นที่ปลูกพืช. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : [www.oae.go.th](http://www.oae.go.th) [2554, ตุลาคม 4].
- [3] กะลาปาล์ม [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.thaienv.com> [2554, ตุลาคม 4].
- [4] ทุเรียน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://th.wikipedia.org/wiki> [2554, ตุลาคม 4].
- [5] ฟางข้าว [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : [http://dankhunthot.khorat.doe.go.th/e\\_rice/rice1.html](http://dankhunthot.khorat.doe.go.th/e_rice/rice1.html) [2554, ตุลาคม 4].
- [6] เศษไม้ [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.argeholzgas.at/benefits>. [2554, ตุลาคม 4].
- [7] ชัยวัฒน์ พรหมภูเบศร์. การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [8] ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล [Biomass Clearing House] มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม [Energy for Environment Foundation]. ชีวมวล. กรุงเทพฯ : คิว พรีนซ์ แมเนจเม้นท์ จำกัด, 2545.
- [9] กลูโคส [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.nzetc.org/> [2554, ตุลาคม 5].
- [10] เฮมิเซลลูโลส [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : [www.tionbiotech.com/lentin](http://www.tionbiotech.com/lentin) [2554, ตุลาคม 5].
- [11] Winkelman, G. M. Degration of Natural Product. New York: VCH, 1992.
- [12] ลิกนิน [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : [www.research.uky.edu/green\\_energy](http://www.research.uky.edu/green_energy) [2554, ตุลาคม 6].
- [13] ธนิญา ฤกษ์หิรัญโชติ, ศุภานัน โขกเฮงตระกูล และ อภิญาญา ดวงจันทร์. น้ำมันชีวภาพจาก การสลายมวลชีวภาพประเภทหญ้าคาด้วยกระบวนการไพโรไลซิส. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.
- [14] Mohan, D. Pittman, C. and Steele, P.H., pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. Energy & Fuels 20 (2006): 848-889.

- [15] Charles, A., Mullen and Akwasi, A., Chemical composition of bio-oil produced by fast pyrolysis of two energy crop. Energy & Fuels, (2008) 22 : 2104-2109.
- [16] Nikitin N.I., et al. The chemistry of cellulose and wood. Academy of Science of the USSR, Institute of High Molecular Compound: Moscow-Leningrad, 1962.
- [17] Antal Jr. M.J. Biomass Pyrolysis: A Review of Literature Part 1-Carbohydrate Pyrolysis. Part 2-Lignocellulose Pyrolysis. Advance in Solar Energy, 1982
- [18] Donald L. Klass. Biomass for Renewable Energy Fuel and Chemical. Academy Press Limited, 1998.
- [19] ชูศักดิ์ โทกษานุกรานนท์. การคาร์บอนไนซ์แก๊สในฟลูอิดไธด์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
- [20] Maniatis K. and Buekens, A. Fast pyrolysis of biomass A.V. Bridgewater and J.L.Kuester. Research in thermochemical biomass conversion. Great Britain Science (1998): 179-189.
- [21] Xianwen, D., Chuangzhi, W., Haibin, L, and Yong C. The Fast Pyrolysis of Biomass in CFB reactor. Energy Fuels 14 (2000): 552-557.
- [22] Zanzi, R., Sjostrom, K. and Bjornbom, E. Rapid high temperature pyrolysis of biomass in a free fall. Fuel 75 (1996): 545-550.
- [23] Tanaka, H., et al. Effect of particles size, heating rate and pressure on measurement of pyrolysis kinetics by thermo gravimetric analysis. Fuel 76 (1997): 1277-1282.
- [24] ฉัตรชัย ธนศรีสุข. การกำจัดกำมะถันจากถ่านหินโดยไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ. วิทยานิพนธ์ ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2541.
- [25] Oasmaa, A., et al. Physical characterization of biomass-based pyrolysis liquids. Application of standard fuel oil analyses. Technical Research Centre of Finland; 1997.

- [26] Boateng, A.A., Jung, H.G. and Adler, P.R., Pyrolysis of energy crops including alfalfa stems, reed canarygrass. Fuel 85 (2006): 2450–2457.
- [27] ระวีวรรณ แก้วกล้า. การผลิตเอทานอลจากฟางข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532.
- [28] Bridgewater A.V. and Bridge S.A. Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization. Elsevier Applied Science (1991): 11.
- [29] Nurgul O., Esin A.V., Basak B.U. and Ayse P.E. Characterization of bio-oil obtained from fruit pulp pyrolysis. Energy 33 (2008): 1233– 1240.
- [30] Maniatis K. and Buekens, A. Fast pyrolysis of biomass A.V. Bridgewater and J.L. Kuester. Research in thermochemical biomass conversion. Great Britain Science (1998): 179-189.
- [31] Olofsson, I., Nordin, A. and Soderlind, U., Initial review and evaluation of process technologies and systems suitable for cost-efficient medium-scale gasification for biomass to liquids fuels. ETPC Report, (2005).
- [32] Worasuwannarak N., Sonobe T. and Tanthapanichakoon W. Pyrolysis behavior of rice straw, rice husk, and corncob by TG-MS technique. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 78 (2007): 265-271.
- [33] Ayse P. E., Esin A. and Ersan P. Rice straw as a bio-oil source via pyrolysis and steam pyrolysis. Energy 29 (2004): 2171–2180.
- [34] Zheng, J.L., Yi W., and Wang, N. Bio-oil production from cotton stalk. Energy Conversion and Management 49 (2008): 1742-1730.
- [35] Lu, Q., Yang, X.L. and Zhu, X.F. Analysis on chemical and properties of bio-oil pyrolyzed from rice husk. Journal Analytical and Applied Pyrolysis 82 (2008): 191-198.
- [36] sadullah, M., Rahman, M.A., Ali, M.M., Rahman, M.S. and Motin, M.A. Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. Fuel 86 (2007): 2514-2520.



- [37] สินีนาฏ รอดจীন. ไพโรไลซิสของชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [38] Lee K.H., Kang B.S., Park Y.K and Kim JS. Influence of reaction temperature, pre-treatment, and a char removal system on the production of bio-oil from rice strew by fast pyrolysis, using a fluidized bed. Energy & Fuels 19 (2005): 2179-2184.
- [39] Lu Q., Yang X.L. and Zhu X.F. Analysis on chemical and properties of bio-oil pyrolyzed from rice husk. Journal Analytical and Applied Pyrolysis 82 (2008): 191-198.
- [40] Jung, S.H., Kang, B.S. and Kim, J.-S., Production of bio-oil from rice straw and bamboo sawdust under various reaction conditions in a fast pyrolysis plant equipped with a fluidized bed and a char separation system. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 82 (2008): 240–247.
- [41] Sensoz, S., Angin, D., and Yorgun, S. Influence of particle size on the pyrolysis of rapeseed (*Brassica naous* L.): fuel properties of bio-oil. Biomass & Bioenergy 19 (2000): 271-279.
- [42] Horne, P.A., Williams, P.T., Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass. Fuel 75 (1996): 1051–1059.
- [43] Das, P., Sreelatha, T. and Ganesh, A., Bio oil from pyrolysis of cashew nut shell- characterisation and related properties. Biomass Bioenergy 27 (2004): 265–75.
- [44] สุพจน์ แหวนเพชร. การผลิตน้ำมันชีวภาพจากผักตบชวาโดยไพโรไลซิสแบบเร็ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [45] Eve.Viscosity. [Online]. Available from: [www.eve.or.th](http://www.eve.or.th) [2011, October 9]

- [46] Lu Q., Yang X.L. and Zhu X.F. Analysis on chemical and properties of bio-oil pyrolyzed from rice husk. *Journal Analytical and Applied Pyrolysis* 82 (2008): 191-198.
- [47] Sensoz S. and evgi I.K. Bio-oil production from soybean (*Glycine max L.*); fuel properties of Bio-oil. *Industrial Crops and Product* 23 (2006): 99-105.
- [48] Oasmaa, A. Leppamaki, E., Koponen, P., Levander, J. and Tapola, E., Physical characterization of biomass-based pyrolysis liquids. Application of standard fuel oil analyses. *Technical Research Centre of Finland*; 1997.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง

1. การวิเคราะห์เชื้อเพลิงแบบประมาณ (Proximate Analysis): ASTM D3172-D3175
- 1.1 ปริมาณความชื้นในตัวอย่างเชื้อเพลิง (Standard Test Method for moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke: ASTM D3173)

#### หลักการ

ตัวอย่างชีวมวลที่ผ่านการร่อนตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกไป

#### เครื่องมือ

1. เตาอบ (Oven)
2. ถ้วยครุชชีเบิล (Porcelain Crucible)
3. เดสิเคเตอร์ (Desiccator)

#### วิธีการทดลอง

1. อบถ้วยครุชชีเบิลในเตาอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทิ้งให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ประมาณ 30 นาที ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างชีวมวลใส่ครุชชีเบิล ประมาณ 1 กรัม ปิดฝาทันทีบันทึกน้ำหนัก
3. อบครุชชีเบิลพร้อมตัวอย่างในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบิลพร้อมตัวอย่าง

#### การคำนวณ

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

เมื่อ	M =	ร้อยละของปริมาณความชื้น
	$W_2 =$	น้ำหนักของครุชชีเบิลรวมน้ำหนักตัวอย่างก่อนการอบ (กรัม)
	$W_1 =$	น้ำหนักของครุชชีเบิลที่มีตัวอย่างผ่านการอบ 120 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง (กรัม)
	W =	น้ำหนักของตัวอย่างชีวมวลแห้ง (กรัม)

## 1.2 ปริมาณเถ้าในตัวอย่างเชื้อเพลิง (Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke: ASTM D3174)

### หลักการ

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

### เครื่องมือ

1. เตาอบ (Oven)
2. ถ้วยครุชชีเบิล (Porcelain Crucible)
3. เดสิเคเตออร์ (Desiccator)

### วิธีการทดลอง

1. เผาถ้วยครุชชีเบิลในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตออร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบิลพร้อมฝาแล้วบันทึกผล
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างชีวมวลแห้งใส่ครุชชีเบิล ประมาณ 1 กรัม บันทึกน้ำหนักที่ชั่ง
3. ใส่ครุชชีเบิลในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง หรือเผากระทั่งน้ำหนักคงที่
4. นำครุชชีเบิลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปชั่งให้เย็นใส่ในเดสิเคเตออร์ ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

### การคำนวณ

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

เมื่อ	A	=	ร้อยละของเถ้า
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่างชีวมวลแห้ง (กรัม)
	W <sub>3</sub>	=	น้ำหนักของถ้วยครุชชีเบลที่มีเถ้า (กรัม)
	W <sub>4</sub>	=	น้ำหนักของถ้วยครุชชีเบลพร้อมฝา (กรัม)

### 1.3 ปริมาณสารระเหยในตัวอย่างเชื้อเพลิง (Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke: ASTM D3175)

#### หลักการ

นำตัวอย่างชีวมวลที่ผ่านการร่อนตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อ (Tubular Furnace) ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ปริมาณไอระเหยคำนวณจากน้ำหนักตัวอย่างชีวมวลที่หายไป

#### เครื่องมือ

1. เตาอบ (Oven)
2. ถ้วยครุชชีเบล (Porcelain Crucible)
3. เดซิเคเตอร์ (Desiccator)

#### วิธีการทดลอง

1. เเผครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผาปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝา บันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างชีวมวลแห้งใส่ในครุชชีเบลประมาณ 1 กรัม บันทึกผลน้ำหนักชีวมวลแล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
3. ใช้ที่คีบเหล็กคอบถ้วยครุชชีเบลนำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
4. หย่อนครุชชีเบลให้อยู่บริเวณปากเตาด้วยความระมัดระวัง ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
5. หย่อนครุชชีเบลให้อยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 นาที

6. นำถ้วยครุชชีเบิลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ทิ้งในเดสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

#### การคำนวณ

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

เมื่อ	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่างชีวมวลแห้ง (กรัม)
	W <sub>5</sub>	=	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝา รวมกับน้ำหนักชีวมวลก่อนเผา (กรัม)
	W <sub>6</sub>	=	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝา รวมกับน้ำหนักชีวมวลหลังเผา (กรัม)

#### 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างชีวมวล

##### การคำนวณ

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

เมื่อ	A	=	ร้อยละของเถ้า
	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	M	=	ร้อยละของความชื้น

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

##### หลักการ

เผาตัวอย่างชีวมวลที่ต้องการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สออกซิเจน ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ภายในบอมบ์ จะถ่ายเทให้กับน้ำที่อยู่รอบๆ ค่าความร้อนคำนวณได้จากผลคูณของความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำ (ก่อนและหลังจุดระเบิด) กับค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ ซึ่งหาได้จากการเผากรดเบนโซอิก (Benzoic acid) ภายใต้ภาวะเดียวกัน

## เครื่องมือ

1. Oxygen Bomb Calorimeter

## สารเคมี

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

## การวิเคราะห์

การหาค่าความจุความร้อนมาตรฐานของบอมบ์แคลอริมิเตอร์

1. ชั่งกรดเบนโซอิกประมาณ 1 กรัม ให้มีความละเอียดถึง 0.0001 กรัม ใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่างของเครื่อง
2. ตัดลวด (Fuse Wire) ความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ผูกที่ปลายทั้งสองข้างของส่วนจุดระเบิด ระวังอย่าให้ลวดสัมผัสด้านข้างแกนบอมบ์ให้ลวดแตะผิวตัวอย่างในถ้วย
3. ล้างภายในบอมบ์ให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นเช็ดให้สะอาด หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่นลงในบอมบ์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร
4. ติดตั้งบอมบ์ พร้อมปิดฝาให้แน่นบรรจุแก๊สออกซิเจนมีความดัน 30 บรรยากาศ
5. นำบอมบ์ที่อัดแก๊สออกซิเจนแล้ววางลงในถังน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิ ต่อขั้วไฟฟ้าสำหรับจุดระเบิด
6. เติมน้ำกลั่นลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิปริมาตร 2000 มิลลิลิตร ปรับอุณหภูมิของน้ำโดยการกวนให้อุณหภูมิคงที่และต่ำกว่าอุณหภูมิของห้องประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส
7. ทิ้งไว้ 5 นาที ให้อุณหภูมิคงที่
8. เมื่ออุณหภูมิคงที่ ทำการบันทึกเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น ( $T_i$ ) กดปุ่มจุดระเบิด
9. จับเวลาทุกๆ 1 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิสุดท้าย ( $T_f$ )



10. ปิดเครื่องและนำบอมบ์ออกจากเครื่อง ค่อยๆลดความดัน ถ้าภายในมีเขม่าหรือเผาไหม้ไม่หมดให้ทำใหม่
11. ล้างภายในบอมบ์ทุกส่วนด้วยน้ำล้างบอมบ์ที่เตรียมไว้ จนหมดความเป็นกรดและมีปริมาตร 250 มิลลิลิตร ไตเตรตน้ำล้างด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต บันทึกปริมาตรที่ใช้
12. วัดความยาวหลอดที่เหลือ บันทึกผล

### การคำนวณ

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

เมื่อ

E	=	ค่าความจุความร้อนเครื่องแคลอริมิเตอร์ (จุดต่อองศาเซลเซียส)
H	=	ค่าความร้อนของการเผาไหม้กรดเบนโซอิก (จุดต่อกรัม)
g	=	น้ำหนักเบนโซอิกที่ใช้ (กรัม)
e <sub>1</sub>	=	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) 1 มิลลิลิตรเทียบกับ 10550.56 จูล
e <sub>2</sub>	=	ความยาวหลอดถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร) x ค่าความร้อนของหลอด (จุดต่อเซนติเมตร)
T	=	T <sub>f</sub> -T <sub>i</sub> ผลต่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ทำการทดลองซ้ำมาทุกประการตั้งแต่ข้อ 1-12 โดยเปลี่ยนจากกรดเบนโซอิกเป็นตัวตัวอย่างเชื้อเพลิงแล้วคำนวณค่าความร้อนได้จากสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ	$Q_v$ (gross)	=	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (จูลต่อกรัม)
	T	=	$T_f - T_i$ (องศาเซลเซียส)
เทียบ	$e_1$	=	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) โดย 1 มิลลิลิตร กับ 10550.56 จูล
	$e_2$	=	ความยาวหลอดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร) x ค่าความร้อนของ หลอด (บีที่ต่อเซนติเมตร)
	$e_3$	=	$25 \times 10^3$ (จูล) x ร้อยละกำมะถัน x น้ำหนักเชื้อเพลิงที่ใช้ (กรัม)

**ภาคผนวก ข**  
**การคำนวณ**

**การคำนวณ**

1. การคำนวณร้อยละผลได้ของเหลว

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

2. การคำนวณร้อยละผลได้ของแข็ง

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

3. การคำนวณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (Daf)} = 100 - \text{ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลว} - \text{ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็ง}$$

โดย

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

$$W_R = \text{น้ำหนักกากของแข็งที่ปราศจากความชื้น}$$

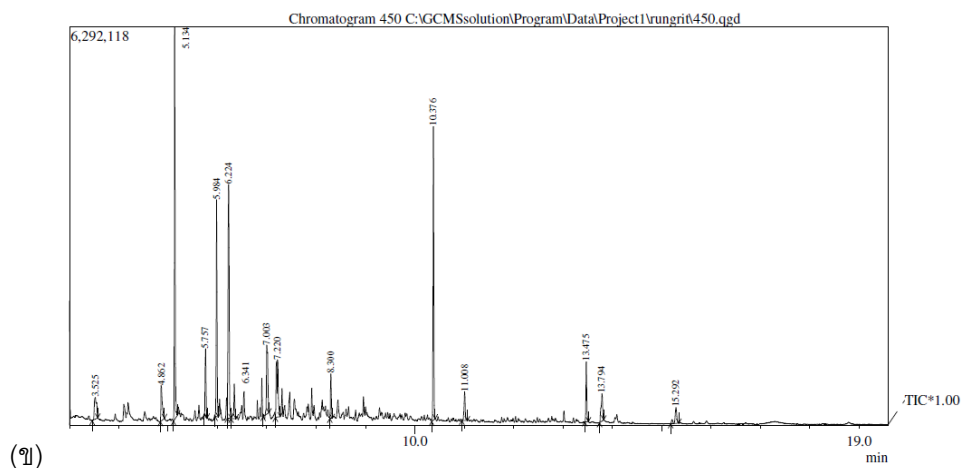
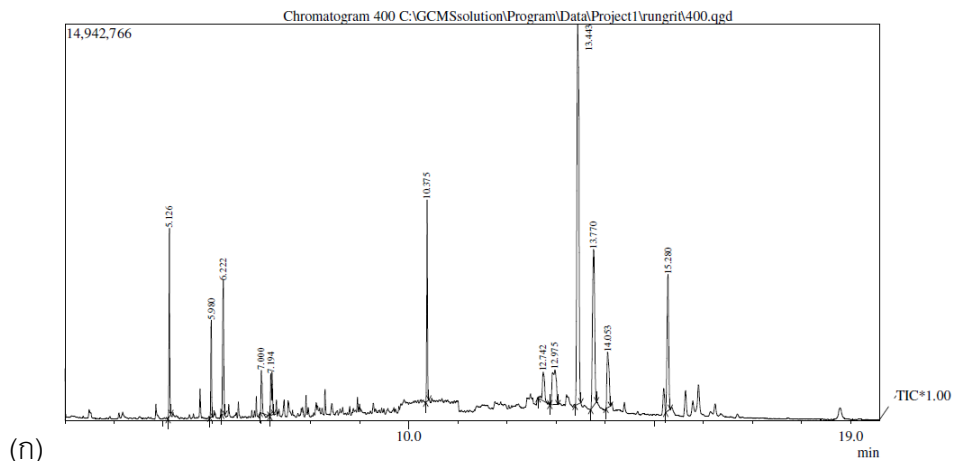
$$W_{Liq} = \text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลว}$$

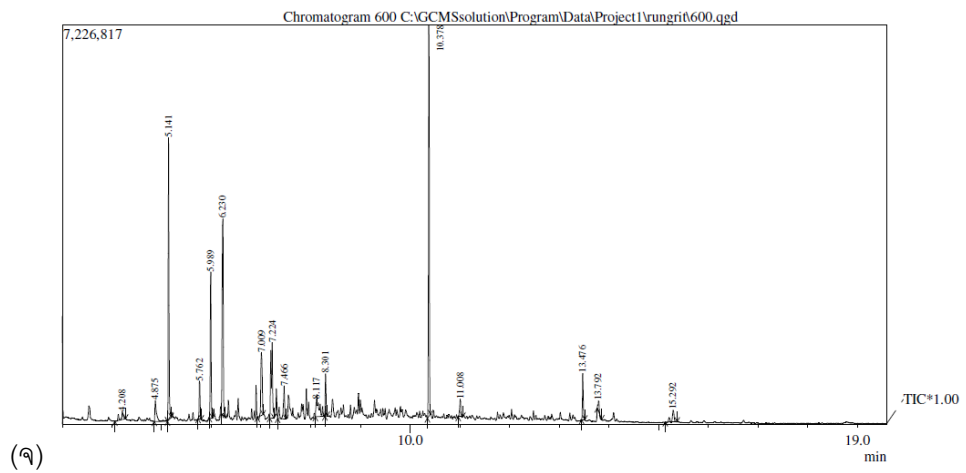
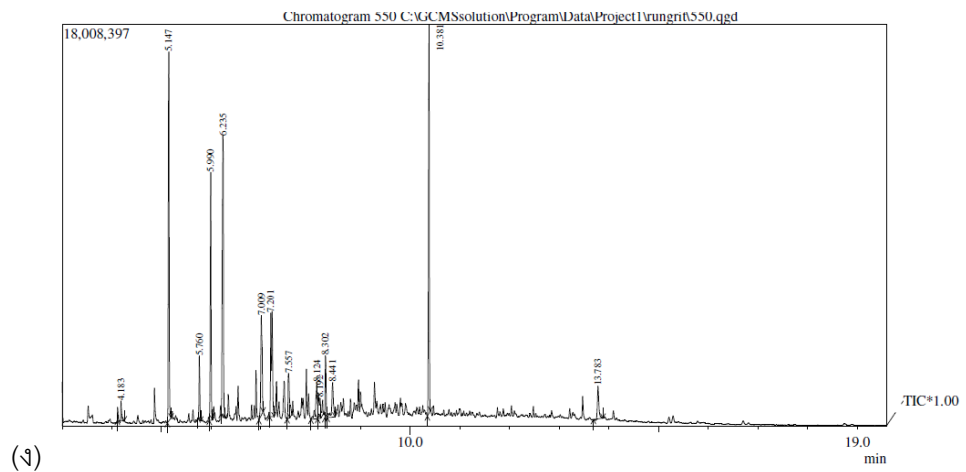
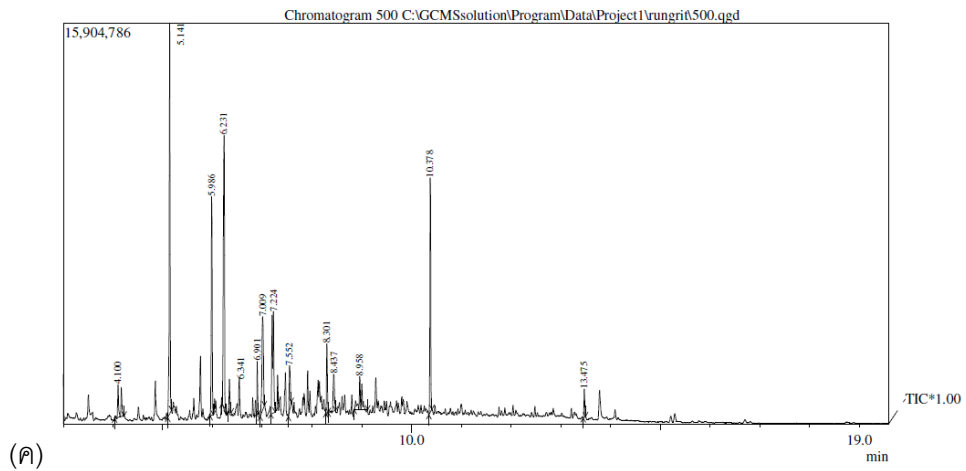
## ภาคผนวก ค

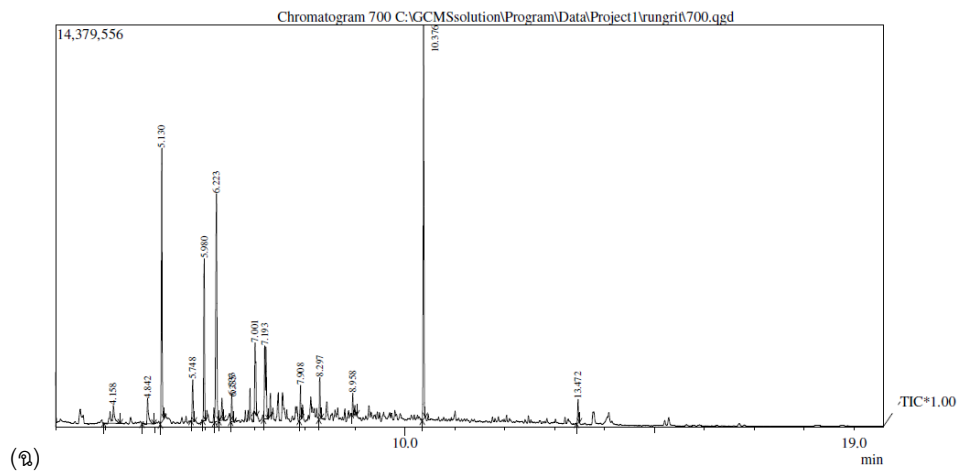
## การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพ

1. ภาพการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพโดยเทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรสโกปี ดังชุดภาพ ค1 ภาพ(ก) อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภาพ(ข) อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ภาพ(ค) อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภาพ(ง) อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ภาพ(จ) อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสและภาพ(ฉ) อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

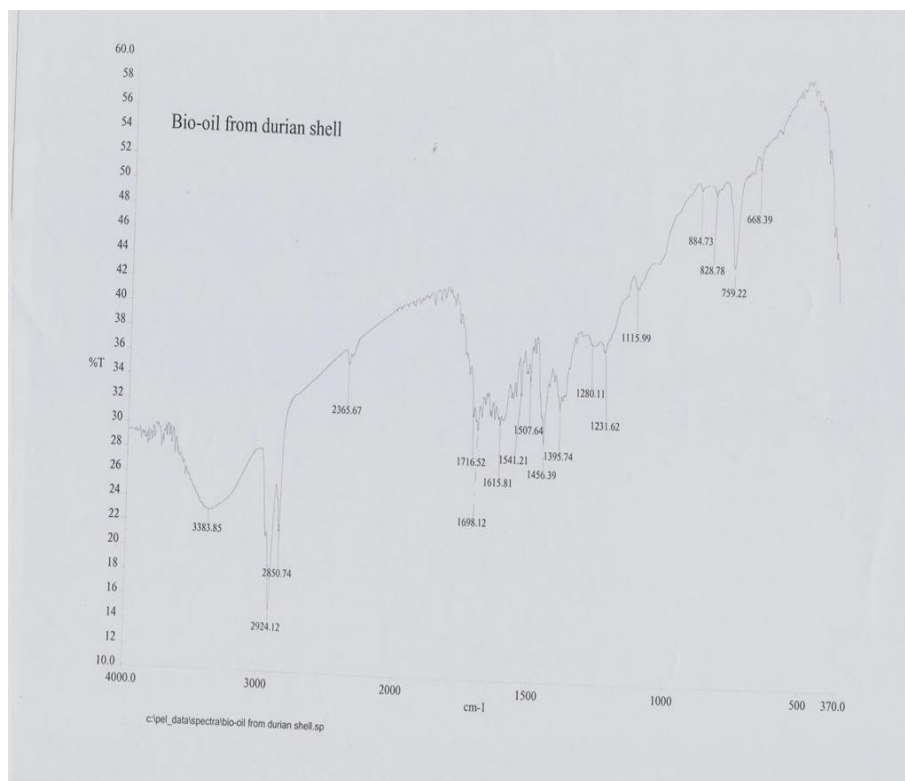
ภาพ ค.1





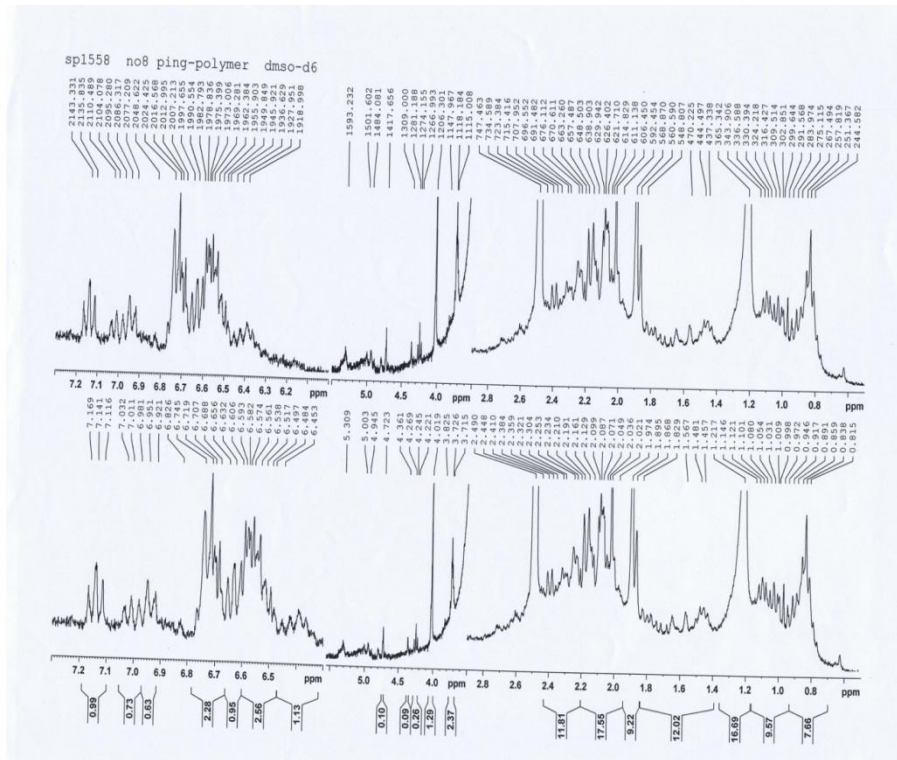


## 2 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิค FTIR



ภาพที่ ค.2 FTIR สเปกตรัมขององค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ

2 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิค  $H^1$ NMR



ภาพที่ ค.3  $H^1$ NMR สเปกตรัมของน้ำมันชีวภาพ

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรุ่งฤทธิ์ ไต๊ะทอง เกิดเมื่อวันที่ 4 ตุลาคม 2529 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์ กาญจนบุรี จังหวัดกาญจนบุรีสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิตสาขา เคมี คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552